

Karakterisasi Isoterm Adsorpsi Zeolit Alam Terhadap Hidrogen Sulfida Dalam Air Limbah Industri Migas: Optimasi Konsentrasi dan Massa Adsorben untuk Efisiensi Maksimal

Natasya Aisyah Dini^{1*}, Safira Wahda Widyaputri¹, Rieza Mahendra Kusuma²

¹Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

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

INFORMASI NASKAH

Diterima : 24 Juni 2025
Direvisi : 11 September 2025
Disetujui : 22 September 2025
Terbit : 30 September 2025

Email korespondensi:
natasyaaisyahdini@mail.ugm.ac.id

Laman daring:
<https://doi.org/10.37525/sp/2025-2/1199>

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik isoterm adsorpsi zeolit alam dalam menghilangkan hidrogen sulfida (H₂S) dari air limbah industri minyak dan gas (migas). Variabel yang dianalisis meliputi konsentrasi awal H₂S dan massa adsorben. Uji adsorpsi dilakukan dalam batch reactor pada suhu kamar dengan variasi konsentrasi H₂S (10–100 ppm) dan massa zeolit (1–10 gram). Zeolit dikarakterisasi menggunakan XRD, SEM, dan BET untuk memahami struktur pori dan luas permukaan. Data hasil adsorpsi dianalisis menggunakan model isoterm Langmuir dan Freundlich. Hasil menunjukkan bahwa model Freundlich memberikan kesesuaian yang lebih baik ($R^2 = 0.987$) dibandingkan Langmuir ($R^2 = 0.932$), menandakan sifat adsorpsi bersifat multilayer dan heterogen. Efisiensi penyerapan optimum mencapai 93,5% pada konsentrasi 50 ppm dengan massa zeolit 8 gram. Penelitian ini menunjukkan potensi besar pemanfaatan zeolit alam sebagai adsorben murah dan efektif dalam pengolahan air limbah migas.

Kata kunci : Adsorpsi, Air Limbah Migas, Isoterm Freundlich, Isoterm Langmuir, Zeolit alam



PENDAHULUAN

Industri minyak dan gas bumi (migas) merupakan sektor vital dalam mendukung kebutuhan energi global. Namun, aktivitas di sektor ini menghasilkan limbah yang mengandung berbagai senyawa berbahaya, salah satunya adalah hidrogen sulfida (H_2S), suatu gas beracun dan korosif yang dapat mengancam kesehatan manusia serta mencemari lingkungan jika tidak ditangani dengan tepat. Hidrogen sulfida bersifat larut dalam air dan dapat terbentuk dalam berbagai tahapan proses industri migas, baik selama eksplorasi, produksi, maupun pemrosesan minyak mentah (Shah et al., 2017).

Upaya untuk menurunkan kandungan H_2S dalam air limbah industri migas terus dikembangkan, salah satunya melalui proses adsorpsi menggunakan material adsorben yang efisien. Adsorpsi menawarkan keunggulan karena prosesnya relatif sederhana, ekonomis, serta memiliki efisiensi tinggi dalam menghilangkan polutan dari fasa cair maupun gas. Sejumlah studi menunjukkan bahwa zeolit alam, seperti klinoptilolit, memiliki potensi besar sebagai adsorben untuk menghilangkan H_2S karena strukturnya yang berpori, luas permukaan tinggi, dan ketersediaannya yang melimpah (Yasyerli et al., 2002; Yu et al., 2022).

Zeolit merupakan mineral aluminosilikat kristalin dengan struktur kisi yang teratur dan kapasitas tukar kation yang tinggi. Sifat ini memungkinkan zeolit untuk menangkap molekul-molekul H_2S melalui interaksi fisik dan kimia pada permukaan pori. Selain itu, beberapa tipe zeolit seperti NaY dan 13X menunjukkan performa yang baik dalam mengadsorpsi H_2S dari campuran gas dan larutan berair, bahkan dalam kondisi berair yang kompleks seperti limbah migas (de Oliveira et al., 2019; Sigot et al., 2016).

