



JITS

Jurnal Ilmiah Teknik dan Sains

E-ISSN: 3025-8871 | <https://jurnal.akipba.ac.id/index.php/JITS>

Tinjauan Sistematis Metode Desulfurisasi Batubara : Pendekatan Biologis, Kimia, Fisika, dan Hybrid

(*Systematic Review of Coal Desulfurization Methods : Biological, Chemical, Physical, and Hybrid Approaches*)

Pempieno Rizka Nourishma¹

Universitas Pembangunan “Veteran” Yogyakarta

pempi_rn@yahoo.co.id

Penulis Korespondensi: Pempieno Rizka Nourishma | **Email:** pempi_rn@yahoo.co.id

Diterima (*Received*): 29/07/2026 Direvisi (*Revised*): 07/08/2026 Diterima untuk Publikasi (*Accepted*): 09/08/2026

ABSTRAK

Kandungan sulfur pada batubara merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi kualitas batubara serta menjadi sumber emisi sulfur dioksida (SO_2) yang berkontribusi terhadap pencemaran udara dan hujan asam. Berbagai teknologi desulfurisasi telah dikembangkan melalui pendekatan fisika, kimia, biologis, dan *hybrid*, namun kajian yang membandingkan kinerja, mekanisme, keterbatasan, serta prospek pengembangannya secara *komprehensif* masih terbatas. Penelitian ini bertujuan menyusun tinjauan sistematis terhadap perkembangan teknologi desulfurisasi batubara berdasarkan 36 artikel ilmiah internasional yang telah melalui proses peer review. Kajian dilakukan dengan menganalisis jenis batubara, bentuk sulfur, mekanisme desulfurisasi, kondisi operasi, teknik karakterisasi, efisiensi penghilangan sulfur, serta aspek keberlanjutan teknologi. Hasil kajian menunjukkan bahwa metode fisika efektif dalam menghilangkan sulfur anorganik, sedangkan metode kimia memberikan efisiensi desulfurisasi yang lebih tinggi melalui mekanisme oksidasi selektif, namun memerlukan konsumsi reagen yang lebih besar. Metode biologis menawarkan proses yang lebih ramah lingkungan dan selektif terhadap sulfur organik, meskipun masih terkendala laju reaksi dan penerapan pada skala industri. Sementara itu, metode *hybrid* menunjukkan potensi terbaik karena mampu mengintegrasikan keunggulan berbagai pendekatan sehingga meningkatkan efisiensi desulfurisasi sekaligus mempertahankan kualitas batubara. Kajian ini menegaskan bahwa integrasi metode *hybrid*, didukung teknik karakterisasi modern dan evaluasi keberlanjutan, merupakan arah yang paling prospektif dalam pengembangan teknologi clean coal di masa mendatang.

Kata Kunci: desulfurisasi batubara, metode biologis, metode kimia, metode fisika, metode *hybrid*

ABSTRACT

Sulfur in coal is a major factor affecting coal quality and a primary source of sulfur dioxide (SO_2) emissions, contributing to air pollution and acid rain. Numerous desulfurization technologies have been developed using physical, chemical, biological, and hybrid approaches; however, a comprehensive comparison of their performance, mechanisms, limitations, and future prospects remains limited. This study presents a systematic review of 35 peer reviewed international journal articles to evaluate recent advances in coal desulfurization technologies. The analysis focuses on coal rank, sulfur forms, desulfurization mechanisms, operating conditions, characterization techniques, sulfur removal efficiency, and sustainability aspects. The results show that physical methods are effective for removing inorganic sulfur, whereas chemical methods provide higher desulfurization efficiency through selective oxidation but require greater reagent consumption. Biological methods offer environmentally friendly and selective organic sulfur removal, although their industrial application is constrained by slow reaction kinetics. Hybrid technologies demonstrate the greatest potential by integrating the advantages of multiple approaches, resulting in improved sulfur removal while maintaining coal quality. This review highlights hybrid desulfurization, supported by advanced characterization techniques and sustainability assessment, as the most promising direction for developing efficient and environmentally sustainable clean coal technologies.

Keywords: Coal desulfurization; biological method; chemical method; physical method; hybrid method.

© Author(s) 2026. This is an open access article under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0).

1. Pendahuluan

Batubara masih menjadi salah satu sumber energi primer yang berperan penting dalam memenuhi kebutuhan energi global maupun nasional. Meskipun berbagai negara mulai mengembangkan energi rendah karbon, batubara masih menjadi komoditas strategis karena ketersediaannya yang melimpah, biaya produksi yang relatif kompetitif, serta kemampuannya dalam memenuhi kebutuhan sektor pembangkit listrik dan industri. Di Indonesia, batubara juga memiliki peranan penting sebagai komoditas ekspor sekaligus penopang ketahanan energi nasional. Berdasarkan Neraca Sumber Daya dan Cadangan Mineral, Batubara dan Panas Bumi Indonesia Tahun 2025, Indonesia memiliki sumber daya dan cadangan batubara yang tersebar di berbagai wilayah, terutama di Sumatera dan Kalimantan, sehingga pengelolaan kualitas batubara menjadi salah satu aspek penting dalam mendukung pemanfaatan sumber daya tersebut secara berkelanjutan. Selain menyajikan data sumber daya dan cadangan, laporan tersebut juga menjadi acuan nasional dalam penyusunan kebijakan pengelolaan mineral dan batubara serta mendukung strategi ketahanan energi nasional.

Di sisi lain, kualitas batubara tidak hanya ditentukan oleh nilai kalor, kadar air, abu, maupun zat terbang, tetapi juga dipengaruhi oleh kandungan sulfur. Sulfur merupakan salah satu pengotor utama dalam batubara yang dapat hadir dalam bentuk sulfur piritik (*pyritic sulfur*), sulfur sulfat (*sulfate sulfur*), maupun sulfur organik (*organic sulfur*). Keberadaan sulfur menyebabkan berbagai permasalahan selama proses pemanfaatan batubara, antara lain peningkatan emisi sulfur dioksida (SO_2), pembentukan hujan asam, korosi peralatan industri, penurunan efisiensi pembakaran, serta meningkatnya biaya pengendalian pencemaran. Oleh karena itu, pengurangan kandungan sulfur sebelum proses pembakaran menjadi salah satu strategi penting dalam mendukung pengembangan teknologi clean coal serta memenuhi tuntutan regulasi lingkungan yang semakin ketat (Tang et al., 2024; Irshad et al., 2024; Cheng et al., 2025).

