

Studi Eksperimental Variasi NaOH Dalam Proses Desulfurisasi Pertasol dan Kaitannya dengan Perspektif Fisika Atmosfer

Yuansyah Dhaniar Ramadhan¹, Arie Realita¹, Nurdin²

¹Universitas Negeri Surabaya, Surabaya

²Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak dan Gas Bumi, Blora

INFORMASI NASKAH

Diterima : 28 April 2025
Direvisi : 13 Juni 2025
Disetujui : 16 Juni 2025
Terbit : 30 Juni 2025

Email korespondensi:
yuansyahdhaniar.22028@mhs.unesa.ac.id

Laman daring:
<https://doi.org/10.37525/mz/2025-1/1050>

ABSTRAK

Kandungan sulfur dalam bahan bakar fosil seperti Pertasol, merupakan penyumbang utama emisi sulfur dioksida (SO₂) yang berdampak buruk kesehatan manusia, kualitas udara dan keseimbangan atmosfer. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas desulfurisasi Pertasol jenis CA dan CB menggunakan larutan natrium hidroksida (NaOH) dengan variasi konsentrasi 5–30%, serta mengkaji implikasinya terhadap emisi SO₂ dan nilai *Radiative Forcing* (RF). Proses desulfurisasi dilakukan secara eksperimental dengan volume bahan bakar tetap 50 mL pada setiap perlakuan, dan dianalisis kandungan sulfur sebelum dan sesudah perlakuan menggunakan *Oil Sulfur Analyzer*. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi NaOH mampu menurunkan kandungan sulfur secara signifikan, dengan efisiensi optimum pada konsentrasi 20–25%. Estimasi emisi SO₂ menurun dari 0,02101 g menjadi 0,01766 g untuk Pertasol CA dan dari 0,04260 g menjadi 0,02075 g untuk Pertasol CB. Penurunan emisi ini diikuti dengan penurunan nilai RF, dari 0,0918 W/m² menjadi 0,0772 W/m² (CA) dan dari 0,1864 W/m² menjadi 0,0909 W/m² (CB), menunjukkan reduksi kontribusi sulfur terhadap ketidakseimbangan energi atmosfer. Proses kimia yang terjadi melibatkan konversi senyawa organosulfur menjadi bentuk garam larut seperti Na₂SO₃ dan Na₂SO₄. Dengan demikian, penggunaan NaOH pada proses desulfurisasi terbukti tidak hanya efektif menurunkan kadar sulfur, tetapi juga berkontribusi dalam upaya mitigasi dampak lingkungan dan perubahan iklim akibat bahan bakar fosil.

Kata kunci: Desulfurisasi, NaOH, Pertasol, Sulfur, Treating

ABSTRACT

The sulfur content in fossil fuels such as Pertasol is a major contributor to sulfur dioxide (SO₂) emissions, which negatively affect human health, air quality, and atmospheric balance. This study aims to evaluate the effectiveness of desulfurization of Pertasol types CA and CB using sodium hydroxide (NaOH) solutions at varying concentrations (5–30%), and to examine its implications for SO₂ emissions and Radiative Forcing (RF) values. The desulfurization process was carried out experimentally with a fixed fuel volume of 50 mL for each treatment, and sulfur content was analyzed before and after treatment using an Oil Sulfur Analyzer. The results showed that increasing NaOH concentration significantly reduced sulfur content, with optimal efficiency achieved at concentrations between 20–25%. Estimated SO₂ emissions decreased from 0.02101 g to 0.01766 g for Pertasol CA and from 0.04260 g to 0.02075 g for Pertasol CB. This reduction in emissions was followed by a decrease in RF values, from 0.0918 W/m² to 0.0772 W/m² (CA) and from 0.1864 W/m² to 0.0909 W/m² (CB), indicating a reduction in sulfur's contribution to atmospheric energy imbalance. The chemical process involved the conversion of organosulfur compounds into soluble salts such as Na₂SO₃ and Na₂SO₄. Thus, the use of NaOH in the desulfurization process proves to be not only effective in reducing sulfur levels, but also contributes to environmental mitigation and climate change control efforts related to fossil fuel usage.

Keywords: Desulfurization, NaOH, Pertasol, Sulfur, Treating

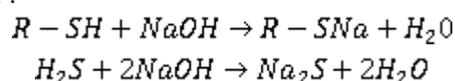
PENDAHULUAN

Bahan bakar minyak (BBM) seperti pertalite atau Pertasol merupakan komponen penting dalam kehidupan sehari-hari, terutama dalam sektor transportasi dan industri. Namun, penggunaan BBM yang masih mengandung sulfur dalam kadar tinggi menimbulkan kekhawatiran terhadap kualitas udara dan kesehatan lingkungan. Kandungan sulfur dalam bahan bakar dapat menghasilkan emisi gas sulfur dioksida (SO₂) selama proses pembakaran, yang kemudian dapat bereaksi dengan uap air di atmosfer membentuk hujan asam. Fenomena ini tidak hanya berdampak pada degradasi lingkungan tetapi juga merusak infrastruktur dan membahayakan kesehatan manusia, terutama saluran pernapasan (*World Health Organization*, 2021).

Dalam perspektif fisika atmosfer, keberadaan sulfur dioksida di lapisan troposfer menjadi perhatian utama. Senyawa ini bersifat reaktif dan dapat membentuk aerosol sulfat yang berperan dalam meningkatkan albedo atmosfer dan mengganggu keseimbangan radiasi bumi. Selain itu, SO₂ memiliki dampak jangka pendek berupa iritasi sistem pernapasan dan dampak jangka panjang berupa akumulasi aerosol yang dapat mengganggu dinamika awan dan mempercepat proses presipitasi asam (IPCC, 2021).