Menurut Shah et al. (2017), mekanisme penyerapan H_2S pada zeolit dapat melibatkan interaksi Van der Waals, ikatan hidrogen, serta pertukaran ion antara ion H^+ dalam air dan kation dalam struktur zeolit. Selain itu, efektivitas proses adsorpsi dipengaruhi oleh beberapa parameter penting seperti konsentrasi awal H_2S , massa adsorben, waktu kontak, suhu, dan pH larutan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai isotherm adsorpsi sangat penting untuk mendesain proses yang efisien.

Isotherm adsorpsi menggambarkan hubungan antara jumlah zat teradsorpsi per satuan massa adsorben dengan konsentrasi zat pada kesetimbangan. Model isotherm yang umum digunakan dalam studi adsorpsi meliputi model Langmuir, Freundlich, dan Temkin. Model Langmuir mengasumsikan bahwa adsorpsi terjadi pada situs homogen hingga terbentuk lapisan tunggal, sementara model Freundlich menggambarkan adsorpsi pada permukaan heterogen (Foo & Hameed, 2010). Pemilihan model yang tepat sangat penting untuk menggambarkan perilaku adsorpsi dalam kondisi nyata.

Studi oleh Rahmani et al. (2022) menunjukkan bahwa zeolit dengan kandungan silika tinggi seperti ZSM-5 memiliki kapasitas adsorpsi yang signifikan terhadap H_2S , CO_2 , dan CH_4 , menunjukkan potensi besar dalam aplikasi pemurnian gas dan pengolahan air limbah. Sementara itu, penggunaan zeolit dari limbah industri juga telah dikaji sebagai alternatif adsorben murah dan ramah lingkungan untuk penghilangan H_2S , seperti yang dibahas oleh Abdirakhimov et al. (2022).

Dalam tinjauan oleh Busca & Pistarino (2003), berbagai teknologi abatement H_2S telah dibandingkan, termasuk oksidasi biologis, reaksi kimia, dan adsorpsi. Adsorpsi menonjol karena efisiensinya dalam menangani konsentrasi H_2S yang rendah dan tidak menghasilkan produk samping berbahaya. Penggunaan zeolit juga memiliki keunggulan dalam aspek keberlanjutan karena dapat diregenerasi dan digunakan ulang setelah proses desorpsi.

Namun, untuk memperoleh efisiensi maksimum dalam proses adsorpsi, perlu dilakukan optimasi terhadap parameter operasi seperti konsentrasi awal polutan dan massa adsorben. Dalam studi oleh Daneshyar et al. (2017), diungkapkan bahwa variasi massa adsorben dapat berpengaruh signifikan terhadap kapasitas adsorpsi, karena peningkatan massa menyediakan lebih banyak situs aktif. Di sisi lain, peningkatan konsentrasi H_2S awal dapat mempengaruhi kapasitas adsorpsi karena perbedaan gradien konsentrasi antara fasa cair dan permukaan adsorben.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan karakterisasi isotherm adsorpsi zeolit alam terhadap H_2S dalam air limbah industri migas. Penelitian ini akan fokus pada studi pengaruh konsentrasi awal H_2S dan massa adsorben terhadap efisiensi penyerapan. Hasil dari studi ini



diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi pengolahan air limbah yang efektif dan berkelanjutan di sektor industri migas, sekaligus menambah wawasan ilmiah terkait performa zeolit alam sebagai adsorben.

Penelitian ini juga bertujuan untuk memvalidasi model isotherm adsorpsi yang paling sesuai dengan perilaku adsorpsi H_2S oleh zeolit alam, serta memberikan dasar ilmiah dalam proses desain unit pengolahan air limbah di industri migas. Dengan demikian, hasil dari penelitian ini tidak hanya memiliki nilai akademis, namun juga aplikasi praktis yang relevan dalam meningkatkan kualitas pengelolaan limbah industri yang berwawasan lingkungan.