Berbagai teknologi desulfurisasi batubara telah dikembangkan untuk mengurangi kandungan sulfur dengan karakteristik, mekanisme, dan tingkat efektivitas yang berbeda. Pendekatan fisika umumnya memanfaatkan perbedaan sifat fisik mineral pengotor, seperti flotasi, pemisahan berdasarkan densitas, maupun pemisahan menggunakan media udara berdenyut (*pulsating circulating airflow*), sehingga lebih efektif dalam menghilangkan sulfur anorganik terutama sulfur piritik (Yue et al., 2025). Pendekatan kimia menggunakan proses oksidasi, pelarutan selektif, maupun sistem berbasis *ionic liquid*, *deep eutectic solvent*, dan oksidator seperti hidrogen peroksida untuk meningkatkan pelepasan sulfur, termasuk

sebagian sulfur organik (Ge et al., 2024; Irshad et al., 2024). Sementara itu, pendekatan biologis memanfaatkan aktivitas mikroorganisme, seperti *Acidithiobacillus ferrooxidans*, yang mampu mengoksidasi senyawa sulfur secara lebih ramah lingkungan, meskipun masih menghadapi kendala pada laju reaksi dan penerapan dalam skala industri (Tang et al., 2024). Perkembangan terbaru menunjukkan bahwa pendekatan *hybrid*, yang mengombinasikan dua atau lebih metode, mampu meningkatkan efisiensi desulfurisasi melalui sinergi antar proses, misalnya kombinasi flotasi dengan oksidasi, elektrokimia, maupun gelombang ultrasonik (Cao et al., 2021; Cheng et al., 2025).

Selain berkembangnya metode desulfurisasi, penelitian dalam beberapa tahun terakhir juga menunjukkan peningkatan penggunaan teknik karakterisasi modern untuk menjelaskan mekanisme transformasi sulfur selama proses desulfurisasi. Teknik seperti *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *X ray Diffraction* (XRD), *X ray Photoelectron Spectroscopy* (XPS), *X ray Absorption Near Edge Structure* (XANES), dan *Gas Chromatography Mass Spectrometry* (GC MS) telah banyak dimanfaatkan untuk mengevaluasi perubahan struktur batubara, bentuk sulfur, distribusi mineral, serta efektivitas berbagai metode desulfurisasi. Penggunaan berbagai teknik karakterisasi tersebut tidak hanya meningkatkan pemahaman terhadap mekanisme reaksi, tetapi juga menjadi dasar dalam pengembangan teknologi desulfurisasi yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Meskipun jumlah publikasi mengenai desulfurisasi batubara terus meningkat, sebagian besar penelitian masih berfokus pada satu pendekatan tertentu tanpa membandingkan secara sistematis efektivitas metode fisika, kimia, biologis, dan *hybrid* berdasarkan mekanisme reaksi, kondisi operasi, teknik karakterisasi, efisiensi penghilangan sulfur, serta aspek keberlanjutannya. Selain itu, perkembangan teknologi *hybrid* yang semakin banyak dilaporkan dalam beberapa tahun terakhir belum banyak disintesis secara komprehensif sehingga hubungan antara berbagai pendekatan desulfurisasi, kelebihan, keterbatasan, dan peluang pengembangannya masih belum tergambarkan secara utuh. Kondisi tersebut menunjukkan adanya kebutuhan terhadap suatu tinjauan sistematis yang mampu mengintegrasikan hasil-hasil penelitian terdahulu sebagai dasar pengembangan teknologi desulfurisasi batubara yang lebih efektif dan berkelanjutan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan menyusun tinjauan sistematis mengenai metode desulfurisasi batubara melalui pendekatan biologis, kimia, fisika, dan *hybrid* dengan menganalisis mekanisme desulfurisasi, jenis sulfur yang dapat dihilangkan, kondisi operasi, teknik karakterisasi, efisiensi proses, kelebihan, keterbatasan, serta arah pengembangan teknologi pada

masa mendatang. Hasil kajian ini diharapkan dapat memberikan sintesis ilmiah yang komprehensif sebagai referensi bagi peneliti, akademisi, dan praktisi dalam pengembangan teknologi clean coal yang lebih efektif, efisien, dan berkelanjutan.

2. Data dan Metodologi

2.1. Data dan Lokasi

Penelitian ini merupakan penelitian kepustakaan (*desk study*) yang menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review (SLR)* sehingga tidak melibatkan pengambilan data lapangan maupun eksperimen laboratorium. Data yang digunakan terdiri atas data utama dan data pendukung. Data utama berupa 36 artikel ilmiah internasional yang membahas metode desulfurisasi batubara melalui pendekatan biologis, kimia, fisika, dan *hybrid*. Seluruh artikel dipilih berdasarkan proses seleksi sistematis sesuai *pedoman Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta Analyses (PRISMA)* 2020.

Data pendukung berupa Neraca Sumber Daya dan Cadangan Mineral, Batubara dan Panas Bumi Indonesia Tahun 2025 yang diterbitkan oleh Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). Dokumen tersebut digunakan sebagai sumber data resmi untuk memberikan gambaran mengenai kondisi sumber daya dan cadangan batubara Indonesia serta memperkuat konteks nasional dalam pembahasan penelitian.

Pencarian literatur dilakukan secara sistematis melalui beberapa basis data ilmiah yang relevan dengan bidang teknik pertambangan dan pengolahan batubara, yaitu *ScienceDirect (Elsevier)*, *SpringerLink (Springer Nature)*, MDPI, PubMed, dan Google Scholar. Google Scholar digunakan sebagai mesin pencari pelengkap untuk memastikan tidak terdapat artikel relevan yang terlewat. Artikel yang dianalisis dibatasi pada publikasi tahun 2015 – 2025 untuk menjamin kebaruan (*state-of-the-art*) dan relevansi penelitian.

2.2. Metodologi

2.2.1. Design Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review (SLR)* dengan mengacu pada pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta Analyses (PRISMA)* 2020. Pendekatan ini dipilih untuk memastikan proses identifikasi, seleksi, evaluasi, ekstraksi data, dan sintesis literatur dilakukan secara sistematis, transparan, serta dapat direplikasi.

Perumusan pertanyaan penelitian menggunakan kerangka PICOS (*Population, Intervention, Comparison, Outcome, dan Study Design*) sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Berdasarkan kerangka PICOS tersebut, pertanyaan penelitian dirumuskan sebagai berikut :

- Metode desulfurisasi batubara apa saja yang telah dikembangkan dan diteliti ?
- Bagaimana efektivitas masing-masing metode dalam menghilangkan sulfur dari batubara ?
- Apa kelebihan, keterbatasan, serta peluang pengembangan setiap metode berdasarkan bukti empiris ?

Tabel 1. Kerangka PICOS Penelitian

Komponen	Deskripsi
Population (P)	Batubara yang mengandung sulfur sebagai objek penelitian.
Intervention (I)	Metode desulfurisasi batubara melalui pendekatan biologis, kimia, fisika, dan <i>hybrid</i> .
Comparison (C)	Perbandingan efektivitas, mekanisme, kondisi operasi, dan teknik karakterisasi masing-masing metode.
Outcome (O)	Efisiensi penghilangan sulfur, perubahan karakteristik batubara, serta kelebihan dan keterbatasan setiap metode.
Study Design (S)	Artikel penelitian (<i>original research</i>) dan artikel tinjauan (<i>review article</i>) yang telah melalui proses <i>peer review</i> .

