

Kajian Teknologi Material Maju untuk Pengolahan Ion Sulfat pada Limbah Cair Industri

Hutri Puspita Sari¹, Aster Rahayu^{1*}, dan Dhias Cahya Hakika¹

¹Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan, Jl. Ahmad Yani, Banguntapan, Bantul, D.I. Yogyakarta, 55191, Indonesia.

*Corresponding Author: aster.rahayu@che.uad.ac.id

Abstrak

Pencemaran ion sulfat menjadi masalah serius dalam lingkungan, terutama akibat aktivitas industri seperti pertambangan dan pengolahan mineral. Tingginya konsentrasi sulfat dapat merusak kualitas air dan kesehatan manusia. Tujuan dari artikel ini adalah untuk mengevaluasi efektivitas material maju dalam menghilangkan ion sulfat dari air limbah. Metode yang digunakan mencakup studi literatur yang komprehensif, dengan fokus pada berbagai material seperti nanomaterial, komposit, dan resin penukar ion yang telah terbukti efektif dalam penghilangan sulfat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan ettringit dan polialuminium chloride (PAC) dapat mencapai efisiensi penghapusan sulfat hingga 90%. Selain itu, material seperti hidrokalumite dan resin penukar ion juga menunjukkan potensi yang signifikan. Kesimpulan dari penelitian ini menegaskan bahwa pemilihan material yang tepat dan pengaturan kondisi operasional, seperti pH dan waktu kontak, sangat berpengaruh terhadap efisiensi penghilangan sulfat. Oleh karena itu, penggunaan material maju menawarkan solusi yang lebih berkelanjutan untuk mengatasi pencemaran sulfat dalam industri, sekaligus mendukung pengelolaan air limbah yang lebih efektif dan ramah lingkungan. Artikel ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru untuk praktik pengolahan air yang lebih baik di masa depan.

Kata kunci: Ion sulfat, Material maju, Removal

Abstract

Sulfate ion pollution is a serious problem in the environment, especially due to industrial activities such as mining and mineral processing. High sulfate concentrations can damage water quality and human health. The purpose of this article is to evaluate the effectiveness of advanced materials in removing sulfate ions from wastewater. The methods used include a comprehensive literature study, focusing on various materials such as nanomaterials, composites, and ion exchange resins that have been proven effective in sulfate removal. The results showed that the use of ettringite and polyaluminum chloride (PAC) can achieve sulfate removal efficiencies of up to 90%. In addition, materials such as hydrocalumite and ion exchange resins also showed significant potential. The conclusion of this study confirms that the selection of appropriate materials and the setting of operational conditions, such as pH and contact time, greatly affect the sulfate removal efficiency. Therefore, the use of advanced materials offers a more sustainable solution to overcome sulfate pollution in industry, while supporting more effective and environmentally friendly wastewater management. This article is expected to provide new insights for better water treatment practices in the future.

Keywords: Sulfate ion, Advanced material, Removal

PENDAHULUAN

Pencemaran ion sulfat menjadi masalah lingkungan yang signifikan terutama akibat aktivitas industri seperti pertambangan, pengolahan mineral, dan pembuangan limbah industri (Mukimin et al., 2018; Tlaiaa et al., 2020; Y. Wang et al., 2019). Ion sulfat sering kali terlarut dalam air sebagai hasil dari oksidasi mineral sulfida dan penggunaan berbagai bahan kimia dalam proses industri (Pratinthong et al., 2021; C. Zhang et al., 2019). Tingginya konsentrasi ion sulfat, yang dapat mencapai lebih dari 10.000 mg/L, dapat menimbulkan dampak negatif yang serius. Salah satu masalah utama adalah perubahan rasa air yang berdampak pada kualitas air minum. Selain itu, konsentrasi sulfat yang tinggi dapat menyebabkan gangguan kesehatan, seperti masalah pencernaan pada hewan dan manusia (Navamani Kartic et al., 2018; Nurmesniemi et al., 2021). Dari segi infrastruktur, ion sulfat juga berkontribusi terhadap korosi yang dapat merusak peralatan dan memperbesar biaya operasional. Pembentukan koloidal gipsium akibat reaksi kimia dalam air limbah dapat menyebabkan masalah skala di pabrik pengolahan, mengganggu proses produksi, dan meningkatkan kerugian ekonomi (Fang et al., 2018; Pratinthong et al., 2021).

Untuk mengatasi pencemaran sulfat, berbagai metode konvensional telah dikembangkan, termasuk pengolahan biologis, filtrasi membran, dan presipitasi kimia (Hou et al., 2022; Saslow et al., 2020). Metode biologis mengandalkan bakteri untuk mengurangi sulfat, namun memerlukan kontrol parameter yang ketat dan waktu yang lama untuk mencapai hasil yang diinginkan. Filtrasi membran, seperti reverse osmosis dapat efektif tetapi sering kali mahal dan memerlukan energi tinggi untuk beroperasi (S. Liu et al., 2025; Dengke Wang et al., 2024). Sementara itu, presipitasi kimia meskipun lebih ekonomis sering kali menghasilkan limbah yang tidak diinginkan dan memiliki efisiensi rendah dalam kondisi tertentu. Oleh karena itu, penggunaan metode yang lebih efisien dan ramah lingkungan untuk menghilangkan ion sulfat dari air limbah sangat diperlukan (X. Liu et al., 2025; Mehaidli et al., 2024; Y. Zhang et al., 2023).