Upaya untuk mengurangi kandungan sulfur dalam BBM dilakukan melalui proses desulfurisasi, salah satunya dengan menggunakan larutan basa seperti natrium hidroksida (NaOH). Proses ini secara kimiawi mampu menangkap atau mengikat senyawa sulfur dan membentuk senyawa yang lebih aman dan tidak mudah menguap. Dengan mengaplikasikan NaOH dalam berbagai variasi konsentrasi, diharapkan proses desulfurisasi menjadi lebih efisien dalam menurunkan kadar sulfur. Penelitian eksperimental terhadap dua jenis Pertasol, yaitu CA dan CB, memungkinkan evaluasi sejauh mana efektivitas NaOH dalam menurunkan kandungan sulfur pada masing-masing jenis bahan bakar tersebut.

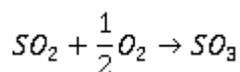
Proses desulfurisasi dilakukan menggunakan larutan NaOH (natrium hidroksida atau soda api) melalui prinsip reaksi basa kuat terhadap senyawa asam sulfur. Reaksi umum dapat dituliskan sebagai :



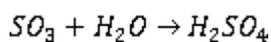
Di mana R-SH adalah gugus thiol dari senyawa sulfur organik. NaOH berperan sebagai agen nukleofilik yang menyerang gugus sulfur dan mengubahnya menjadi bentuk garam natrium yang larut dalam air dan mudah dipisahkan dari fraksi bahan bakar.

Dari perspektif teknis kendaraan, penggunaan bahan bakar yang memiliki kandungan sulfur tinggi memberikan dampak negatif terhadap performa mesin dan ketahanan komponen logam. Sulfur dalam bahan bakar dapat menyebabkan terbentuknya endapan serta mempercepat korosi pada bagian-bagian vital seperti sistem injeksi bahan bakar dan *catalytic converter*. Akumulasi kerusakan ini tidak hanya menurunkan efisiensi pembakaran, tetapi juga memperpendek umur operasional mesin, yang pada akhirnya meningkatkan biaya perawatan dan perbaikan kendaraan.

Selama proses pembakaran bahan bakar bersulfur, sulfur dioksida (SO₂) dilepaskan ke atmosfer. Senyawa ini dapat mengalami oksidasi lebih lanjut menjadi sulfur trioksida (SO₃) melalui reaksi :



SO₃ yang terbentuk kemudian berinteraksi dengan uap air di udara untuk menghasilkan asam sulfat (H₂SO₄) melalui reaksi:



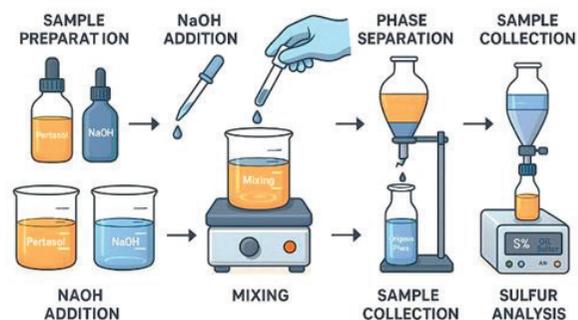
Penelitian mengenai desulfurisasi bahan bakar berbasis NaOH telah banyak dilakukan di luar negeri, namun kajian serupa di Indonesia masih relatif terbatas. Sebuah penelitian oleh Rachman *et al.* (2020) mengkaji upaya pengurangan sulfur pada solar menggunakan reagen basa, dan menunjukkan bahwa penggunaan NaOH mampu menurunkan kandungan sulfur secara signifikan hingga lebih dari 40%, tergantung konsentrasi yang digunakan. Namun, studi tersebut lebih berfokus pada bahan bakar jenis solar, sehingga penelitian pada Pertasol yang notabene digunakan secara luas di sektor transportasi darat di Indonesia masih jarang ditemukan. Hal ini membuka peluang penelitian ini untuk mengisi kekosongan literatur terkait optimasi desulfurisasi Pertasol berbasis larutan NaOH. Selain itu, studi oleh Huang *et al.* (2018) mengungkapkan bahwa penurunan emisi SO₂ dari bahan bakar melalui desulfurisasi berkontribusi langsung dalam memperbaiki kualitas atmosfer dengan mengurangi pembentukan aerosol sulfat. Meskipun relevan, penelitian tersebut belum secara spesifik mengaitkan proses kimia desulfurisasi dengan perubahan *radiative forcing*

dalam konteks fisika atmosfer. Beberapa metode konvensional seperti *hydrodesulfurization* (HDS) banyak digunakan di industri besar, tetapi memerlukan suhu dan tekanan tinggi serta katalis berbasis logam mulia, sehingga tidak ekonomis untuk aplikasi skala kecil (Song, 2003; Babich & Moulijn, 2003). Untuk itu, pendekatan baru seperti *oxidative desulfurization* (ODS) (Campos-Martin *et al.*, 2010) dan *adsorptive desulfurization* (Zhang *et al.*, 2019) mulai dikembangkan, menawarkan proses yang lebih sederhana dan ramah lingkungan. Namun, sebagian besar penelitian tersebut lebih difokuskan pada bahan bakar standar internasional seperti *diesel ultra-low* sulfur, bukan pada varian lokal seperti pertasol.