2.2.2. Strategi Pencarian Literatur

Strategi pencarian literatur dilakukan secara sistematis menggunakan kombinasi kata kunci (*keywords*) dan operator Boolean (*AND, OR, dan NOT*) pada setiap basis data ilmiah. Kata kunci utama yang digunakan meliputi *coal desulfurization, biodesulfurization, chemical desulfurization, physical desulfurization, hybrid desulfurization, coal cleaning, sulfur removal, Acidithiobacillus ferrooxidans, deep eutectic solvent, ionic liquid*, dan berbagai kombinasi istilah yang relevan sehingga menghasilkan 19 kueri pencarian. Seluruh artikel yang diperoleh kemudian diseleksi berdasarkan judul, abstrak, dan isi artikel sesuai dengan kriteria yang telah ditetapkan.

2.2.3. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria seleksi ditetapkan untuk memastikan bahwa seluruh artikel yang dianalisis memiliki kualitas ilmiah dan relevansi yang tinggi terhadap tujuan penelitian. Kriteria inklusi dan eksklusi disajikan pada Tabel 2.

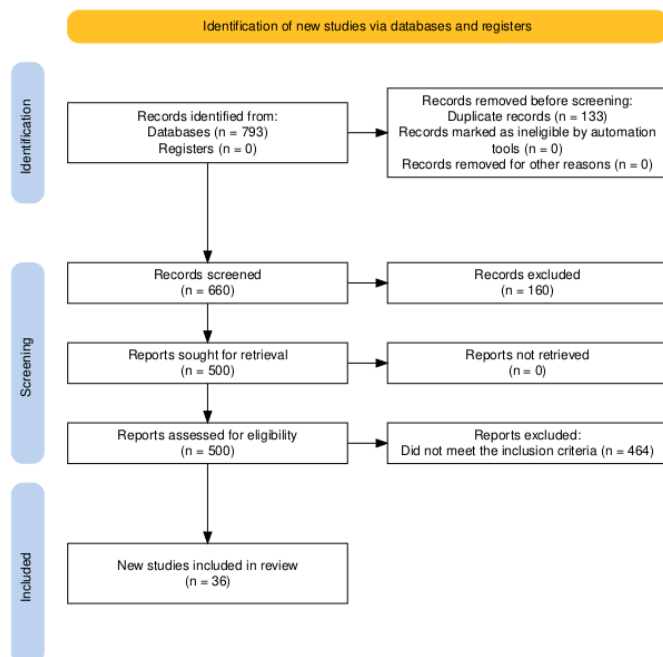
Tabel 2. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Artikel membahas metode desulfurisasi batubara melalui pendekatan biologis, kimia, fisika, atau <i>hybrid</i> .	Artikel yang membahas <i>flue gas desulfurization</i> (FGD) atau desulfurisasi gas buang.
Artikel penelitian atau tinjauan yang telah melalui proses <i>peer review</i> .	Artikel tanpa <i>peer review</i> , editorial, opini, atau proses <i>peer review</i> .

Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Menyajikan data mengenai efisiensi penghilangan sulfur atau mekanisme desulfurisasi.	abstrak konferensi tanpa naskah lengkap. Artikel yang tidak menyajikan data sesuai tujuan penelitian.
Dipublikasikan pada periode 2015–2025 dalam Bahasa Indonesia atau Bahasa Inggris.	Artikel di luar periode publikasi atau menggunakan bahasa selain Indonesia dan Inggris.

2.2.4. Proses Seleksi Literatur

Proses seleksi artikel dilakukan mengikuti pedoman PRISMA 2020. Tahap identifikasi menghasilkan 793 rekaman dari lima basis data ilmiah. Setelah proses deduplikasi diperoleh 660 rekaman. Selanjutnya dilakukan proses penyaringan berdasarkan judul dan abstrak sehingga tersisa 500 artikel untuk dilakukan evaluasi terhadap teks lengkap (*full text assessment*). Berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi, sebanyak 464 artikel dikeluarkan karena tidak memenuhi kriteria penelitian, sehingga diperoleh 36 artikel yang digunakan sebagai dasar sintesis dalam *systematic literature review*. Alur lengkap proses seleksi disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir PRISMA 2020

2.2.5. Ekstraksi Data dan Sintesis

Artikel yang memenuhi kriteria inklusi kemudian diekstraksi menggunakan formulir ekstraksi data (*data extraction form*) yang dikembangkan untuk penelitian ini.

Informasi yang dikumpulkan meliputi identitas artikel, jenis batubara, bentuk sulfur, metode desulfurisasi, kondisi operasi, teknik karakterisasi, efisiensi penghilangan sulfur, kelebihan, keterbatasan, *research gap*, serta rekomendasi penelitian selanjutnya.

Seluruh data kemudian dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif-kualitatif dengan mengelompokkan artikel ke dalam empat kategori utama, yaitu metode biologis, kimia, fisika, dan *hybrid*. Analisis dilakukan secara komparatif untuk mengevaluasi mekanisme desulfurisasi, efektivitas penghilangan sulfur, perubahan karakteristik batubara, teknik karakterisasi yang digunakan, serta peluang pengembangan teknologi desulfurisasi batubara yang lebih efektif, efisien, dan berkelanjutan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakteristik Umum Literatur yang Dianalisis

Sebanyak 36 artikel ilmiah memenuhi kriteria inklusi dan digunakan sebagai dasar sintesis dalam penelitian ini setelah melalui proses seleksi sesuai pedoman PRISMA 2020. Artikel-artikel tersebut dipublikasikan pada periode 2015 – 2025 dan berasal dari jurnal internasional bereputasi yang diterbitkan oleh Elsevier, Springer Nature, MDPI, Frontiers, dan penerbit ilmiah lainnya. Ringkasan karakteristik umum literatur yang dianalisis disajikan pada Tabel 3. Secara umum, publikasi pada periode tersebut menunjukkan peningkatan perhatian terhadap pengembangan teknologi desulfurisasi batubara sebagai bagian dari upaya meningkatkan kualitas batubara sekaligus menurunkan dampak lingkungan akibat emisi sulfur.

Berdasarkan hasil sintesis, penelitian mengenai pendekatan biologis didominasi oleh pemanfaatan mikroorganisme pengoksidasi sulfur, khususnya *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Penelitian oleh Tang et al. (2024) menunjukkan bahwa proses *microbial desulfurization* efektif menghilangkan sulfur piritik melalui mekanisme biooksidasi dengan dampak lingkungan yang relatif rendah. Hasil tersebut didukung oleh Ai et al. (2022) yang mengoptimalkan proses biodesulfurisasi menggunakan *response surface methodology* dan menunjukkan bahwa temperatur, ukuran partikel, serta waktu kontak merupakan faktor penting yang memengaruhi efisiensi penghilangan sulfur. Selain itu, penelitian mengenai pemanfaatan *T. ferrooxidans*, *Escherichia coli*, dan *Pseudomonas putida* juga menunjukkan bahwa pendekatan biologis memiliki prospek yang baik sebagai teknologi ramah lingkungan, meskipun masih menghadapi tantangan berupa laju reaksi yang relatif lambat dan keterbatasan penerapan pada skala industri.