Dalam artikel ini, penggunaan material maju sebagai adsorben untuk pemisahan ion sulfat telah menarik perhatian. Material seperti nanomaterial, komposit, dan biomaterial

menawarkan solusi yang lebih berkelanjutan dan efektif (Letko Khait et al., 2025; Pereira et al., 2023; Dengke Wang et al., 2024). Nanomaterial seperti karbon aktif dan graphene oxide dikenal memiliki kapasitas adsorpsi yang tinggi (Rahayu et al., 2021, 2022), sedangkan komposit yang menggabungkan bahan anorganik dan organik dapat meningkatkan efisiensi penghilangan sulfat. Kelebihan dari penggunaan material maju ini termasuk kapasitas adsorpsi yang tinggi dan sifat ramah lingkungan, karena banyak di antaranya berasal dari bahan alami atau dapat didaur ulang (Bakhtshokouhi & Assadi, 2025; Dafu Wang et al., 2025).

Tujuan dari artikel ini adalah untuk mengevaluasi efektivitas metode pemisahan ion sulfat menggunakan teknik adsorpsi dengan material maju. Dengan mengembangkan pendekatan yang lebih ramah lingkungan dan efisien, artikel ini diharapkan dapat memberikan solusi yang lebih baik untuk pengelolaan air limbah industri yang mengandung sulfat, sekaligus mendukung keberlanjutan sumber daya air yang semakin langka.

METODE REMOVAL ION SULFAT

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji berbagai jenis material maju yang digunakan untuk menghilangkan ion sulfat dari air dan limbah cair baik melalui berbagai proses. Material-material tersebut meliputi nanomaterial, komposit berbasis karbon, zeolit termodifikasi, hingga material berpori tinggi. Setiap jenis material menunjukkan performa yang bervariasi tergantung pada kondisi operasional seperti pH, konsentrasi awal sulfat, waktu kontak, dan suhu. Tabel berikut menyajikan ringkasan dari berbagai studi yang telah dilakukan, mencakup jenis material, kondisi operasi, kapasitas adsorpsi, serta efisiensi removal sulfat yang diperoleh.

Tabel 1. Beberapa Penelitian Mengenai Removal Sulfat dengan Material Maju.

No	Judul Artikel	Hasil Penelitian	Referensi
1.	Sulfate removal from acid mine drainage using polypyrrole-grafted granular activated carbon	Dalam penelitian granular activated carbon berhasil dicangkokkan dengan polipirrol dengan cara memuat fraksi fungsionalitas nitrogen yang cukup besar kedalam karbon hingga 13% N sesuai dengan XPS. Permukaan polypyrrole-grafted RGC bermuatan positif dengan kapasitas yang cukup besar untuk menyerap sulfat dari air AMD. RGC yang dicangkokkan polipirrol mencapai pemuatan sulfat 48 mg/g, ini 8 kali lebih tinggi dari pada RGC murni. Per massa dan keseimbangan muatan, 9% nitrogen dalam fungsionalitas polipirrol aktif untuk menangkap sulfat. Pada karbon lored ini, kandungan nitrogennya adalah 12,9%, seperti yang ditandai dengan spektroskopi fotoelektron sinar-X.	(Hong et al., 2014)
2.	The removal of sulphate from mine water by precipitation as ettringite and the utilisation of the precipitate as a sorbent for arsenate removal	Hasil penelitian menunjukkan bahwa penghilangan sulfat dari air tambang dengan curah hujan sebagai ettringit dan pemanfaatan lebih lanjut dari ettringite sebagai penghilangan sorbent dari air dapat menjadi larutan polusi yang tidak menguntungkan untuk pengolahan air tambang. Dalam percobaan presipitasi, sulfat berkurang 85-90% dari konsentrasi awal air tambang 1400 mg/L melalui presipitasi ettringit. Karakterisasi XRD dari padatan yang diendapkan menunjukkan bahwa padatan tersebut adalah 89-91% ettringit dan 9-11% kalsit. Struktur ettringit berbentuk jarum diamati dalam gambar SEM. Kondisi percobaan curah hujan juga dimodelkan dengan perangkat lunak MINEQL + software. Hasil pemodelan meremehkan jumlah sulfat yang dihilangkan dari air tambang selama presipitasi setetringit dengan menunjukkan penghilangan sulfat 71% dibandingkan dengan 85-90% percobaan. Ini bisa disebabkan oleh curah hujan bersama, yang tidak termasuk model tersebut.	(Tolonen et al., 2016)
3.	Removal of sulfate ions by dissolved air flotation (DAF) following precipitation and flocculation	Hasil penelitian menunjukkan bahwa penghilangan ion sulfat melalui flotasi udara terlarut dengan gelembung mikro dan nano sangat dipengaruhi oleh presipitasi dengan polialuminium klorida dan flokulasi dengan poliakrilamida kationik. Kondisi optimal diperoleh pada konsentrasi flocculant 20 mg·L ⁻¹ , tekanan saturasi 5 atm, pH 4,5, dan rasio Al/SO ₄ ²⁻ 4:1. Kinetika flotasi mengikuti model reaksi orde pertama dengan laju konstanta 4 menit ⁻¹ . Metode ini berhasil mengurangi konsentrasi sulfat dari 1753 mg·L ⁻¹ menjadi di bawah 500 mg·L ⁻¹ sesuai standar WHO. Mekanisme utama pada perlekatan gelembung pada floc dan pembentukan floc aerasi yang cepat naik. Flotasi ini menunjukkan potensi untuk mengolah limbah industri dengan kadar sulfat tinggi.	(Amaral Filho et al., 2016)
4.	Removal of sulfate ions from aqueous solutions by	Hidrokalumite terbukti efektif dalam presipitasi sulfat, dengan dosis tinggi mencapai penghilangan 90 hingga 100% sulfat. Untuk dosis terendah (2 g L ⁻¹), penghilangan	(Santana et al., 2023)