Oleh karena itu, penelitian ini menjadi sangat relevan mengingat masih terbatasnya kajian yang mengaitkan efektivitas proses desulfurisasi sederhana menggunakan NaOH dengan dampaknya terhadap nilai RF, yang merupakan indikator penting dalam perubahan keseimbangan energi di atmosfer. Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih berfokus pada penurunan kadar sulfur tanpa mengintegrasikan analisis terhadap implikasi fisiknya dalam sistem atmosfer global. Penelitian ini hadir untuk mengisi celah tersebut dengan menggabungkan pendekatan interdisipliner antara kimia lingkungan dan fisika atmosfer, sehingga dapat memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai dampak desulfurisasi bahan bakar terhadap lingkungan dan iklim.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di Migas Cepu dengan tahapan utama yang meliputi persiapan sampel, perlakuan desulfurisasi (*treating*), dan analisis produk akhir. Alur keseluruhan prosedur eksperimental digambarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Proses Treating Pertasol

Pada tahap awal, sampel bahan bakar pertasol tipe CA dan CB diambil masing-masing sebanyak 50 mL dan dimasukkan ke dalam beaker glass bersih berkapasitas 100 mL. Perlakuan desulfurisasi dilakukan dengan menambahkan larutan natrium hidroksida (NaOH) cair ke dalam masing-masing sampel, dengan variasi konsentrasi volume terhadap volume (v/v) sebesar 5%, 10%, 15%, 20%, 23%, 25%, 27%, dan 30%. Volume penambahan larutan NaOH disesuaikan dengan konsentrasi yang ditargetkan, yakni 2,5 mL (5%), 5 mL (10%), 7,5 mL (15%), 10 mL (20%), 11,5 mL (23%), 12,5 mL (25%), 13,5 mL (27%), dan 15 mL (30%) dari total volume Pertasol sebanyak 50 mL.

Campuran Pertasol dan larutan NaOH dihomogenkan menggunakan *magnetic stirrer* dengan hot plate selama 30 menit pada suhu ruang ($\pm 25^\circ\text{C}$) guna memaksimalkan reaksi kimia dalam proses desulfurisasi. Setelah pengadukan selesai, campuran didiamkan selama 15 menit agar terjadi pemisahan fasa secara gravitasi. Fasa organik (Pertasol hasil perlakuan) kemudian dipisahkan menggunakan corong pisah (*separatory funnel*) dan ditampung dalam vial sampel yang bersih dan tertutup rapat.

Seluruh sampel perlakuan dianalisis kandungan sulfurnya menggunakan *Oil Sulfur Analyzer*, yaitu alat berbasis prinsip fluoresensi sinar-X (XRF) yang mampu mendeteksi dan mengukur kadar sulfur secara cepat dan akurat tanpa perlu preparasi sampel yang rumit. Alat ini bekerja dengan menembakkan sinar-X ke dalam sampel, lalu mengukur intensitas sinyal yang dipantulkan dari atom sulfur, sehingga konsentrasi unsur sulfur dapat dihitung secara langsung.

Pengujian dilakukan satu kali untuk setiap variasi konsentrasi NaOH pada masing-masing tipe Pertasol (CA dan CB). Data yang diperoleh digunakan untuk menghitung efisiensi penurunan sulfur (% removal) dengan membandingkan kadar sulfur awal dan akhir. Selanjutnya, nilai kandungan sulfur setelah perlakuan digunakan untuk memperkirakan emisi SO_2 yang dihasilkan selama proses pembakaran. Berdasarkan data tersebut, dilakukan analisis terhadap perubahan RF sebagai indikator dampak sulfur terhadap sistem energi atmosfer, khususnya terkait pembentukan hujan asam dan gangguan keseimbangan

radiasi di lapisan troposfer. Nilai RF dapat di hitung menggunakan persamaan berikut dengan menghitung emisi dari SO_2 terlebih dahulu :

1. Emisi $\text{SO}_2 =$

$$\text{Kandungan Sulfur} \times 2 \cdot 10^{-3}$$

2. Total Emisi SO_2 (M SO_2)

$$\text{Emisi } \text{SO}_2 \times \text{volume Pertasol} = \dots \text{g}$$

3. Radiative Forcing (RF)

$$\frac{\text{M SO}_2}{1 \cdot 10^9} \times (-0,3) = \dots \text{w/m}^2$$

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini terdapat 2 jenis Pertasol yang akan diuji, yaitu Pertasol jenis CA dan CB. Kedua jenis tersebut berbeda dalam kandungan awal sulfur yang cukup signifikan. Pertasol CA memiliki kandungan sulfur awal sebesar 450,1 ppm, sedangkan Pertasol CB lebih tinggi, yaitu 531,8 ppm. Kandungan sulfur yang tinggi menjadi perhatian utama karena dalam proses pembakaran dapat menghasilkan gas sulfur dioksida (SO_2), yang dikenal sebagai kontributor utama pencemaran udara dan pembentukan hujan asam (Seinfeld & Pandis, 2016). Untuk menurunkan kadar sulfur tersebut, dilakukan proses desulfurisasi menggunakan larutan NaOH sebagai agen treating kimiawi, dengan variasi konsentrasi antara 5% hingga 30%. Variasi ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas reaksi dan memastikan validitas hasil secara kuantitatif. Data kandungan sulfur sebelum dan sesudah perlakuan disajikan pada Tabel 1 sebagai dasar perbandingan antar sampel dan konsentrasi perlakuan.