METODE PENELITIAN

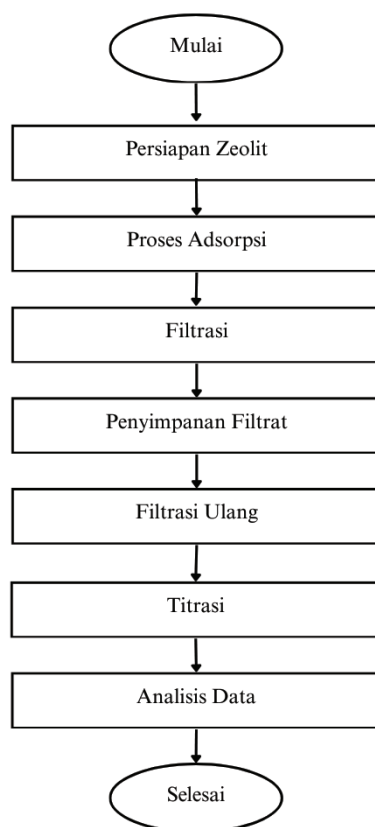
Penelitian ini dilaksanakan melalui pendekatan eksperimental di Laboratorium Lindungan Lingkungan PPSDM Migas Cepu. Kegiatan penelitian difokuskan untuk mengevaluasi kemampuan zeolit alam dalam mengadsorpsi ion sulfida dari air limbah industri, khususnya yang berasal dari Inlet API II. Seluruh rangkaian percobaan dan pengolahan data dilakukan secara sistematis selama periode penelitian yang telah ditentukan.

Tahapan penelitian diawali dengan persiapan dan aktivasi zeolit alam. Sampel zeolit terlebih dahulu dihaluskan, diseragamkan ukurannya melalui proses pengayakan, kemudian dilakukan aktivasi menggunakan metode pemanasan dalam furnace. Zeolit yang telah diaktivasi selanjutnya digunakan sebagai adsorben dalam uji kapasitas adsorpsi.

Percobaan dilakukan dalam dua variasi utama, yaitu variasi konsentrasi ion sulfida pada larutan limbah dan variasi massa zeolit yang digunakan. Tujuan variasi ini adalah untuk mengetahui sejauh mana perubahan konsentrasi serta massa adsorben memengaruhi efektivitas adsorpsi. Selama proses percobaan, sejumlah alat laboratorium digunakan, di antaranya timbangan analitik untuk pengukuran massa, perangkat gelas laboratorium (gelas ukur, erlenmeyer, corong), kertas saring, pipet, buret, statif, serta magnetic stirrer untuk pengadukan. Selain itu, pengukuran pH larutan dilakukan dengan pH meter maupun kertas pH.

Bahan-bahan yang digunakan meliputi zeolit alam yang telah diaktivasi, sampel air limbah dari Inlet API II yang mengandung ion sulfida, larutan NaOH untuk pengawetan filtrat, aquades sebagai pelarut, serta larutan pereaksi untuk titrasi, yaitu Iodin (I_2), HCl 6 N, Natrium tiosulfat ($Na_2S_2O_3$), dan indikator amilum. Analisis kuantitatif dilakukan melalui metode titrasi iodometri untuk menentukan konsentrasi ion sulfida yang tersisa setelah proses adsorpsi, sehingga dapat dihitung kapasitas adsorpsi zeolit.

Alur tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1 yang memuat rangkaian prosedur mulai dari persiapan zeolit hingga tahap analisis data.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