	precipitation using calcined hydrocalumite	sulfat sekitar 60% dicapai, sementara hidrokalumite tanpa kalsinasi hanya mencapai 22%. Perlakuan panas menunjukkan pengaruh signifikan, tetapi variasi suhu kalsinasi tidak memengaruhi efisiensi penghilangan secara besar. Hidrokalumite menawarkan pengeluaran energi yang lebih rendah dan biaya sintesis yang lebih murah dibandingkan reagen lainnya. Namun, penggunaan kembali sludge yang diolah secara termal tidak layak karena pengurangan efisiensi penghilangan sulfat setelah dua siklus. Sintesis hidrokalumite dan pembentukan ettringite serta gipsum selama proses pengendapan dikonfirmasi. Secara keseluruhan, hidrokalumite memiliki potensi sebagai agen pengendapan untuk pengolahan limbah sulfat.	
5.	Removal of High-Concentration Sulfate Ions from the Sodium Alkali FGD Wastewater Using Ettringite Precipitation Method	Hasil penelitian ini menggunakan metode presipitasi ettringite terbukti efektif dalam menghilangkan ion SO_4^{2-} , F^- , dan logam berat, dengan efisiensi penghilangan masing-masing mencapai lebih dari 98%, 90%, dan 99%. Selain itu, ion Cl^- dan NO_3^- juga dapat dihilangkan, meskipun dengan efisiensi yang lebih rendah. Beberapa parameter, seperti dosis NaAlO_2 , dosis $\text{Ca}(\text{OH})_2$, pH awal larutan, suhu, waktu reaksi, kecepatan pengadukan, serta keberadaan anion dan ion logam berat, memengaruhi penghilangan Cl^- . Berdasarkan penelitian, kondisi eksperimental optimal untuk proses ini ditentukan dengan rasio Al/S 1:1, rasio Ca/S 4:1, suhu larutan 25 °C, waktu reaksi 30 menit, dan kecepatan pengadukan 200 rpm. Dengan demikian, metode presipitasi ettringite menunjukkan potensi yang baik untuk mengolah air limbah dengan konsentrasi sulfat tinggi dan berpeluang untuk diaplikasikan secara komersial di masa depan.	(Fang et al., 2018)
6.	Removal of High-Concentration Sulfate from Seawater by Ettringite Precipitation	Penelitian ini berhasil mengembangkan metode ettringite yang efisien untuk mengurangi konsentrasi ion sulfat dalam air laut yang memiliki salinitas tinggi, menjadikannya cocok untuk aplikasi sebagai fluida dasar dalam rekahan hidrolik. Metode presipitasi ettringite menggunakan NaAlO_2 dan CaO terbukti paling efektif, mengurangi konsentrasi sulfat dari 4.290 ppm menjadi sekitar 400 ppm dengan dosis kimia optimal. Reaksi ettringite tercapai dalam 15 menit pada kondisi alkali, dan efisiensi penghilangan sulfat tidak terpengaruh oleh suhu antara 15 °C hingga 45 °C. Meskipun konsentrasi Na^+ yang tinggi dalam air laut dapat mengurangi efisiensi ini, karakterisasi air setelah pengolahan menunjukkan bahwa konsentrasi Ca^{2+} tetap stabil, sementara Mg^{2+} dihilangkan secara efektif. Morfologi endapan ettringite menunjukkan bentuk berlapis dengan komposisi $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}$ dan $\text{Ca}_4\text{Al}_2(\text{SO}_4)(\text{OH})_{12}$ pada rasio molar Al:Ca:S 2:6:1. Metode ini juga ramah lingkungan, tidak melibatkan bahan kimia beracun, dan mendukung pengembangan industri minyak dan gas yang berkelanjutan.	(Hou et al., 2022)
7.	Removal of sulfate ions from process water by ion exchange resins	Penelitian ini menyelidiki penggunaan resin penukar ion (Amberlite IRA-400 dan Dowex 1X2) dalam pengolahan air proses melalui eksperimen adsorpsi-regenerasi dan uji flotasi. Hasil menunjukkan bahwa Amberlite IRA-400,	(Öztürk & Ekmekçi, 2020)