Tabel 1. Hasil Desulfurisasi/Treating Pertasol

Jenis Pertasol	Konsentrasi NaOH (%)	Kandungan Sulfur (ppm)		Reduksi Persentase (%)
		Sebelum	Sesudah	
CA	5	450,1	210,1	53,32
	10		203,6	54,77
	15		196,3	56,39
	20		186,7	58,52
	23		185,5	58,79
	25		182,2	59,52
	27		179,5	60,12
	30		176,6	60,76

	5		426,0	19,89
	10		392,9	26,12
	15		314,5	40,86
CB	20	531,8	306,3	42,40
	23		269,1	49,40
	25		259,5	51,20
	27		258,9	51,32
	30		207,5	60,98

	5	426,0	0,8520	0,04260	-1,278
	10	392,9	0,7858	0,03929	-1,179
	15	314,5	0,629	0,03145	-9,435 · 10 ⁻¹
CB	20	306,3	0,6126	0,03063	-9,189 · 10 ⁻¹
	23	269,1	0,5382	0,02691	-8,073 · 10 ⁻¹
	25	259,5	0,519	0,02595	-7,785 · 10 ⁻¹
	27	258,9	0,5178	0,02589	-7,767 · 10 ⁻¹
	30	207,5	0,4150	0,02075	-6,225 · 10 ⁻¹

Berdasarkan data penelitian pada Tabel 1, terhadap dua jenis Pertasol yaitu CA dan CB, diketahui bahwa keduanya memiliki perbedaan kandungan sulfur awal yang signifikan, dengan CA. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi NaOH secara konsisten menurunkan kandungan sulfur pada kedua jenis Pertasol, dengan efisiensi reduksi yang berbeda antara Pertasol CA dan CB. Pada Pertasol CA pola penurunan bersifat gradual, namun mulai mendatar setelah konsentrasi 23–25%, menunjukkan bahwa efisiensi reaksi kimia cenderung mencapai titik jenuh. Konsentrasi optimum dapat dikatakan berada pada rentang 25–30%, karena peningkatan efisiensi di atas 25% relatif kecil. Berbeda dengan Pertasol B efisiensi meningkat tajam pada konsentrasi menengah hingga tinggi, terutama antara 15% hingga 30%, dengan puncak efisiensi 60,98% pada 30% NaOH. Ini menunjukkan bahwa reaksi desulfurisasi pada Pertasol CB memerlukan konsentrasi basa yang lebih tinggi untuk mencapai efisiensi yang setara dengan CA.

Sebagai analisis lebih lanjut, dilakukan perhitungan total emisi SO₂ dan juga nilai RF untuk masing-masing jenis Pertasol seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil perhitungan emisi dan total emisi SO₂ dan Radiative Forcing pada proses treating/desulfurisasi pertasol CA dan CB.

Jenis Pertasol	Konsentrasi NaOH (%)	Kandungan Sulfur Setelah Desulfurisasi (ppm)	Emisi SO ₂ (g/L)	Total Emisi (g)	RF. (10 ⁻¹¹) (W/m ²)
	5	210,1	0,4202	0,02101	-6,303 · 10 ⁻¹
	10	203,6	0,4072	0,02036	-6,108 · 10 ⁻¹
	15	196,3	0,3926	0,01963	-5,889 · 10 ⁻¹
CA	20	186,7	0,3734	0,01867	-5,601 · 10 ⁻¹
	23	185,5	0,3710	0,01855	-5,565 · 10 ⁻¹
	25	182,2	0,3644	0,01822	-5,466 · 10 ⁻¹
	27	179,5	0,359	0,01795	-5,385 · 10 ⁻¹
	30	176,6	0,3532	0,01766	-5,298 · 10 ⁻¹

Hasil perhitungan emisi SO₂ dan nilai RF pada Tabel 2 menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi NaOH secara signifikan menurunkan kandungan sulfur dalam bahan bakar, yang berdampak langsung pada pengurangan emisi gas SO₂ dan penurunan nilai RF. Pada Pertasol CA, kandungan sulfur menurun dari 450,1 ppm menjadi 176,6 ppm seiring dengan peningkatan konsentrasi NaOH dari 5% hingga 30%, yang diikuti oleh penurunan emisi SO₂ dari 0,4202 g/L menjadi 0,3532 g/L, serta penurunan total emisi dari 0,02101 g menjadi 0,01766 g. Hal ini tercermin dalam nilai RF yang juga turun dari -6,303 × 10⁻¹ W/m² menjadi -5,298 × 10⁻¹ W/m². Sementara itu, Pertasol CB yang memiliki kandungan sulfur awal lebih tinggi (531,8 ppm) menunjukkan penurunan lebih tajam, yaitu hingga 207,5 ppm pada konsentrasi NaOH 30%. Emisi SO₂ berkurang dari 0,8520 g/L menjadi 0,4150 g/L, dengan total emisi turun dari 0,04260 g menjadi 0,02075 g, dan nilai RF menurun drastis dari -1,278 W/m² menjadi -6,225 × 10⁻¹ W/m². Dibandingkan dengan CA, Pertasol CB menunjukkan dampak pengurangan emisi dan RF yang lebih besar secara absolut, meskipun efisiensi reaksi kimia pada konsentrasi rendah lebih terlihat pada CA. Hal ini dapat disebabkan komposisi kimia CA mengandung lebih sedikit rantai hidrokarbon panjang yang cenderung menahan sulfur lebih kuat sehingga CA lebih responsif terhadap proses desulfurisasi dibandingkan dengan CB. Penurunan nilai RF pada kedua jenis Pertasol mengindikasikan kontribusi nyata proses desulfurisasi terhadap pengurangan ketidakseimbangan energi atmosfer, yang secara tidak langsung mendukung upaya mitigasi perubahan iklim akibat penggunaan bahan bakar fosil. Dengan menurunkan kandungan sulfur melalui proses treating, pembentukan SO₂ dalam ruang bakar dapat ditekan sehingga mengurangi potensi korosi dan meningkatkan efisiensi

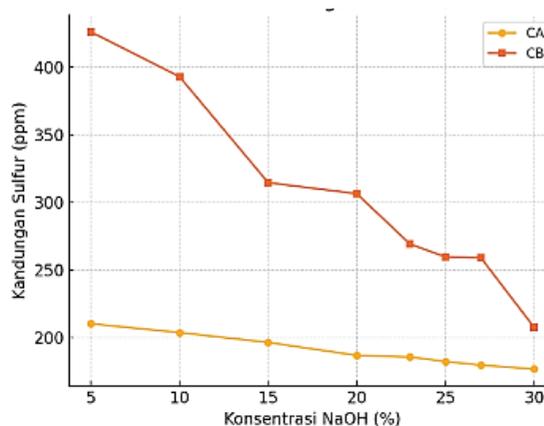
pembakaran.