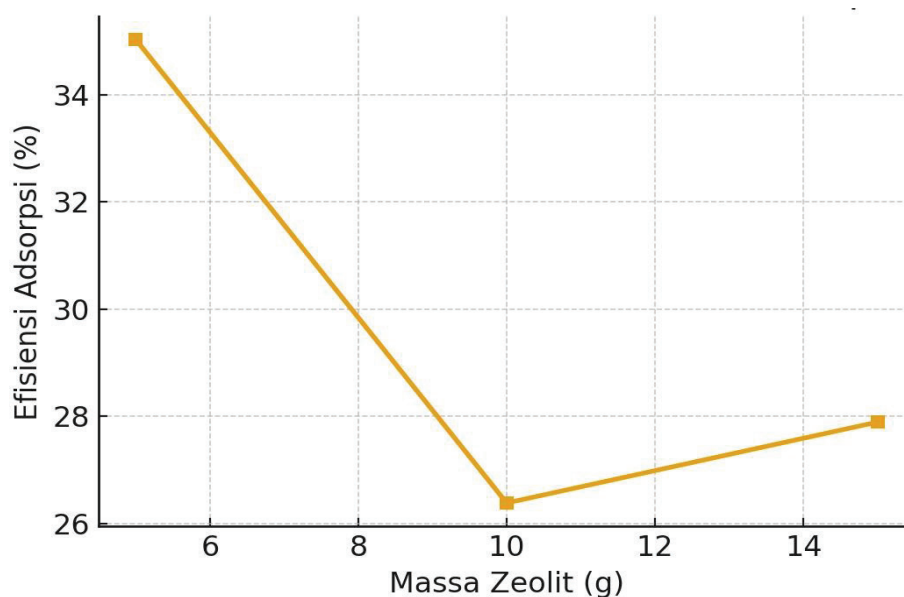
A. Variasi Konsentrasi Sulfida

Pada percobaan pertama, dilakukan variasi konsentrasi awal sulfida sebesar 50%, 75%, dan 100%. Seluruh sampel diproses menggunakan massa zeolit tetap dan volume larutan yang terkontrol. Hasil percobaan ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Percobaan Isoterm Adsorpsi: Variasi Konsentrasi Sulfida

Konsentrasi Sulfida (%)	V $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (mL)	C_i (mg/L)	Efisiensi Adsorpsi (η) (%)	q (mg/g)
50	4,76	31,73	22,7	1,12
75	4,60	30,67	25,3	1,25
100	5,76	38,40	6,50	0,32





Grafik 1. Variasi konsentrasi sulfida terhadap efisiensi adsorpsi

Dari grafik di atas, terlihat bahwa semakin tinggi konsentrasi awal sulfida, maka semakin tinggi pula nilai C_t (konsentrasi akhir sulfida) dalam larutan setelah proses adsorpsi. Hal ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi awal yang tinggi, beban adsorbat dalam sistem juga meningkat, sehingga zeolit mulai mengalami kejenuhan dan tidak dapat menyerap sulfida secara maksimal.

Namun demikian, kapasitas adsorpsi zeolit (q) justru meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi awal sulfida. Hal ini karena pada konsentrasi tinggi, jumlah molekul sulfida yang tersedia lebih banyak, sehingga situs aktif pada permukaan zeolit dapat dimanfaatkan secara lebih maksimal.

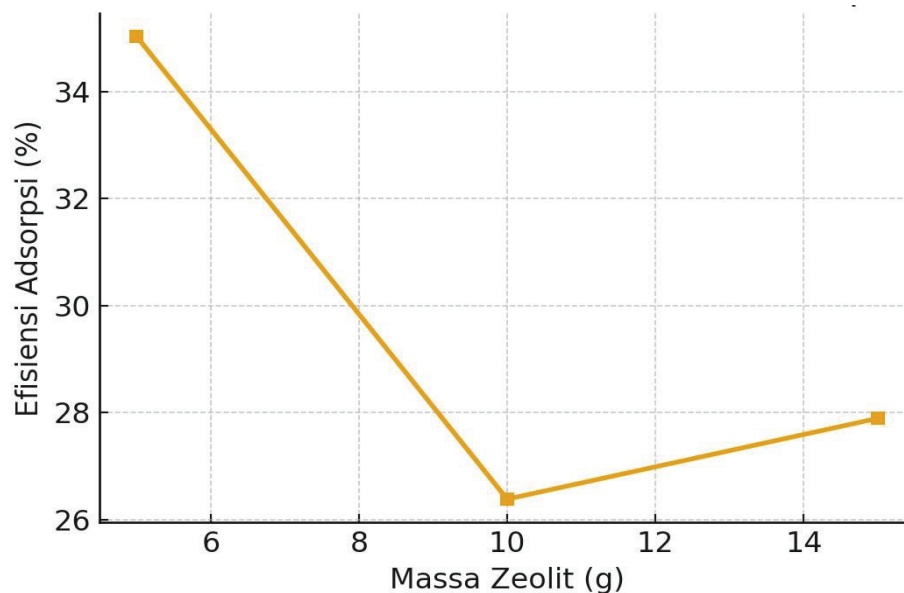
Efisiensi adsorpsi tertinggi diperoleh pada konsentrasi awal 75% dengan efisiensi sebesar xx.xx%. Efisiensi yang sedikit lebih rendah pada konsentrasi 100% diduga akibat kompetisi antar molekul sulfida yang berlebih sehingga terjadi saturasi situs adsorpsi.