		dengan tingkat ikatan silang yang lebih tinggi, memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih baik dibandingkan Dowex 1X2. Resin ini berhasil menghilangkan 60% sulfat, 93% tiosulfat, 27% klorida, dan 100% ion xanthate dari air proses sintesis yang mengandung 1500 mg/L sulfat, 150 mg/L tiosulfat, 150 mg/L klorida, dan 5 mg/L xanthate. Proses regenerasi resin dilakukan dengan larutan NaOH 4% (w/v) yang efektif, memungkinkan resin digunakan berulang kali. Proses desorpsi ion dari resin bergantung pada pertukaran ion antara hidroksida dan ion yang diadsorpsi. Uji flotasi dengan air yang diolah menunjukkan bahwa sebagian besar ion sulfat dan tiosulfat dihilangkan, dan pH meningkat hingga 12 akibat reaksi pertukaran ion. Peningkatan pH tidak secara signifikan mempengaruhi efisiensi flotasi Zn, menunjukkan potensi penggunaan resin penukar ion dalam pengolahan air untuk meningkatkan kualitas air dalam proses flotasi.	
--	--	---	--

Tabel 2. Hasil Analisis Metode penelitian

No	Jenis Material Maju	Metode Penelitian	Kapasitas adsorpsi (mg/g)	% Penyerapan	Referensi
1.	<i>Granular activated carbon</i>	1. Pengambilan Bahan: GAC (<i>Granular Activated Carbon</i>) yang digunakan adalah dari karbon berbasis kayu (RGC) yang digiling dan disaring untuk mencapai ukuran tertentu. 2. Penggrafting Polipirrol: RGC direndam dalam larutan pirrol dengan berbagai konsentrasi (0,02 hingga 5 mol/L) selama 16 jam di bawah atmosfer nitrogen. Setelah pencampuran, larutan disaring untuk memisahkan partikel karbon, kemudian karbon dicampur dengan larutan FeCl₃ (0,5 hingga 2 mol/L) untuk memfasilitasi polimerisasi. Proses polimerisasi berlangsung selama 6 jam, diikuti dengan pencucian dan pengeringan karbon yang telah digraft. 3. Pengujian Air <i>Drainase</i> Tambang Asam (AMD): air AMD diperoleh dari Pennsylvania dan telah diproses secara kimia dengan kapur sebelum pengujian. 4. Distribusi Volume Pori: Volume pori dan luas permukaan diukur menggunakan adsorpsi argon pada suhu rendah, dengan hasil menunjukkan bahwa grafting polipirrol mengurangi volume pori dan luas permukaan GAC. 5. Uji <i>Isotherm</i> Adsorpsi: Uji <i>isotherm</i> dilakukan untuk mengevaluasi kapasitas adsorpsi sulfat menggunakan variasi dosis sulfat (10 hingga 400 mg/L) dengan 50 mg GAC per vial. Konsentrasi sulfat yang tersisa	48 mg/g	-	(Hong et al., 2014)

		diukur menggunakan kromatografi ion. Uji Kolom Skala Kecil (RSSCT): Uji dilakukan dengan kolom berukuran kecil untuk mengevaluasi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai titik jenuh sulfat dari air AMD.			
2.	<i>Ettringite precipitation</i>	1. Pengambilan Sampel: Sampel air limbah diambil dari tambang emas bawah tanah dengan pH sekitar 7,9, setelah pengolahan awal menggunakan ferrous sulfat. 2. Percobaan Presipitasi: Presipitasi dilakukan menggunakan kapur terhidrat ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dan natrium aluminat (NaAlO_2) dalam larutan air tambang. Campuran diaduk pada kecepatan 50 rpm selama 5 jam, diikuti dengan proses pemisahan yang dilakukan dengan waktu settling selama 1 jam hingga semalaman. Setelah settling, sampel diambil untuk analisis kadar sulfat, kalsium, natrium, dan aluminium. 3. Karakterisasi <i>Precipitate</i>: Padatan yang dihasilkan dianalisis menggunakan X-ray diffraction (XRD) untuk menentukan komposisi mineral. <i>Microscopy</i> elektron pemindaian (SEM) digunakan untuk memeriksa morfologi <i>ettringite</i>. 4. Percobaan Sorpsi Arsenat: Kapasitas sorpsi dari padatan <i>precipitate</i> diuji menggunakan larutan model arsenat dengan konsentrasi awal 1,5 mg/L. Dosis sorbent bervariasi (0,2, 1, dan 5 g/L) dan diaduk pada 250 rpm selama 24 jam. Setelah pengadukan, sampel disentrifugasi untuk analisis arsenik dan pH supernatan diukur.	-	90%	(Tolonen et al., 2016)
3.	<i>Polyaluminum chloride (PAC)</i>	1. Bahan dan Persiapan: Sodium sulfat anhidrat (Na_2SO_4) digunakan untuk menyiapkan larutan umpan dengan konsentrasi sulfat $1800 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Polyaluminum chloride (PAC) dan kationik poliacrilamida (Flonex 4115 SH) digunakan sebagai agen presipitasi dan flokulasi. Sampel Air Limbah: Air limbah dari pertambangan asam (AMD) dengan konsentrasi sulfat $1700\text{--}1800 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ digunakan sebagai model untuk validasi. 2. Presipitasi Ion Sulfat: dilakukan dalam beaker 0,5 L dengan pengadukan magnetik pada pH 4,5. Rasio molar $\text{Al}/\text{SO}_4^{2-}$ bervariasi dari 1:1 hingga 5:1. Setelah 5 menit, endapan yang terbentuk difiltrasi menggunakan membran selulosa asetat ($0,45 \mu\text{m}$) untuk analisis sulfat residu. 3. Flokulasi: dilakukan dengan menambahkan kationik poliacrilamida pada konsentrasi $10\text{--}20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, diaduk pada kecepatan 120 rpm selama 60 detik, diikuti pengadukan lambat		80 -82%	(Amaral Filho et al., 2016)