Pada pendekatan kimia, penelitian lebih banyak diarahkan pada pengembangan reagen oksidatif dan

pelarut selektif untuk meningkatkan pelepasan sulfur, khususnya sulfur organik yang sulit dipisahkan secara fisik. Ge et al. (2024) menunjukkan bahwa kombinasi *ionic liquid* dengan hidrogen peroksida mampu meningkatkan efisiensi desulfurisasi sekaligus memberikan informasi mengenai perubahan struktur batubara melalui karakterisasi FTIR, SEM, dan XPS. Sementara itu, Yang et al. (2024) mengembangkan metode berbasis gelombang mikro (*microwave assisted oxidation*) menggunakan *urea peroxide* yang mampu mempercepat proses oksidasi sulfur. Berbeda dengan metode biologis, pendekatan kimia umumnya menghasilkan efisiensi penghilangan sulfur yang lebih tinggi, namun memerlukan konsumsi reagen, energi, dan biaya operasi yang relatif lebih besar.

Tabel 3. Karakteristik Umum Literatur yang Dianalisis

Karakteristik	Hasil Sintesis	Implikasi terhadap Penelitian
Jumlah Artikel yang Dianalisis	36 artikel ilmiah	Menunjukkan cakupan literatur yang memadai untuk melakukan sintesis sistematis mengenai metode desulfurisasi batubara.
Rentang Tahun Publikasi	2015 – 2025	Menggambarkan perkembangan teknologi desulfurisasi batubara selama satu dekade terakhir serta memastikan kebaruan informasi yang dianalisis.
Jenis Publikasi	<i>Original Research</i> dan <i>Review Article</i> (peer reviewed)	Seluruh artikel memiliki kualitas ilmiah yang telah melalui proses penelaahan sejawat (<i>peer review</i>).
Basis Data Literatur	ScienceDirect (Elsevier), SpringerLink (Springer Nature), MDPI, PubMed, dan Google Scholar	Menjamin cakupan literatur berasal dari basis data ilmiah bereputasi dan relevan dengan bidang teknik pertambangan serta pengolahan batubara.
Pendekatan Desulfurisasi yang Dikaji	Biologis, Kimia, Fisika, dan <i>Hybrid</i>	Menunjukkan bahwa penelitian mencakup seluruh pendekatan utama dalam teknologi desulfurisasi batubara sehingga memungkinkan analisis komparatif secara menyeluruh.
Jenis Sulfur yang Menjadi Fokus Penelitian	Sulfur piritik (<i>pyritic sulfur</i>), sulfur organik (<i>organic sulfur</i>), dan	Menunjukkan bahwa setiap metode memiliki kemampuan yang berbeda dalam menghilangkan

Karakteristik	Hasil Sintesis	Implikasi terhadap Penelitian
Teknik Karakterisasi yang Digunakan	sulfur sulfat (<i>sulfate sulfur</i>) SEM, FTIR, XRD, XPS, XANES, GC-MS, Proximate Analysis, Ultimate Analysis	masing-masing bentuk sulfur. Digunakan untuk mengevaluasi perubahan morfologi, struktur kimia, komposisi mineral, serta transformasi sulfur selama proses desulfurisasi.
Parameter Utama Dianalisis	Efisiensi penghilangan sulfur, perubahan karakteristik batubara, operasi, kelebihan keterbatasan metode	Menjadi dasar dalam melakukan sintesis komparatif terhadap efisiensi masing-masing pendekatan desulfurisasi.
Dokumen Pendukung	Neraca Sumber Daya dan Cadangan Mineral, Batubara dan Panas Bumi Indonesia Tahun 2025	Digunakan untuk memperkuat konteks nasional mengenai potensi sumber daya batubara Indonesia.
Metode Sintesis	Analisis deskriptif kualitatif berdasarkan PRISMA 2020	Menghasilkan sintesis yang sistematis, transparan, dan dapat direplikasi.

Perkembangan pendekatan fisika dan *hybrid* menunjukkan kecenderungan yang semakin kuat dalam beberapa tahun terakhir. Penelitian oleh Ahmad et al. (2024) menunjukkan bahwa kombinasi oksidasi awal dengan *froth flotation* mampu meningkatkan pemisahan mineral pembawa sulfur dibandingkan flotasi konvensional. Selanjutnya, Cheng et al. (2023) menunjukkan bahwa integrasi proses flotasi dan oksidasi menghasilkan efisiensi desulfurisasi yang lebih tinggi dibandingkan penggunaan metode tunggal. Hasil sintesis dari keseluruhan literatur juga memperlihatkan bahwa hampir seluruh penelitian modern memanfaatkan teknik karakterisasi seperti SEM, FTIR, XRD, XPS, XANES, dan GC MS untuk mengevaluasi perubahan struktur batubara dan mekanisme transformasi sulfur selama proses desulfurisasi. Temuan tersebut mengindikasikan adanya pergeseran arah penelitian dari pengembangan metode tunggal menuju pendekatan *hybrid* yang tidak hanya berorientasi pada peningkatan efisiensi penghilangan sulfur, tetapi juga mempertimbangkan aspek keberlanjutan, konsumsi energi, kualitas batubara, dan potensi implementasi pada skala industri.

3.2 Analisis Metode Desulfurisasi Batubara

Subbab ini membahas hasil sintesis terhadap empat pendekatan utama yang ditemukan pada 36 artikel, yaitu biologis, kimia, fisika, dan *hybrid*. Analisis dilakukan dengan membandingkan mekanisme desulfurisasi, jenis sulfur yang dapat dihilangkan, kondisi operasi, teknik karakterisasi, efisiensi proses, serta kelebihan dan keterbatasan masing-masing pendekatan.

3.2.1 Pendekatan Biologis

Hasil sintesis menunjukkan bahwa pendekatan biologis merupakan salah satu metode yang paling ramah lingkungan karena memanfaatkan aktivitas mikroorganisme untuk mengoksidasi senyawa sulfur tanpa memerlukan reagen kimia dalam jumlah besar. Sebagian besar penelitian menggunakan bakteri *Acidithiobacillus ferrooxidans* sebagai agen utama karena memiliki kemampuan mengoksidasi mineral pirit (FeS_2) menjadi senyawa sulfat yang lebih mudah dipisahkan dari matriks batubara. Selain *A. ferrooxidans*, beberapa penelitian juga memanfaatkan *Pseudomonas putida*, *Escherichia coli*, dan mikroorganisme lain yang memiliki kemampuan metabolisme sulfur.

Penelitian Tang et al. (2024) menunjukkan bahwa keberhasilan proses biodesulfurisasi sangat dipengaruhi oleh bentuk sulfur dalam batubara, ukuran partikel, temperatur, pH, serta waktu kontak antara mikroorganisme dan permukaan batubara. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa sulfur piritik lebih mudah dioksidasi dibandingkan sulfur organik sehingga efisiensi proses sangat bergantung pada karakteristik batubara yang digunakan. Hasil tersebut diperkuat oleh Ai et al. (2022) yang mengoptimalkan kondisi operasi menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) dan menunjukkan bahwa kombinasi temperatur, ukuran partikel, serta waktu proses mampu meningkatkan efisiensi penghilangan sulfur secara signifikan.