Melalui tinjauan teoritis dan analisis empiris ini, diketahui bahwa konsentrasi NaOH antara 20% hingga 25% menunjukkan keseimbangan terbaik antara efisiensi penghilangan sulfur, jumlah emisi SO₂ yang ditekan, serta efisiensi penggunaan bahan kimia. Konsentrasi di atas 25% hanya memberikan peningkatan efisiensi marjinal namun dapat menambah risiko korosivitas larutan NaOH terhadap material reaktor, serta meningkatkan biaya operasional dan risiko keselamatan kerja. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa konsentrasi NaOH yang lebih tinggi dari 25% hanya memberikan peningkatan efisiensi marjinal, namun disertai dengan risiko tambahan seperti peningkatan korosivitas terhadap material reaktor, kenaikan biaya operasional, serta ancaman terhadap keselamatan kerja akibat sifat kaustik larutan yang semakin kuat (Gutiérrez, Vara and Serrano, 2012; Ghaziaskar and Pour, 2010; McCabe, Smith and Harriott, 2005). Selain itu, tingkat korosi yang lebih tinggi dapat memperpendek umur peralatan industri, meningkatkan frekuensi pemeliharaan, dan menyebabkan potensi kontaminasi produk (OSHA, 2020). Hal ini juga sesuai dengan temuan Huang *et al.* (2010) yang menyatakan bahwa *sweetening* optimal untuk desulfurisasi fraksi bahan bakar ringan terjadi pada konsentrasi NaOH antara 15–25%, tergantung pada struktur molekul bahan bakar.

Berdasarkan perspektif fisika atmosfer, data pada Table 2 menunjukkan bahwa proses desulfurisasi menggunakan NaOH memiliki kontribusi signifikan dalam mengurangi potensi gangguan terhadap keseimbangan energi Bumi-atmosfer. Dalam sistem atmosfer, gas sulfur dioksida (SO₂) berperan sebagai prekursor utama pembentukan aerosol sulfat yang dapat memengaruhi albedo atmosfer dan awan melalui proses interaksi radiasi dan mikrofisika awan. Meskipun aerosol sulfat dapat meningkatkan reflektansi awan dan menurunkan suhu lokal secara sementara (*cooling effect*), akumulasi jangka panjang dan interaksi kimia lanjutannya justru dapat memperburuk ketidakseimbangan energi global. Nilai Radiative Forcing (RF) dalam tabel mencerminkan perubahan bersih terhadap fluks radiasi akibat adanya reduksi emisi SO₂. Penurunan nilai RF dari $-1,278 \text{ W/m}^2$ menjadi $-0,6225 \text{ W/m}^2$ (Pertasol CB), serta dari $-0,6303$

W/m^2 menjadi $-0,5298 \text{ W/m}^2$ (Pertasol CA), menunjukkan berkurangnya pengaruh partikel sulfur terhadap refleksi dan penyerapan radiasi matahari maupun radiasi inframerah Bumi. Meskipun nilai RF ini bersifat negatif (yang secara klasik mengindikasikan pendinginan), dalam keberlanjutan atmosfer global, reduksi SO₂ justru bermanfaat karena mengurangi ketergantungan pada efek masking terhadap pemanasan akibat gas rumah kaca lainnya seperti CO₂ dan CH₄. Selain itu, pelepasan SO₂ ke atmosfer juga memperburuk kualitas udara dan memperpendek umur partikel atmosfer melalui reaksi fotokimia, sehingga pengurangan emisi ini memiliki nilai strategis dalam pengendalian iklim dan polusi udara. Dengan demikian, pendekatan ini menggabungkan manfaat ganda yaitu menekan emisi lokal yang berbahaya dan mengurangi tekanan radiatif global, sejalan dengan prinsip fisika atmosfer tentang konservasi energi dan dinamika radiasi.

Sebagai visualisasi perbedaan kandungan sulfur pertasol CA dan CB mengenai kandungan sulfur pengujian treating, dapat dimati pada Grafik 1.



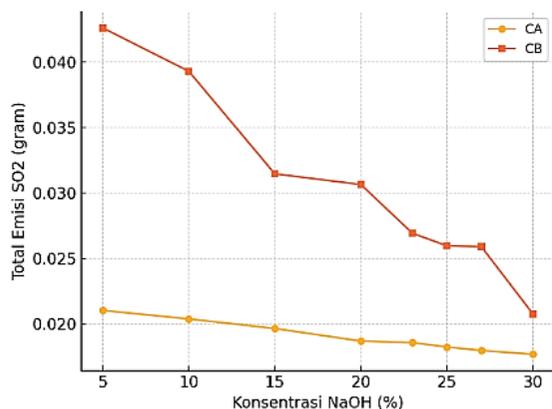
Grafik 1. Hubungan Antara Konsentrasi NaOH (%) Terhadap Kandungan Sulfur Setelah Treating

Grafik 1 menunjukkan hubungan antara konsentrasi NaOH (%) terhadap kandungan sulfur setelah proses treating untuk dua jenis Pertasol, yaitu CA dan CB. Secara umum, terjadi penurunan kandungan sulfur seiring meningkatnya konsentrasi NaOH, baik pada CA maupun CB. Namun, efektivitas reduksi sulfur lebih nyata pada Pertasol CB yang memiliki kandungan sulfur awal lebih tinggi (531,8 ppm) dibandingkan CA (450,1 ppm). Hal ini mengindikasikan bahwa reaksi kimia antara sulfur (S) dalam bentuk senyawa organosulfur dengan NaOH semakin optimal

pada konsentrasi yang lebih tinggi, sesuai reaksi netralisasi dan substitusi basa:

Peningkatan konsentrasi NaOH dari 5% ke 30% menghasilkan penurunan kandungan sulfur yang cukup signifikan, dengan nilai akhir mencapai sekitar 176,6 ppm untuk CA dan 207,5 ppm untuk CB. Meskipun penurunan ini terus terjadi, laju efisiensi terlihat menurun setelah kisaran 25%, yang mengindikasikan bahwa titik optimal reaktivitas kimia telah hampir tercapai. Fenomena ini didukung oleh konsep kinetika reaksi dan saturasi interaksi kimia, di mana penambahan basa berlebih tidak lagi meningkatkan laju reaksi secara proporsional (Atkins & de Paula, 2014).

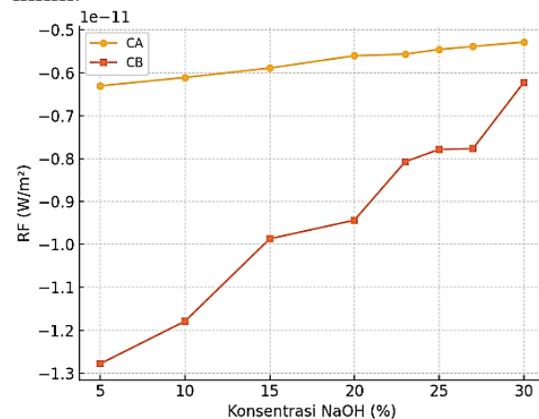
Dari sudut pandang fisika atmosfer, grafik tersebut memperlihatkan potensi mitigasi emisi sulfur dioksida (SO₂) dari hasil pembakaran senyawa sulfur dalam bahan bakar, mengingat SO₂ memicu pembentukan aerosol sulfat yang secara langsung meningkatkan planetary albedo dan menyebabkan global dimming. Hal ini dikonfirmasi oleh penelitian yang menunjukkan bahwa aerosol sulfat mampu memantulkan sinar matahari dan menurunkan suhu permukaan Bumi setelah peristiwa letusan besar (misalnya Gunung Pinatubo). Selain itu, aerosol antropogenik, terutama yang mengandung sulfur, memberikan efek pendinginan yang sebagian mengimbangi pemanasan akibat CO₂ (Wild, 2009; Grandey *et al.*, 2018). Oleh karena itu, penurunan kandungan sulfur, seperti yang ditunjukkan dalam Grafik 1, krusial untuk menstabilkan sistem radiasi Bumi—walaupun juga mengurangi efek penyangga pendinginan dari aerosol sulfat.



Grafik 2. Hubungan Antara Konsentrasi NaOH (%) Terhadap Total Emisi SO₂ (gram)

Grafik 2 menggambarkan hubungan antara konsentrasi NaOH dan total emisi SO₂ (gram), yang dihitung berdasarkan hasil treating terhadap 50 mL sampel. Emisi SO₂ adalah representasi dari sisa sulfur yang tidak teroksidasi sempurna atau tidak bereaksi dengan basa. Emisi SO₂ menurun signifikan seiring meningkatnya konsentrasi NaOH, menunjukkan keberhasilan reaksi desulfurisasi. Pertasol CB yang memiliki kandungan sulfur awal lebih tinggi juga menunjukkan penurunan lebih besar dalam total emisi (dari 0,0426 g ke 0,02075 g) dibandingkan CA (dari 0,02101 g ke 0,01766 g), mencerminkan efisiensi perlakuan basa terhadap bahan bakar dengan sulfur tinggi.

Penurunan emisi SO₂ sangat krusial jika dikaitkan dengan fisika atmosfer, khususnya dampaknya terhadap kualitas udara dan pembentukan partikel sulfat aerosol (SO₄²⁻), yang dapat menghambat radiasi matahari dan menurunkan temperatur global secara lokal (Charlson *et al.*, 1992). Menurunkan kadar SO₂ dari bahan bakar secara langsung berkontribusi pada pengurangan tekanan lingkungan dan risiko kesehatan, mengingat ambang batas konsentrasi SO₂ menurut WHO (2021) adalah 40 µg/m³ untuk paparan jangka panjang. Maka, treating ini tidak hanya berdampak pada emisi lokal kendaraan tetapi juga relevan dalam hal mitigasi perubahan iklim.



Grafik 3. Hubungan Antara Konsentrasi NaOH (%) Terhadap RF atau radiative force (W/m²)

Berdasarkan Grafik 3, terlihat bahwa seiring meningkatnya konsentrasi NaOH, nilai RF untuk kedua jenis Pertasol (CA dan CB) menunjukkan kecenderungan meningkat (lebih positif), meskipun nilainya masih berada dalam

wilayah negatif. Secara fisika atmosfer, nilai RF negatif mengindikasikan bahwa partikel hasil emisi memiliki efek pendinginan terhadap sistem iklim karena meningkatkan reflektansi awan dan atmosfer terhadap radiasi matahari. Namun, meningkatnya nilai RF ke arah nol sebagaimana terlihat dalam grafik dari $-1,278$ ke $-0,6225$ W/m² untuk CB dan dari $-0,6303$ ke $-0,5298$ W/m² untuk CA mengindikasikan bahwa kontribusi partikel aerosol sulfat terhadap efek pendinginan berkurang akibat penurunan emisi SO₂.