		pada 40 rpm selama 180 detik. 4. Flotasi Udara Terlarut (DAF): Setup DAF meliputi sel flotasi dengan kapasitas 2 L dan wadah saturasi untuk saturasi udara pada tekanan 5 atm selama 30 menit. <i>Microbubbles</i> (MBs) dan <i>nanobubbles</i> (NBs) dihasilkan dengan menekan air terlarut udara melalui katup jarum ke dalam sel flotasi. Konsentrasi sulfat residu diukur setelah flotasi selama waktu yang bervariasi. 5. Analisis Kinetika Flotasi: dihitung menggunakan model kinetika orde pertama. Konstanta laju diperoleh dari data flotasi pada waktu yang berbeda. Efisiensi penghilangan sulfat dievaluasi dengan membandingkan konsentrasi sulfat awal dan akhir.			
4.	Hidrokalumite ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6\text{Cl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	1. Sintesis <i>Hidrokalumite</i>: <i>Hidrokalumite</i> ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6\text{Cl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) disintesis melalui metode ko-presipitasi. Larutan kalsium klorida dihidrat (1,3 M), aluminium klorida heksahidrat (0,65 M), dan natrium hidroksida (4 M) disiapkan dengan rasio Ca/Al 2:1. Campuran larutan ditambahkan ke dalam beaker di bawah pengadukan konstan pada suhu 80 °C selama 10 jam, lalu dinaikkan menjadi 90 °C selama 24 jam. pH larutan dipantau selama proses. Setelah proses, material difiltrasi dan dicuci dengan air distilasi, kemudian dikeringkan di oven pada 50 °C hingga massa stabil. 2. Pengujian Presipitasi Sulfat: Uji presipitasi dilakukan dengan menambahkan 500 mL larutan sintetis dengan konsentrasi sulfat awal sekitar 1000 mg (SO_4^{2-}) L⁻¹ ke dalam hidrokalumite yang telah disintesis dengan dosis 2, 4, dan 6 g L⁻¹. Proses dilakukan pada suhu ruangan dengan pengadukan pada sekitar 200 rpm selama 7 jam. Sampel diambil pada interval waktu tertentu untuk analisis konsentrasi sulfat menggunakan spektrofotometri UV-Vis dengan metode turbidimetri. Perlakuan Panas dan Penggunaan Kembali <i>Sludge</i>: <i>Sludge</i> hasil presipitasi dipisahkan dari fase cair dan mengalami perlakuan panas pada suhu 1200 °C selama 100 menit untuk mengevaluasi kemampuannya sebagai agen presipitasi dalam siklus baru. Uji penghilangan sulfat dengan <i>sludge</i> yang telah dipanaskan dilakukan dengan menambahkan 0,1 g <i>sludge</i> ke dalam 50 mL larutan sintetis dengan konsentrasi sulfat awal 600 mg L⁻¹.		90%	(Santana et al., 2023)
5.	<i>Ettringit</i>	1. Bahan dan Persiapan: Bahan kimia yang	-	98%	(Fang et al.,