Berdasarkan hasil sintesis literatur, pendekatan biologis memiliki beberapa keunggulan, antara lain konsumsi energi yang relatif rendah, tidak menghasilkan limbah kimia berbahaya, serta lebih sesuai dengan konsep *green technology*. Namun demikian, hampir seluruh penelitian juga melaporkan keterbatasan berupa laju reaksi yang lambat, sensitivitas mikroorganisme terhadap perubahan kondisi operasi, serta kesulitan penerapan pada skala industri. Oleh karena itu, penelitian terbaru mulai mengembangkan kombinasi metode biologis dengan proses fisika maupun kimia untuk meningkatkan efisiensi desulfurisasi tanpa menghilangkan keunggulan aspek lingkungannya.

3.2.2 Pendekatan Kimia

Pendekatan kimia merupakan metode yang paling banyak dikembangkan dalam literatur karena memiliki

kemampuan menghilangkan sulfur piritik maupun sebagian sulfur organik melalui proses oksidasi selektif. Berbagai penelitian memanfaatkan *hidrogen peroksida* (H_2O_2), asam organik, *deep eutectic solvent* (DES), maupun *ionic liquid* sebagai media reaksi untuk meningkatkan pelepasan sulfur dari struktur batubara.

Ge et al. (2024) melaporkan bahwa sistem berbasis *ionic liquid* H_2O_2 tidak hanya meningkatkan efisiensi penghilangan sulfur, tetapi juga mempertahankan struktur karbon utama batubara. Perubahan struktur tersebut dikonfirmasi melalui karakterisasi menggunakan FTIR, SEM, dan XPS. Di sisi lain, Yang et al. (2024) mengembangkan metode *microwave assisted oxidation* menggunakan *urea peroxide* yang mempercepat reaksi oksidasi sulfur melalui pemanasan volumetrik sehingga waktu proses menjadi lebih singkat dibandingkan metode konvensional.

Secara umum, hasil sintesis menunjukkan bahwa pendekatan kimia mampu menghasilkan efisiensi desulfurisasi yang lebih tinggi dibandingkan pendekatan biologis. Akan tetapi, penggunaan reagen kimia, konsumsi energi, potensi korosi peralatan, serta kebutuhan pengolahan limbah cair masih menjadi tantangan utama dalam implementasinya pada skala industri.

3.2.3 Pendekatan Fisika

Pendekatan fisika memanfaatkan perbedaan sifat fisik antara batubara dan mineral pembawa sulfur, seperti perbedaan densitas, ukuran partikel, maupun sifat permukaan. Metode yang paling banyak ditemukan dalam literatur meliputi *froth flotation*, *gravity separation*, dan pemisahan berbasis aliran udara berdenyut (*pulsating circulating airflow*).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode fisika sangat efektif untuk menghilangkan sulfur piritik yang terdistribusi sebagai mineral bebas, namun kurang efektif terhadap sulfur organik yang telah berikatan dengan struktur karbon batubara. Oleh karena itu, efektivitas metode fisika sangat dipengaruhi oleh karakteristik mineralogi batubara dan derajat liberasi partikel sulfur sebelum proses pemisahan.

3.2.4 Pendekatan Hybrid

Hasil sintesis menunjukkan bahwa penelitian dalam lima tahun terakhir mulai bergeser menuju pendekatan *hybrid*, yaitu kombinasi dua atau lebih metode desulfurisasi untuk memperoleh efisiensi yang lebih tinggi. Kombinasi yang banyak dilaporkan meliputi oksidasi flotasi, biologi, kimia, serta gelombang mikro oksidasi.

Penelitian Ahmad et al. (2024) menunjukkan bahwa kombinasi oksidasi awal dan *froth flotation* mampu meningkatkan pelepasan sulfur dibandingkan flotasi konvensional. Selanjutnya, Cheng et al. (2023) melaporkan bahwa integrasi proses flotasi dengan oksidasi

memberikan efisiensi desulfurisasi yang lebih tinggi sekaligus mempertahankan kualitas batubara.

Secara keseluruhan, pendekatan *hybrid* menawarkan peluang terbaik karena mampu mengombinasikan keunggulan masing-masing metode. Namun demikian, kompleksitas proses, kebutuhan investasi, optimasi kondisi operasi, serta evaluasi *techno-economic* dan *Life Cycle Assessment (LCA)* masih menjadi tantangan yang perlu dikaji lebih lanjut sebelum diterapkan secara luas pada skala industri. Karakteristik perbedaan metode desulfurisasi batubara dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Sintesis Karakteristik Metode Desulfurisasi Batubara Berdasarkan Literatur yang Dianalisis

Parameter	Biologis	Kimia	Fisika	Hybrid
Penulis	Tang et al. (2024); Ai et al. (2022); Yang et al. (2024); Koyunoğlu & Karaca; et al.; Irshad al. (2024); Phengsaart et al.	Cheng et al. (2023); Yang et al. (2024); Liu Yue et al. (2024); Ahmad et al. (2024); Wang et al. (2024)		
Prinsip Metode	Memanfaatkan aktivitas mikroorganisme (<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> , <i>Pseudomonas putida</i> , dan bakteri pengoksidasi sulfur lainnya) untuk mengoksidasi senyawa sulfur menjadi bentuk yang lebih mudah dipisahkan.	Menggunakan oksidator, pelarut kimia (<i>ionic liquid</i> , H_2O_2 , asam organik) atau reagen selektif untuk mengoksidasi dan melarutkan sulfur dari matriks batubara.	Memanfaatkan perbedaan sifat fisik kimia, oksidasi flotas, microwave oksidasi, dll.) untuk meningkatkan efisiensi desulfurisasi.	Menggabungkan dua atau lebih metode (biologi kimia, oksidasi flotas, microwave oksidasi, dll.) untuk meningkatkan efisiensi desulfurisasi.
Jenis Sulfur Yang Ditargetkan	Sulfur piritik, sebagian sulfur organik.	Sulfur piritik dan sulfur organik.	Terutama sulfur piritik.	Sulfur piritik, sulfur organik, dan sulfur sulfat.
Teknik Yang Dipakai	SEM, FTIR, XRD, Analisis Proksimat.	FTIR, XPS, GC-MS.	SEM, SEM, XRD, Analisis Mineralogi.	SEM, FTIR, XRD, XPS, XANES, GC-MS.
Efektivitas Umum	Sedang-tinggi, bergantung pada jenis mikroorganisme	Tinggi, terutama untuk sulfur organik dan	Tinggi untuk sulfur piritik, rendah	Sangat tinggi karena mengombinasikan beberapa