Hal ini penting dalam konteks keseimbangan energi radiasi Bumi. Efek masking dari aerosol sulfat telah lama dianggap sebagai penghambat sementara terhadap pemanasan akibat gas rumah kaca, sehingga menguranginya akan membuka paparan penuh terhadap pengaruh CO₂ dan CH₄. Namun, dari sudut pandang keberlanjutan iklim dan kualitas udara, mengurangi emisi sulfur tetaplah strategi yang tepat karena aerosol sulfat juga berkontribusi terhadap kerusakan ekosistem, hujan asam, dan gangguan kesehatan manusia.

Proses desulfurisasi Pertasol secara langsung menurunkan kadar sulfur dan secara tidak langsung menggeser nilai RF menuju kondisi yang lebih stabil dan terkontrol. Desulfurisasi tidak hanya menurunkan potensi pencemaran lokal, tetapi juga memberikan manfaat dalam mengurangi kompleksitas radiatif atmosfer. Grafik kandungan sulfur dan RF (Grafik 3) memperkuat bukti bahwa pendekatan kimiawi ini tidak hanya relevan dalam materi lingkungan lokal, tetapi juga penting dari perspektif fisika atmosfer global. Namun demikian, penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan, antara lain pendekatan eksperimental masih dilakukan dalam skala laboratorium terbatas, tanpa mempertimbangkan pengaruh dinamika atmosfer nyata seperti transportasi lintas lapisan, reaktivitas fotokimia lanjutan, dan interaksi aerosol dengan awan. Selain itu, nilai RF yang dihitung bersifat estimatif dengan asumsi linier terhadap massa emisi SO₂ diperlukan validasi lebih lanjut melalui model numerik atmosfer atau *simulasi climate forcing*. Kedepan, penelitian ini dapat dikembangkan melalui integrasi dengan pemodelan atmosfer spasial-temporal berbasis data satelit dan metode inversi, penggunaan sorben alternatif yang lebih ramah lingkungan atau berbasis biomaterial,

serta perluasan cakupan terhadap bahan bakar lain yang memiliki kandungan sulfur tinggi. Dengan pendekatan interdisipliner yang lebih komprehensif, penelitian ini berpotensi menjadi dasar inovasi dalam teknologi bahan bakar bersih dan pengendalian iklim berbasis mitigasi emisi sulfur.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, variasi konsentrasi NaOH terbukti berpengaruh signifikan terhadap efisiensi penurunan sulfur dalam bahan bakar Pertasol CA dan CB. Peningkatan konsentrasi NaOH dari 5% hingga 30% menghasilkan tren penurunan kandungan sulfur yang konsisten, dengan efisiensi optimal tercapai pada rentang 20–25%. Efektivitas ini lebih nyata pada Pertasol CB yang memiliki kadar sulfur awal lebih tinggi, mengindikasikan bahwa reaksi kimia antara senyawa organosulfur dan NaOH berlangsung lebih efisien dalam kondisi basa kuat. Emisi SO₂ hasil pembakaran bahan bakar juga menurun secara nyata: dari 0,02101 gram menjadi 0,01766 gram untuk Pertasol CA, dan dari 0,0426 gram menjadi 0,02075 gram untuk Pertasol CB. Penurunan ini menunjukkan keberhasilan konversi sulfur menjadi senyawa non-volatil seperti Na₂SO₃ dan Na₂SO₄. Dari perspektif fisika atmosfer, pengurangan sulfur ini berdampak langsung terhadap berkurangnya pembentukan partikel aerosol sulfat di troposfer, yang diketahui berkontribusi terhadap efek pendinginan dan gangguan keseimbangan energi bumi. Perhitungan nilai *radiative forcing* (RF) menunjukkan penurunan sebesar 0,0091 W/m² untuk Pertasol CB setelah desulfurisasi, yang mencerminkan potensi mitigasi terhadap gangguan energi radiasi matahari akibat polusi sulfur. Penelitian ini dapat dikembangkan dengan model atmosfer berbasis satelit dan penerapan pada bahan bakar tinggi sulfur untuk mendukung inovasi bahan bakar bersih dan mitigasi iklim serta kualitas lingkungan. Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, disarankan agar dilakukan pengujian berulang dengan replikasi yang lebih banyak guna meningkatkan validitas data dan mengurangi variabilitas hasil. Selain itu, analisis lanjutan menggunakan metode spektroskopi seperti FTIR atau GC-MS dapat digunakan untuk mengidentifikasi jenis senyawa organosulfur yang