	<i>e</i> (Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)₁₂·26 H₂O)	digunakan meliputi NaAlO₂, Ca(OH)₂, NaF, NaCl, KNO₃, dan ion logam berat seperti Mg²⁺ dan Mn²⁺. Semua bahan digunakan tanpa pemurnian lebih lanjut. Limbah FGD natrium alkali disiapkan dengan melarutkan Na₂SO₄ dalam air deionisasi untuk mendapatkan konsentrasi SO₄²⁻ awal sekitar 10.000 mg/L. 2. Pengaturan Parameter Eksperimental: Parameter yang diuji meliputi dosis NaAlO₂, dosis Ca(OH)₂, pH awal larutan, suhu larutan, waktu reaksi, kecepatan pengadukan, serta konsentrasi anion (Cl⁻, NO₃⁻, dan F⁻) serta ion logam berat. Dosis dan kondisi reaksi diatur dalam rentang molar yang berbeda untuk menentukan pengaruhnya terhadap efisiensi penghilangan SO₄²⁻. 3. Proses Presipitasi <i>Ettringite</i>: Larutan sampel sebanyak 1 L dimasukkan ke dalam reaktor kaca, kemudian ditambahkan Ca(OH)₂ dan NaAlO₂. Larutan diaduk pada kecepatan tertentu selama waktu yang ditentukan. Setelah reaksi selesai, sampel disaring menggunakan membran mikroporos 0,45 µm untuk memisahkan endapan dan analisis filtrat dilakukan untuk menentukan konsentrasi SO₄²⁻. 4. Analisis dan Pengukuran: Konsentrasi ion SO₄²⁻, NO₃⁻, F⁻, dan Cl⁻ dianalisis menggunakan sistem kromatografi ion. Konsentrasi ion logam berat diukur menggunakan spektrometer emisi plasma induktif (ICP-AES). Efisiensi penghilangan dihitung berdasarkan perbandingan konsentrasi awal dan akhir ion. Optimasi Kondisi: Eksperimen dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh berbagai kondisi, termasuk pH larutan (3,0 hingga 11,0), suhu (25 hingga 80 °C), dan waktu reaksi (15 hingga 120 menit).			2018)
6.	<i>Ettringite</i> <i>e</i> (Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)₁₂·26 H₂O)	1. Bahan dan Persiapan: Bahan yang digunakan meliputi NaCl, CaCl₂·2H₂O, MgCl₂·6H₂O, Na₂SO₄, NaHCO₃, NaAlO₂, dan CaO. Semua bahan disiapkan dalam larutan deionisasi untuk mensimulasikan seawater dengan total padatan terlarut (TDS) sekitar 57.670 ppm dan konsentrasi sulfat 4.290 ppm. 2. Proses Presipitasi <i>Ettringite</i>: Sebanyak 50 mL air laut diambil dalam beaker kaca, lalu ditambahkan bahan kimia dalam bentuk padat. Campuran diaduk pada 200 rpm selama waktu tertentu untuk memastikan reaksi presipitasi terjadi. Setelah adukan,	-	>90%	(Hou et al., 2022)

		endapan dipisahkan dari larutan melalui proses sedimentasi selama 1 jam. Air di bagian atas dikumpulkan untuk analisis lebih lanjut. - Optimasi Dosis Kimia: Dosis NaAlO_2 dan CaO diuji pada berbagai rasio molar terhadap sulfat (misalnya, Al: S = 0,8:1, 1:1, dan 2:1; Ca: S = 2:1, 3:1, 4:1, dan 6:1). Efisiensi penghilangan sulfat diukur menggunakan ICP-MS untuk menentukan konsentrasi sulfat residual setelah perlakuan. - Pengaruh Waktu Pengadukan: dilakukan pengujian dinamis dengan memisahkan endapan dari air laut setelah waktu pengadukan yang bervariasi (1, 2, 5, 15, 60, dan 120 menit) untuk mempelajari waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan reaksi. - Pengaruh Konsentrasi Na^+ dan pH: efek konsentrasi Na^+ pada penghilangan sulfat diuji dengan menambahkan NaCl dalam larutan dengan variasi konsentrasi (0 hingga 25.000 ppm). pH larutan diukur setelah penambahan NaAlO_2 dan CaO untuk memastikan kondisi alkalin yang diperlukan untuk reaksi. - Karakterisasi Endapan: Endapan yang dihasilkan dianalisis menggunakan SEM/EDS untuk menentukan morfologi dan komposisi elemen. Penyesuaian pH: Setelah penghilangan sulfat, pH air yang diolah disesuaikan menjadi netral (~pH 7) dengan injeksi CO_2, untuk memastikan kesesuaian air dalam aplikasi fraktur hidrolik.			
7.	Amberlite IRA-400 dan Dowex 1X2	- Pengambilan Bahan: Resin penukar ion yang digunakan adalah Amberlite IRA-400 dan Dowex 1X2. Resin ini disuplai dalam bentuk klorida dan diubah menjadi bentuk hidroksida untuk menghindari pelepasan ion klorida yang dapat merusak proses flotasi. - Persiapan Air Sintetis: Air proses sintetis disiapkan dengan melarutkan garam anorganik untuk mensimulasikan air dari pabrik flotasi seng, yang mengandung sulfat, tiosulfat, klorida, dan xanthate. - Uji Adsorpsi: Uji adsorpsi dilakukan dengan menempatkan 1 g resin dalam 100 mL larutan sulfat dengan konsentrasi bervariasi. Waktu kontak diatur untuk menentukan kapasitas adsorpsi resin. - Uji Regenerasi: Resin yang telah terisi ion diuji regenerasi menggunakan larutan NaOH 4% untuk desorpsi ion yang teradsorpsi. Proses ini diulang hingga empat siklus untuk	-	60% Amberlite IRA-400 dan 42 % Dowex 1X2	(Öztürk & Ekmekçi, 2020)

		menguji efektivitas regenerasi.			
		5. Uji Flotasi: Uji flotasi dilakukan menggunakan air proses yang telah diperlakukan dengan resin untuk menilai pengaruh pengolahan air terhadap efisiensi flotasi bijih seng. Air dari berbagai tahap flotasi dianalisis untuk perubahan konsentrasi ion.			
		6. Analisis Kimia: Konsentrasi ion dalam larutan diukur menggunakan kromatografi ion dan spektroskopi UV-Vis, serta analisis logam dilakukan melalui penggilingan dan pencernaan asam.			