Parameter	Biologis	Kimia	Fisika	Hybrid
Keunggulan Utama	me dan waktu proses.	sulfur piritik.	terhadap sulfur organik.	mekanisme penghilangan sulfur. Menggabungkan keunggulan berbagai metode sehingga menghasilkan efisiensi tertinggi dan lebih fleksibel terhadap karakteristik batubara.
Keterbatasan	Ramah lingkungan, kebutuhan energi rendah, limbah kimia minimal.	Efisiensi tinggi, waktu proses relatif singkat, mampu menghilangkan sulfur organik.	Proses sederhana, mudah dioperasikan, sesuai untuk skala industri.	Proses lebih kompleks, memerlukan optimasi operasi, investasi awal lebih tinggi, dan kajian <i>techno-economic</i> lebih mendalam.
Potensi Implementasi Industri	Reaksi relatif lambat, sensitif terhadap pH, temperatur, dan kondisi kultur mikroorganisme.	Membutuhkan reagen kimia, biaya operasi lebih tinggi, menghasilkan limbah cair yang perlu diolah.	Tidak efektif untuk sulfur organik yang telah terikat dalam struktur batubara.	Diproyeksikan menjadi arah pengembangan teknologi desulfurisasi batubara di masa depan karena memberikan keseimbangan antara efisiensi dan keberlanjutan.

Berdasarkan Tabel 4, hasil sintesis menunjukkan bahwa setiap pendekatan desulfurisasi memiliki karakteristik, keunggulan, dan keterbatasan yang berbeda sehingga pemilihannya harus disesuaikan dengan jenis sulfur, karakteristik batubara, serta tujuan proses pengolahan. Pendekatan biologis lebih menonjol dari aspek keberlanjutan lingkungan, pendekatan kimia memberikan efisiensi penghilangan sulfur yang tinggi, sedangkan pendekatan fisika masih menjadi metode yang paling praktis untuk aplikasi *coal cleaning*. Sementara itu,

pendekatan *hybrid* menunjukkan prospek paling menjanjikan karena mampu mengombinasikan keunggulan beberapa metode sekaligus sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi desulfurisasi tanpa mengurangi kualitas batubara secara signifikan. Hasil sintesis ini mengindikasikan bahwa pengembangan teknologi desulfurisasi di masa mendatang tidak lagi berfokus pada optimalisasi metode tunggal, tetapi mengarah pada integrasi berbagai pendekatan yang lebih efektif, efisien, dan berkelanjutan untuk mendukung pemanfaatan batubara yang lebih bersih

3.3. Sintesis dan Arah Pengembangan Teknologi Desulfurisasi Batubara

Hasil sintesis terhadap 36 artikel menunjukkan bahwa perkembangan teknologi desulfurisasi batubara mengalami perubahan yang signifikan selama satu dekade terakhir. Pada penelitian awal, pengembangan teknologi lebih banyak berfokus pada penggunaan metode tunggal, baik melalui pendekatan biologis, kimia, maupun fisika, dengan tujuan utama meningkatkan efisiensi penghilangan sulfur tertentu. Seiring berkembangnya kebutuhan terhadap teknologi batubara yang lebih bersih (*clean coal technology*) serta semakin ketatnya regulasi lingkungan, arah penelitian bergeser menuju pengembangan proses yang tidak hanya mampu menurunkan kandungan sulfur, tetapi juga mempertahankan kualitas batubara, mengurangi konsumsi energi, serta meminimalkan dampak lingkungan. Pergeseran tersebut terlihat dari semakin banyaknya penelitian yang mengombinasikan beberapa metode desulfurisasi serta memanfaatkan teknik karakterisasi modern untuk memahami mekanisme transformasi sulfur secara lebih komprehensif.

Berdasarkan hasil sintesis pada Tabel 4, masing masing pendekatan memiliki keunggulan yang saling melengkapi. Pendekatan biologis memberikan keuntungan dari aspek keberlanjutan karena memanfaatkan aktivitas mikroorganisme dengan kebutuhan energi yang relatif rendah, namun masih menghadapi keterbatasan pada laju reaksi dan penerapan skala industri. Pendekatan kimia menunjukkan kemampuan yang lebih baik dalam menghilangkan sulfur organik maupun sulfur piritik melalui proses oksidasi selektif, meskipun memerlukan penggunaan *reagen* dan pengelolaan limbah yang lebih intensif. Pendekatan fisika tetap menjadi metode yang paling banyak diterapkan pada proses *coal cleaning* karena sederhana dan mudah diintegrasikan ke dalam fasilitas preparasi batubara, tetapi efektivitasnya sangat bergantung pada derajat liberasi mineral sulfur. Di sisi lain, pendekatan *hybrid* menunjukkan potensi paling besar karena mampu mengombinasikan keunggulan beberapa metode sehingga menghasilkan efisiensi desulfurisasi yang

lebih tinggi dengan tetap mempertahankan kualitas batubara.

Selain perkembangan metode, hasil sintesis juga menunjukkan adanya perubahan dalam pendekatan evaluasi proses desulfurisasi. Penelitian terdahulu umumnya hanya menilai keberhasilan berdasarkan persentase penghilangan sulfur, sedangkan penelitian terbaru mulai mengintegrasikan berbagai teknik karakterisasi seperti SEM, FTIR, XRD, XPS, XANES, dan GC MS untuk mengevaluasi perubahan morfologi, struktur kimia, mineralogi, serta mekanisme transformasi sulfur selama proses berlangsung. Perkembangan ini menunjukkan bahwa keberhasilan desulfurisasi tidak lagi hanya diukur dari besarnya sulfur yang dihilangkan, tetapi juga dari kemampuan mempertahankan nilai kalor, struktur batubara, efisiensi energi, dan dampak lingkungan yang ditimbulkan selama proses pengolahan.

Meskipun demikian, hasil sintesis juga mengidentifikasi beberapa kesenjangan penelitian (*research gap*) yang masih perlu dikembangkan. Sebagian besar penelitian masih dilakukan pada skala laboratorium dengan kondisi operasi yang terkontrol sehingga informasi mengenai implementasi pada skala industri masih terbatas. Selain itu, kajian mengenai analisis tekno ekonomi (*Techno Economic Analysis*), penilaian daur hidup (*Life Cycle Assessment/LCA*), optimasi proses menggunakan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*), serta pengembangan sistem pemantauan proses secara *real time* masih relatif sedikit dibandingkan penelitian yang berfokus pada peningkatan efisiensi desulfurisasi. Kesenjangan ini menunjukkan bahwa pengembangan teknologi desulfurisasi ke depan tidak hanya memerlukan inovasi dalam pemilihan metode, tetapi juga pendekatan multidisiplin yang mengintegrasikan aspek teknik, ekonomi, dan lingkungan.

Berdasarkan keseluruhan hasil sintesis tersebut, diperoleh beberapa temuan utama mengenai perkembangan metode desulfurisasi batubara beserta arah pengembangannya sebagaimana dirangkum pada Tabel 5. Tabel ini menunjukkan bahwa setiap pendekatan memiliki peluang pengembangan yang berbeda sesuai dengan karakteristik, tingkat kematangan teknologi, serta tantangan implementasinya. Selain itu, hasil sintesis juga mengidentifikasi beberapa kesenjangan penelitian (*research gap*) yang masih memerlukan perhatian untuk mendukung penerapan teknologi desulfurisasi pada skala industri.