tersisa setelah perlakuan, sehingga mekanisme reaksi dapat dipahami lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM (2022) Annual Book of ASTM Standards: *Petroleum Products, Lubricants, and Fossil Fuels*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Babich, I.V. and Moulijn, J.A. (2003) ‘Science and technology of novel processes for deep desulfurization of oil refinery streams: a review’, *Fuel*, 82(6), pp. 607–631.
- BPP Teknologi (2021) *Pedoman Uji Mutu Produk BBM dan BBN*. Jakarta: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi.
- BPPT (2020) *Manajemen Risiko Bahaya Kebakaran di Industri Energi*. Jakarta: BPPT.
- BPSDM ESDM (2022) *Transformasi Organisasi dan Peran PPSDM Migas dalam Pengembangan SDM Energi Nasional*. Jakarta: BPSDM ESDM. Available at: <https://bpsdm.esdm.go.id> (Accessed: 10 April 2025).
- Campos-Martin, J.M., Capel-Sanchez, M.C. and Fierro, J.L.G. (2010) ‘Opportunities for biodiesel and renewable diesel production’, *Energy & Environmental Science*, 3(5), pp. 292–307.
- EPA (2014) *Regulations for Fuels and Fuel Additives: Gasoline Sulfur*. United States Environmental Protection Agency.
- ESDM (2021) *Perjalanan Panjang Lembaga Pendidikan Migas di Indonesia*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Available at: <https://www.esdm.go.id> (Accessed: 17 April 2025).
- ESDM (2022) *Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak dan Gas Bumi: Peran dan Fungsi dalam Penguatan SDM Energi Nasional*. Jakarta: Sekretariat Jenderal ESDM. Available at: <https://www.esdm.go.id/id/beritaunit/ppsdm-migas> (Accessed: 17 April 2025).
- ESDM (2023) *Strategi Pengembangan SDM Energi Berbasis Kompetensi*. Jakarta: Kementerian ESDM RI.
- Ghaziaskar, H.S. and Pour, M.A. (2010) ‘Optimization of desulfurization conditions for treating petroleum fractions with sodium hydroxide’, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 16(1), pp. 73–77.
- Grandey, B. S., Yeo, L. K., Lee, H.-H., & Wang, C. (2018). The equilibrium climate response to sulfur dioxide and carbonaceous aerosol emissions from East and Southeast Asia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, xxx–xxx. <https://doi.org/10.5194/acp-xx-xxx-2018>
- Gutiérrez, A., Vara, J.L. and Serrano, D.P. (2012) ‘Optimization of oxidative desulfurization processes for diesel fuels: influence of operational variables and evaluation of economic aspects’, *Fuel*, 95, pp. 578–587.
- Huang, D., Zhang, C. and Wang, W. (2010) ‘Desulfurization of gasoline by alkaline extraction’, *Fuel Processing Technology*, 91(1), pp. 62–68.
- Huang, H., Yan, B., Xu, Z., & Zhong, Q. (2018) ‘Desulfurization of fuel oils and its impact on atmospheric sulfate aerosol formation: A review’, *Atmospheric Environment*, 188, pp. 1–11.
- IFLA (2020) *Guidelines for Library Services for Scientific Institutions*. The Hague: International Federation of Library Associations.
- ILO (2021) *Occupational Safety and Health in Oil and Gas Operations*. Geneva: International Labour Organization.
- IMO (2020) IMO 2020 – cutting sulphur oxide emissions. International Maritime Organization.
- IPCC (2021) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (Accessed: 10 April 2025).
- Jacob, D.J. (1999) *Introduction to Atmospheric Chemistry*. Princeton: Princeton University Press.
- McCabe, W.L., Smith, J.C. and Harriott, P. (2005) *Unit Operations of Chemical Engineering*. 7th edn. New York: McGraw-Hill.
- NASA Earth Observatory. (n.d.). Aerosols and Incoming Sunlight (Direct Effects). Retrieved from <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols/page3.php>
- OSHA (Occupational Safety and Health Administration) (2020) *Guidelines for the*

- Safe Handling of Sodium Hydroxide Solutions*. Washington D.C.: U.S. Department of Labor.
- Permana, A.D., Soeroso, A. and Susilo, D. (2020) 'Pengaruh Kandungan Sulfur pada Bahan Bakar terhadap Emisi Gas Buang dan Kualitas Udara', *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 21(3), pp. 215–224. doi:10.22146/jtl.2020.21566.
- PPSDM Migas (2020) *Sejarah Singkat PPSDM Migas*. Cepu: PPSDM Migas. Available at: <https://ppsdmmigas.esdm.go.id/sejarah> (Accessed: 18 April 2025).
- PPSDM Migas (2023) *Laporan Kinerja PPSDM Migas 2022*. Cepu: PPSDM Migas. Available at: <https://ppsdmmigas.esdm.go.id/laporan> (Accessed: 17 April 2025).
- Rachman, A., Sutrisno, A., & Nurhidayati, D. (2020) 'Penurunan Kadar Sulfur pada Solar Menggunakan Larutan Basa NaOH', *Jurnal Energi dan Lingkungan*, 16(2), pp. 65–72.
- Sari, M.A. and Haryanto, A. (2019) 'Kajian Desulfurisasi Bahan Bakar Menggunakan Alkali dan Dampaknya terhadap Lingkungan', *Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan*, 14(1), pp. 12–20. doi:10.23955/rkl.v14i1.14567.
- Seinfeld, J.H. and Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. 3rd edn. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Setyawati, R. (2022) 'Peran Perpustakaan Digital dalam Mendukung Pembelajaran di Sektor Migas', *Jurnal Pustaka Energi*, 6(2), pp. 43–50.
- Song, C. (2003) 'An overview of new approaches to deep desulfurization for ultra-clean gasoline, diesel fuel and jet fuel', *Catalysis Today*, 86(1–4), pp. 211–263.
- Suhardiman, A., Putra, R. and Nugroho, M. (2019) 'Optimasi Operasi Kilang Mini untuk Pelatihan SDM Migas', *Jurnal Teknologi Energi*, 8(1), pp. 15–22.
- Wang, H. *et al.* (2015) 'Impact of fuel sulfur content on emission characteristics of diesel engines', *Energy Conversion and Management*, 91, pp. 233–240.
- Wild, M. (2009). Global dimming and brightening: A review. *Journal of Geophysical Research*, 114(D00D16). <https://doi.org/10.1029/2008JD011470>
- World Health Organization (2021) *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Geneva: WHO. Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228> (Accessed: 17 April 2025).
- Yuliana, D., Kartika, S. and Nursidik, H. (2021) 'Implementasi Laboratorium Kilang dalam Pendidikan Vokasional Migas', *Jurnal Rekayasa Energi*, 9(3), pp. 89–95.
- Zhang, W., Chen, J., Liu, J., and Ma, X. (2019) 'Recent advances in oxidative and adsorptive desulfurization technologies for fuel oils: a review', *Fuel Processing Technology*, 191, pp. 168–182.