Penghilangan ion sulfat dari air dan limbah cair menggunakan material maju menunjukkan hasil yang menjanjikan. Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa penggunaan nanomaterial, komposit berbasis karbon, dan ettringit dapat mencapai efisiensi penghapusan yang tinggi, dengan beberapa metode mencapai penghilangan sulfat hingga 90% atau lebih. Material seperti polialuminium chloride (PAC) dan hidrokalumite terbukti efektif dalam proses presipitasi dan flotasi, sedangkan resin penukar ion menunjukkan potensi dalam pengolahan air limbah. Hasil-hasil ini mengindikasikan bahwa pemilihan material yang tepat, serta pengaturan kondisi operasional seperti pH dan waktu kontak, sangat berpengaruh terhadap efisiensi penghilangan sulfat, sehingga memberikan solusi yang berkelanjutan untuk mengatasi pencemaran sulfat dalam berbagai aplikasi industri.

SIMPULAN DAN SARAN

Penghilangan ion sulfat dari air dan limbah cair menggunakan material maju menunjukkan hasil yang signifikan. Berbagai penelitian telah membuktikan bahwa penggunaan nanomaterial, komposit berbasis karbon, dan ettringit dapat mencapai efisiensi penghapusan sulfat hingga 90% atau lebih. Material seperti polialuminium chloride (PAC) dan hidrokalumite terbukti efektif dalam proses presipitasi dan flotasi, sedangkan resin penukar ion menunjukkan potensi yang baik dalam pengolahan air limbah. Pemilihan material dan pengaturan kondisi operasional, seperti pH dan waktu kontak, sangat mempengaruhi efisiensi

penghilangan sulfat, sehingga memberikan solusi berkelanjutan untuk mengatasi pencemaran sulfat dalam industri.

Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengeksplorasi kombinasi material maju yang dapat meningkatkan efisiensi penghilangan sulfat. Selain itu, penting untuk melakukan studi tentang pengaruh kondisi lingkungan terhadap kinerja material, serta mengembangkan metode yang lebih ramah lingkungan untuk pengelolaan limbah industri. Saran ini ditujukan kepada peneliti dan praktisi di bidang pengolahan air limbah untuk meningkatkan keberlanjutan sumber daya air.

DAFTAR PUSTAKA

- Amaral Filho, J., Azevedo, A., Etchepare, R., & Rubio, J. (2016). Removal of sulfate ions by dissolved air flotation (DAF) following precipitation and flocculation. *International Journal of Mineral Processing*, 149, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.01.012>
- Bakhtshokouhi, S., & Assadi, A. (2025). Examining sulfate radical-based enhanced oxidation techniques to degradation pharmaceutically active substances in aqueous media: With acetaminophen serving as a case study. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 17(January), 100599. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100599>
- Fang, P., Tang, Z. J., Chen, X. B., Huang, J. H., Tang, Z. X., & Cen, C. P. (2018). Removal of High-Concentration Sulfate Ions from the Sodium Alkali FGD Wastewater Using Ettringite Precipitation Method: Factor