Tabel 5. Sintesis Hasil Review dan Arah Pengembangan Teknologi Desulfurisasi Batubara

Aspek	Hasil Sintesis	Arah Pengembangan
Pendekatan biologis	Ramah lingkungan, tetapi laju reaksi relatif lambat.	Rekayasa mikroorganisme, optimasi

Aspek	Hasil Sintesis	Arah Pengembangan
Pendekatan kimia	Efisiensi tinggi, terutama terhadap sulfur organik.	kondisi operasi, dan peningkatan skala proses. Pengembangan <i>green solvent</i> , pengurangan konsumsi reagen, dan minimisasi limbah.
Pendekatan fisika	Efektif untuk sulfur mineral dan mudah diterapkan pada industri.	Integrasi dengan metode lain untuk meningkatkan penghilangan sulfur organik.
Pendekatan hybrid	Memberikan efisiensi desulfurisasi paling tinggi dan fleksibel terhadap berbagai karakteristik batubara.	Pengembangan proses terintegrasi, optimasi berbasis AI, serta validasi pada skala pilot dan industri.
Karakterisasi	Penggunaan SEM, FTIR, XRD, XPS, XANES, dan GC-MS semakin meningkat.	Integrasi karakterisasi <i>real-time</i> dan analisis berbasis data untuk memahami mekanisme desulfurisasi secara lebih komprehensif.
Implementasi industri	Masih didominasi penelitian laboratorium.	Kajian <i>Techno Economic Analysis, Life Cycle Assessment (LCA)</i> , dan demonstrasi pada skala industri.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menyusun suatu *Systematic Literature Review (SLR)* yang memberikan pemetaan komprehensif mengenai perkembangan teknologi desulfurisasi batubara berdasarkan sintesis terhadap 36 artikel ilmiah yang dipublikasikan pada periode 2015 – 2025. Melalui proses seleksi yang sistematis dan analisis komparatif, penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan metode desulfurisasi tidak dapat ditentukan berdasarkan satu parameter tunggal, tetapi harus mempertimbangkan karakteristik batubara, bentuk sulfur yang akan dihilangkan, tujuan pengolahan, serta aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan secara terpadu. Dengan demikian, hasil kajian ini memberikan kerangka evaluasi yang lebih menyeluruh dalam menentukan pendekatan desulfurisasi yang sesuai untuk kondisi batubara dan kebutuhan proses yang berbeda.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penyusunan sintesis yang mengintegrasikan berbagai hasil penelitian menjadi suatu kerangka analisis yang mampu menjelaskan hubungan antara mekanisme desulfurisasi, karakteristik metode, teknik karakterisasi, serta potensi penerapannya. Sintesis tersebut tidak hanya memperlihatkan perkembangan penelitian yang telah

dicapai, tetapi juga mengidentifikasi ruang pengembangan yang masih terbuka sehingga dapat menjadi dasar bagi peneliti maupun praktisi dalam merancang penelitian lanjutan dan memilih teknologi yang lebih tepat untuk implementasi di lapangan.

Berdasarkan keseluruhan hasil analisis, tujuan penelitian telah tercapai, yaitu menghasilkan tinjauan sistematis yang mampu menyajikan gambaran ilmiah mengenai perkembangan metode desulfurisasi batubara sekaligus memberikan sintesis yang dapat digunakan sebagai acuan dalam pengembangan teknologi berikutnya. Nilai utama penelitian ini bukan hanya terletak pada pengumpulan dan perbandingan hasil-hasil penelitian terdahulu, tetapi pada penyusunan suatu perspektif yang menghubungkan temuan-temuan tersebut menjadi dasar ilmiah bagi pengembangan teknologi desulfurisasi batubara yang lebih adaptif, aplikatif, dan berorientasi pada keberlanjutan. Oleh karena itu, kajian ini diharapkan dapat menjadi referensi strategis bagi penelitian akademik, pengembangan teknologi, maupun pengambilan keputusan dalam industri pertambangan untuk mendukung peningkatan kualitas batubara serta pengelolaan sumber daya energi yang lebih bertanggung jawab

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta atas dukungan akademik selama pelaksanaan penelitian ini. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada seluruh penulis artikel ilmiah yang menjadi sumber data dalam penelitian ini atas kontribusinya dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknologi desulfurisasi batubara. Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia atas publikasi Neraca Sumber Daya dan Cadangan Mineral, Batubara dan Panas Bumi Indonesia Tahun 2025 yang menjadi salah satu sumber data pendukung dalam penyusunan artikel ini.

6. Referensi

- Ahmad, W., Salman, M., Ahmad, I., & Yaseen, M. (2024). Process for desulfurization and demineralization of low rank coal using oxidation assisted froth floatation technique. *Chemical Engineering Research and Design*, 205, 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2024.03.020>
- Ai, C., Sun, P., Zhao, D., & Mu, X. (2022). Optimization of experimental conditions of *microbial desulfurization* in coal mine using response surface methodology. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1076814>
- Ai, C., Zhang, X., Xue, S., & Sun, P. P. (2025). Optimization and mechanistic investigation of organic sulfur removal