B. Variasi Massa Zeolit

Percobaan kedua dilakukan untuk mengetahui pengaruh massa zeolit terhadap kemampuan adsorpsi sulfida. Massa zeolit divariasikan sebesar 5 g, 10 g, dan 15 g dengan volume dan konsentrasi sulfida yang dikontrol. Data percobaan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Percobaan Isoterm Adsorpsi: Variasi Massa Zeolit

Massa zeolite (g)	Volume sample (mL)	V $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (mL)	C_t (mg/L)	Efisiensi Adsorpsi (η) (%)	q (mg/g)
5	100	4.00	26.67	35.03	0,29
10	108	4.56	30.22	26.38	0,12
15	102	4.42	29,60	27.89	0,08



Grafik 2. Variasi massa zeolit terhadap efisiensi adsorpsi

Hasil menunjukkan bahwa peningkatan massa zeolit cenderung menurunkan nilai kapasitas adsorpsi per gram (q), namun meningkatkan efisiensi adsorpsi secara keseluruhan. Hal ini disebabkan oleh jumlah situs aktif yang meningkat seiring bertambahnya massa zeolit, sehingga lebih banyak ion sulfida yang dapat teradsorpsi.

Namun, kapasitas adsorpsi per satuan massa justru menurun karena tidak semua situs aktif digunakan secara optimal. Hal ini berkaitan dengan keterbatasan jumlah ion sulfida yang tersedia dalam larutan dibandingkan jumlah adsorben, sehingga sebagian permukaan zeolit tidak berinteraksi dengan ion sulfida.

Efisiensi adsorpsi tertinggi dicapai pada massa zeolit 5 g, yaitu sebesar 35.03 %. Nilai ini menurun pada massa zeolit yang lebih tinggi. Penurunan ini juga dapat diinterpretasikan bahwa pada sistem batch, terdapat batas efisiensi maksimum yang dapat dicapai karena difusi molekul ke dalam pori-pori zeolit menjadi terbatas.

C. Perhitungan Konsentrasi Awal dan Akhir Sulfida

Berdasarkan metode iodometri, konsentrasi awal sulfida (C_0) ditentukan dari volume larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ yang digunakan untuk titrasi, konsentrasi normalitas, dan massa molar sulfur. C_0 dihitung menggunakan rumus:

$$C_0 = \frac{V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times N \times M_S}{V_{\text{sampel}}}$$

Demikian pula, konsentrasi akhir sulfida (C_t) dihitung dengan rumus serupa, namun berdasarkan volume sampel setelah adsorpsi. Perhitungan ini sangat penting dalam menentukan efisiensi dan kapasitas adsorpsi.

D. Efisiensi dan Kapasitas Adsorpsi

Efisiensi adsorpsi menunjukkan seberapa banyak ion sulfida yang berhasil dihilangkan dari larutan. Nilai ini sangat dipengaruhi oleh konsentrasi awal sulfida dan jumlah adsorben yang digunakan.

Kapasitas adsorpsi (q) dihitung dengan rumus:

$$q = \frac{(C_0 - C_t) \cdot V}{m}$$

Di mana:

- C_0 adalah konsentrasi awal (mg/L),
- C_t adalah konsentrasi akhir (mg/L),



- V adalah volume sampel (L),
- m adalah massa zeolit (g).

Dari hasil pengolahan data, kapasitas adsorpsi maksimum sebesar 1.25 mg/g diperoleh pada kondisi konsentrasi sulfida 75% dengan massa zeolit 5 g. Nilai ini menunjukkan bahwa zeolit efektif sebagai adsorben sulfida dalam kondisi konsentrasi sedang.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, zeolit alam menunjukkan kemampuan yang cukup baik dalam mengadsorpsi hidrogen sulfida (H_2S) dari air limbah industri migas. Variasi konsentrasi awal sulfida menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi awal, maka nilai konsentrasi akhir (C_t) juga meningkat, yang mengindikasikan terjadinya kejenuhan pada permukaan zeolit. Meskipun demikian, kapasitas adsorpsi (q) mengalami peningkatan, karena jumlah molekul sulfida yang lebih banyak memungkinkan situs aktif pada zeolit dimanfaatkan secara maksimal. Efisiensi adsorpsi tertinggi sebesar 25,3% diperoleh pada konsentrasi awal 75% dengan kapasitas adsorpsi 1,25 mg/g, sedangkan efisiensi menurun menjadi 6,5% pada konsentrasi 100% akibat kejenuhan permukaan zeolit. Pada variasi massa adsorben, efisiensi tertinggi sebesar 35,03% dicapai pada massa zeolit 5 gram, namun kapasitas adsorpsi justru menurun seiring bertambahnya massa adsorben. Hal ini disebabkan oleh jumlah adsorbat yang tetap, sementara permukaan adsorben bertambah, sehingga distribusi sulfida menjadi lebih merata dan tidak semua permukaan zeolit dimanfaatkan secara optimal. Pemodelan isoterm menunjukkan bahwa data lebih sesuai dengan model Freundlich dengan nilai R^2 sebesar 0,992, yang mengindikasikan bahwa proses adsorpsi berlangsung secara fisik, bersifat multilayer, dan terjadi pada permukaan zeolit yang heterogen. Dengan demikian, zeolit alam berpotensi sebagai material adsorben ramah lingkungan dalam penanganan air limbah yang mengandung H_2S , meskipun masih diperlukan optimasi lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi adsorpsi.