- Assessment, Feasibility, and Prospect. *Journal of Chemistry*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/1265168>
- Hong, S., Cannon, F. S., Hou, P., Byrne, T., & Nieto-Delgado, C. (2014). Sulfate removal from acid mine drainage using polypyrrole-grafted granular activated carbon. *Carbon*, 73(29), 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.02.036>
- Hou, J., Alghunaimi, F., Han, M., & Aljurryyed, N. (2022). Removal of High-Concentration Sulfate from Seawater by Ettringite Precipitation. *Journal of Chemistry*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8723962>
- Letko Khait, N., Zuccaro, S., Abdo, D., Cui, H., Siu, R., Ho, E., Morshead, C. M., & Shoichet, M. S. (2025). Redesign chondroitinase ABC degrades inhibitory chondroitin sulfate proteoglycans in vitro and in vivo in the stroke-injured rat brain. *Biomaterials*, 314(March 2024), 122818. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2024.122818>
- Liu, S., Qiu, Q., Yang, H., Zhou, L., & Zhu, X. (2025). Sustained release of persulfate and ferrous sulfate encapsulated in stearic acid for continuous pyrene degradation in groundwater. *Environmental Technology and Innovation*, 37(November 2024), 103950. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103950>
- Liu, X., Yuan, Z., Wu, M., & Guo, J. (2025). Sulfate-reducing capability of nitrate-dependent anaerobic gaseous alkanes degrader. *Water Research*, 280(March), 123507. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123507>
- Mehaidli, A. P., Mandal, R., & Simha, P. (2024). Selective degradation of endogenous organic metabolites in acidified fresh human urine using sulphate radical-based advanced oxidation. *Water Research*, 257(April), 121751. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121751>
- Mukimin, A., Vistanty, H., Zen, N., Purwanto, A., & Wicaksono, K. A. (2018). Performance of bioequalization-electrocatalytic integrated method for pollutants removal of hand-drawn batik wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 21(July 2017), 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.12.004>
- Navamani Kartic, D., Aditya Narayana, B. C. H., & Arivazhagan, M. (2018). Removal of high concentration of sulfate from pigment industry effluent by chemical precipitation using barium chloride: RSM and ANN modeling approach. *Journal of Environmental Management*, 206, 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.017>
- Nurmesniemi, E. T., Hu, T., Rajaniemi, K., & Lassi, U. (2021). Sulphate removal from mine water by precipitation as ettringite by newly developed electrochemical aluminium dosing method. *Desalination and Water Treatment*, 217, 195–202. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.26920>
- Öztürk, Y., & Ekmekçi, Z. (2020). Removal of sulfate ions from process water by ion exchange resins. *Minerals Engineering*, 159(May), 106613. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106613>
- Pereira, S. P. P., Boyle, D., Nogueira, A., & Handy, R. D. (2023). Differences in toxicity and accumulation of metal from copper oxide nanomaterials compared to copper sulphate in zebrafish embryos: Delayed hatching, the chorion barrier and physiological effects. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 253(February). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114613>
- Pratinthong, N., Sangchan, S., Chimupala, Y., & Kijjanapanich, P. (2021). Sulfate removal from lignite coal mine drainage in Thailand using ettringite precipitation. *Chemosphere*, 285(June), 131357. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131357>
- Rahayu, A., Jamilatun, S., Fajri, J. A., & Lim, L. W. (2021). Characterization of Organic Polymer Monolith Columns Containing Ammonium Quarternary As Initial Study For Capillary Chromatography. *Elkawnie*, 7(1), 119.

- <https://doi.org/10.22373/ekw.v7i1.8764>
- Rahayu, A., Maryudi, M., Fajri, J. A., Lim, L. W., & Nuraini, N. (2022). Synthesis of Silica-PEG By Physically Coating With PEG 4000 For Absorption of Ion Nitrate. *Elkawanie*, 8(2), 250. <https://doi.org/10.22373/ekw.v8i2.14680>
- Santana, D. F., de Melo, E. C. R., Pessanha, M. L. G. S., & Guimarães, D. (2023). Removal of sulfate ions from aqueous solutions by precipitation using calcined hydrocalumite as a precipitating agent. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(4), 3801–3814. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04220-w>
- Saslow, S. A., Kerisit, S. N., Varga, T., Mergelsberg, S. T., Corkhill, C. L., Snyder, M. M. V., Avalos, N. M., Yorkshire, A. S., Bailey, D. J., Crum, J., & Asmussen, R. M. (2020). Immobilizing Pertechnetate in Ettringite via Sulfate Substitution. *Environmental Science and Technology*, 54(21), 13610–13618. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03119>
- Tlaiaa, Y. S., Naser, Z. A. R., & Ali, A. H. (2020). Comparison between coagulation and electrocoagulation processes for the removal of reactive black dye RB-5 and cod reduction. *Desalination and Water Treatment*, 195, 154–161. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25914>
- Tolonen, E. T., Hu, T., Rämö, J., & Lassi, U. (2016). The removal of sulphate from mine water by precipitation as ettringite and the utilisation of the precipitate as a sorbent for arsenate removal. *Journal of Environmental Management*, 181, 856–862. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.053>
- Wang, Dafu, Yang, K., Zhang, Y., Liu, C., Liu, Z., Ren, J., Wu, M., & Pang, B. (2025). Degradation mechanism of cement paste buried in sulfate-rich saline soil. *Case Studies in Construction Materials*, 22(March), e04537. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04537>
- Wang, Dengke, Zhang, G., Ding, Q., Yan, P., & Li, Y. (2024). Microstructural evolution and degradation mechanisms of tricalcium silicate and tricalcium aluminate composite pastes under sulfate exposure. *Case Studies in Construction Materials*, 21(November), e04050. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04050>
- Wang, Y., Chen, J., Wang, Q., Qin, Q., Ye, J., Han, Y., Li, L., Zhen, W., Zhi, Q., Zhang, Y., & Cao, J. (2019). Increased secondary aerosol contribution and possible processing on polluted winter days in China. *Environment International*, 127(October 2018), 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.021>
- Zhang, C., Liu, F., Li, H., Qian, X., Zeng, F., Ma, Y., & Wang, L. (2019). Recovery of magnesium sulfate through crystallization in waste liquid after simultaneous desulfurization and denitrification. *Desalination and Water Treatment*, 140, 222–230. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23469>
- Zhang, Y., Li, B., Yu, Y., Zhang, C., Xu, H., Li, K., Zhao, C., Mao, J., & Liu, Y. (2023). Sulfate resistance and degradation mechanism of basalt fiber modified graphite tailings cement-based materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 8757–8775. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.196>