- from bituminous coal by *Pseudomonas putida*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 13(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118437>
- Armandsefat, F., Hamzehzadeh, S., & Azizi, N. (2024). Efficient and promising oxidative desulfurization of fuel using Fenton like *deep eutectic solvent*. Scientific Reports, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62781-x>
- Cao, D., Xu, X., & Jiang, S. (2021). Ultrasound-electrochemistry enhanced flotation and desulphurization for fine coal. Separation and Purification Technology, 258. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117968>
- Cheng, G., Li, Y., Cao, Y., Wang, X., Li, E., Guo, Y., & Lau, E. Von. (2024). New Insights on the Understanding of Sulfur-Containing Coal Flotation Desulfurization. Minerals, 14(10). <https://doi.org/10.3390/min14100981>
- Cheng, G., Li, Y., Cao, Y., & Zhang, Z. (2023). A novel method for the desulfurization of medium-high sulfur coking coal. Fuel, 335. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126988>
- Cheng, G., Peng, Y., Duan, P., Li, E., Lv, C., Wang, X., & Cheng, F. (2025). Sustainable Desulfurization of Fine High-Sulfur Coal via Flotation-Electrochemical Method. Minerals Engineering, 233. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109571>
- Dinh, T., Kovacs, H., & Dobo, Z. (2025). A comprehensive review on desulfurization of coal. In Energy Conversion and Management: X (Vol. 27). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101201>
- Gao, F., & Zhang, Y. (2025). Effect and mechanism of coal desulfurization using a surfactant-assisted NaClO-NaOH system. Scientific Reports, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88994-2>
- Ge, T., Zhou, B., Xu, J., & Wei, Y. (2024). Study on desulfurization mechanism of ILs-H₂O₂ system and its influence on coal structures. Journal of Molecular Liquids, 403. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.124847>
- Huffman, G. P., Shah, N., Huggins, F. E., Stock, L. M., Chatterjee, K., Kilbane II, J. J., Chou, M.-I. M., & Buchanan, D. H. (1995). Sulfur speciation of desulfurized coals by XANES spectroscopy (Number 4).
- Irshad, N., Tahir, S., Nasir, S., Zahid, M., Bhatti, I. A., Hussain, T., & Shahid, I. (2024). Ultrasound-assisted oxidative desulphurization of coal using choline chloride-based *deep eutectic solvents*. International Journal of Environmental Science and Technology, 21(12), 8039–8048. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05514-x>
- Kang, S., Liang, S., Shui, H., Wang, Z., Lei, Z., Ren, S., Yan, J., Li, Z., Pan, C., Yan, H., & Zhang, W. (2026). Elucidating sulfur migration mechanisms in coal pyrolysis: Effects of additives, ash content, and atmosphere. Fuel, 407. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.137333>
- Karaca, H., Koyunoğlu, C., Yeşilyurt, K., Çelik, M., & Yeşilyurt, Ö. (2022). Calculating economical impact by standard chemical exergy value and environmental impact by life cycle assessment method for desulfurization from Elbistan Lignite with leaching process (H₂O₂/H₂SO₄). Cleaner Chemical Engineering, 3, 100062. <https://doi.org/10.1016/j.clce.2022.100062>
- Kasrai, M., Brown, J. R., Bancroft, G. M., Tan, K. H., & Cheni, J.-M. (n.d.). Characterization of sulphur in coal from sulphur L-edge XANES spectra. In FUEL (Vol. 69).
- Koyunoğlu, C., & Karaca, H. (2023). Microbial desulphurisation of coal: a review. International Journal of Sustainable Energy, 42(1), 1–24. <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2167998>
- Lin, X., Fu, L., Lu, P., Zhang, Q., Xu, G., & Bai, D. (2024). Development of a three-stage process for high coal desulfurization and char yield. Journal of the Energy Institute, 113. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2024.101536>
- Masayuki SHIRAI, by, & Sugawara, K. (1999). Review Determination of Sulfur Species in Coal by X-ray Absorption Near Edge Structure Spectroscopy. In Int. J. of The Soc. of Mat. Eng. for Resources (Vol. 7, Number 2).
- Mursito, A. T., Widodo, & Arifin, D. N. (2020). Characterization of bio-coal briquettes blended from low quality coal and biomass waste treated by Garant® bio-activator and its application for fuel combustion. International Journal of Coal Science and Technology, 7(4), 796–806. <https://doi.org/10.1007/s40789-020-00309-0>
- Neraca Sumberdaya dan Cadangan Mineral dan Batubara Indonesia Tahun 2025. (n.d.).
- Phengsaart, T., Srichonphaisan, P., Kertbundit, C., Soonthornwiphat, N., Sinthugoot, S., Phumkokrux, N., Juntarasakul, O., Maneeintr, K., Numprasanthai, A., Park, I., Tabelin, C. B., Hiroyoshi, N., & Ito, M. (2023). Conventional and recent advances in *gravity separation* technologies for *coal cleaning*: A systematic and critical review. In Heliyon (Vol. 9, Number 2). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13083>
- Ryberg, M. W., Owsianiak, M., Laurent, A., & Hauschild, M. Z. (2015). Power generation from chemically cleaned coals: Do environmental benefits of firing cleaner coal outweigh environmental burden of cleaning? Energy and Environmental Science, 8(8), 2435–2447. <https://doi.org/10.1039/c5ee01799h>
- Shahhosseini, S., Seyedi sani, S. M., & Kaeed, Z. (2024). Characterization and optimization of ultrasound assisted oxidative desulfurization of a model fuel using a novel magnetic *deep eutectic solvent*.

- International Journal of Sustainable Energy, 43(1).
<https://doi.org/10.1080/14786451.2024.2321625>
- Shi, C., Niu, F., Wang, H., Ma, J., Wu, H., & Liu, S. (2024). Mechanism analysis of enhanced desulfurization of pulverized coal through high-gradient magnetic separation with microwave radiation. *Energy*, 310.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133226>
- Singh, A. K., Kumar, A., Singh, P. K., Singh, A. L., & Kumar, A. (2018). Bacterial desulphurization of low-rank coal: A case study of Eocene Lignite of Western Rajasthan, India. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 40(10), 1199–1208.
<https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1476608>
- Tang, L., Chen, X., & Tao, X. (2023). Non-thermal effect of microwave on organic sulfur removal from coal by microwave with peroxyacetic acid. *Fuel*, 338.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127262>
- Tang, Y., Xue, L., Gou, M. M., Wang, L., Ma, P., & Yu, X. (2024). Study on influencing factors of Coal Microbial Flotation Desulfurization. *Fuel*, 358.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130115>
- Wang, G., Ma, Z., Zhou, Z., Zheng, Y., & Cheng, L. (2024). Experimental Study on Combined Microwave–Magnetic Separation–Flotation Coal Desulfurization. *Molecules*, 29(16).
<https://doi.org/10.3390/molecules29163729>
- Wu, X., Wu, K., Zhang, Y., Hong, Q., Zheng, C., Gao, X., & Cen, K. (2017). Comparative life cycle assessment and economic analysis of typical flue-gas cleaning processes of coal-fired power plants in China. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3236–3242.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.146>
- Xia, W., & Xie, G. (2017). A technological review of developments in chemical-related desulfurization of coal in the past decade. In *International Journal of Mineral Processing* (Vol. 161, pp. 65–71). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.02.013>
- Xu, J., Liu, X., Song, C., Du, Z., Wang, F., Luo, J., Chen, X., & Zhou, A. (2020). Biodesulfurization of high sulfur coal from Shanxi: Optimization of the desulfurization parameters of three kinds of bacteria. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 42(18), 2297–2315.
<https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1675821>
- Yang, H., Liu, J., Zhang, B., Cheng, T., Zou, D., & Lv, X. (2024). Mechanism of microwave-assisted coal desulfurization with urea peroxide. *Process Safety and Environmental Protection*, 192, 1127–1137.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.10.086>
- Yu, X., Luo, Z., & Gan, D. (2019). Desulfurization of high sulfur fine coal using a novel combined beneficiation process. *Fuel*, 254.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.06.011>
- Yue, X., Chen, S., & Zhou, Y. (2025). Study on Dry Deashing and Desulfurization of Pulverized Coal via *Pulsating circulating airflow* Technology. *Materials*, 18(11).
<https://doi.org/10.3390/ma18112625>
- Zhao, C., Zhang, R., Mu, C., Li, D., Zhang, D., Liu, H., Jin, L., He, Y., & Hu, H. (2025). Catalyzed oxidative desulfurization of coal tar pitch with trifluoroacetic acid/choline chloride eutectic solvent. *Ranliao Huaxue Xuebao/Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 53(6), 836–847.
[https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(24\)60516-5](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(24)60516-5)