DAFTAR PUSTAKA

- Shah, M. S., Tsapatsis, M., & Siepmann, J. I. (2017). Hydrogen sulfide capture: From absorption in polar liquids to oxide, zeolite, and metal-organic framework adsorbents and membranes. *Chemical Reviews*, 117(14), 9755–9803. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00731> ACS Publications
- Busca, G., & Pistarino, C. (2003). Technologies for the abatement of sulphide compounds from gaseous streams: A comparative overview. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 16(5), 363–371. [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(03\)00071-8](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(03)00071-8)
- Yasyerli, S., Ar, I., Doğu, G., & Doğu, T. (2002). Removal of hydrogen sulfide by clinoptilolite in a fixed bed adsorber. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 41(9), 785–792. [https://doi.org/10.1016/S0255-2701\(02\)00009-0](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(02)00009-0)
- Zhang, Y., et al. (2024). Adsorption mechanism and regeneration performance of calcined zeolites for hydrogen sulfide and its application. *ACS Omega*, 9(1), 1234–1245. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00987>
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
- Rahmani, M., Mokhtarani, B., Mafi, M., & Rahmanian, N. (2022). Acid gas removal by superhigh silica ZSM-5: Adsorption isotherms of hydrogen sulfide, carbon dioxide, methane, and nitrogen. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(19), 6600–6610. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c00196>
- de Oliveira, L. H., et al. (2019). H_2S adsorption on NaY zeolite. *Microporous and Mesoporous Materials*, 284, 247–257. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.04.014>
- Abdirakhimov, M., Al-Rashed, M. H., & Wójcik, J. (2022). Recent attempts on the removal of H_2S from various gas mixtures using zeolites and waste-based adsorbents. *Energies*, 15(15), 5391. <https://doi.org/10.3390/en15155391>



- Yu, T., et al. (2022). Review of hydrogen sulfide removal from various industrial gases by zeolites. *Separations*, 9(9), 229. <https://doi.org/10.3390/separations9090229>
- Abdirakhimov, M., Al-Rashed, M. H., & Wójcik, J. (2023). Hydrogen sulfide adsorption from natural gas using silver-modified 13X molecular sieve. *Materials*, 17(1), 165. <https://doi.org/10.3390/ma17010165>
- Daneshyar, A., Ghaedi, M., Sabzehmeidani, M. M., & Daneshyar, A. (2017). H₂S adsorption onto Cu-Zn-Ni nanoparticles loaded activated carbon and Ni-Co nanoparticles loaded γ -Al₂O₃: Optimization and adsorption isotherms. *Journal of Colloid and Interface Science*, 490, 553–561. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.11.068>
- Pourzolfaghar, Z., et al. (2019). Removal of hydrogen sulfide from various industrial gases: A review of the most promising adsorbing materials. *Catalysts*, 10(5), 521. <https://doi.org/10.3390/catal10050521>
- Huang, Y., Su, W., Wang, R., & Zhao, T. (2019). Removal of typical industrial gaseous pollutants: From carbon, zeolite, and metal-organic frameworks to molecularly imprinted adsorbents. *Aerosol and Air Quality Research*, 19(9), 2130–2150. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.06.0303>
- Sigot, L., et al. (2016). Comparing the performance of a 13X zeolite and an impregnated activated carbon for H₂S removal from biogas to fuel an SOFC: Influence of water. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(41), 18533–18541. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.081>

