

Pengaruh Variasi Zeolit terhadap Adsorpsi H₂S di Kilang PPSDM Migas Cepu: Tinjauan Visual dan Perspektif Fisika Material

Dewi Sekar Wangi¹, Diva Apreliani Wibi², Rieza Mahendra Kusuma³

¹Program Studi Fisika Universitas Negeri Surabaya, Surabaya

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

INFORMASI NASKAH

Diterima : 27 Juli 2025

Direvisi : -

Disetujui : 17 September 2025

Terbit : 30 September 2025

Email korespondensi:

dewi.22064@mhs.unesa.ac.id

Laman daring:

<https://doi.org/10.37525/sp/2025-2/1293>

ABSTRAK

Penelitian ini mengeksplorasi efektivitas zeolit dalam menyerap gas H₂S dari larutan limbah melalui indikator perubahan warna larutan iodin dan tiosulfat. Reaksi redoks antara H₂S dan iodin menyebabkan larutan coklat memudar, sementara titrasi dengan tiosulfat menghilangkan warna biru sebagai bukti bahwa iodin telah sepenuhnya bereaksi. Fenomena ini menunjukkan bahwa H₂S berhasil diadsorpsi oleh zeolit. Mekanisme ini sejalan dengan teori difusi molekuler, di mana molekul H₂S bergerak menuju permukaan dan pori-pori zeolit, kemudian berikatan secara fisik dan kimiawi pada situs aktif di dalam material. Keberhasilan adsorpsi ditandai oleh hilangnya warna-warna indikator secara visual, mengonfirmasi efektivitas difusi dan kapasitas adsorpsi. Hasil menunjukkan bahwa semakin baik difusi dan kontak antara zeolit dan H₂S, semakin cepat dan jelas perubahan warna terjadi. Studi ini menegaskan bahwa metode pengamatan berbasis visual dan reaksi kimia dapat digunakan sebagai pendekatan kualitatif untuk mengamati efisiensi adsorpsi berdasarkan prinsip fisika permukaan dan material berpori.

Kata kunci: Adsorpsi, Difusi Molekuler, H₂S, Indikator Warna, Zeolit.



PENDAHULUAN

Industri minyak dan gas bumi (migas) merupakan sektor vital yang menyumbang kontribusi besar terhadap pemenuhan kebutuhan energi nasional. Namun demikian, proses produksinya tidak lepas dari permasalahan lingkungan, salah satunya adalah terbentuknya limbah cair yang mengandung hidrogen sulfida (H_2S). Hidrogen sulfida merupakan gas beracun, korosif, dan berbau menyengat yang dapat membahayakan kesehatan pekerja, merusak peralatan industri, serta mencemari lingkungan apabila tidak ditangani secara tepat (EPA, 2022). Di kilang PPSDM Migas, H_2S ditemukan dalam limbah cair hasil proses produksi. Jika kandungannya tidak dikendalikan, keberadaan H_2S dapat mencemari air dan tanah di sekitarnya, serta menimbulkan risiko kesehatan bagi masyarakat sekitar kilang.

Salah satu metode yang dinilai efektif untuk mengurangi konsentrasi H_2S adalah melalui proses adsorpsi. Adsorpsi memiliki keunggulan berupa kemudahan dalam pengoperasian, efisiensi tinggi, biaya relatif rendah, serta mampu meminimalkan produk samping yang membahayakan (Ali et al., 2020). Dalam proses ini, keberhasilan penurunan konsentrasi kontaminan sangat dipengaruhi oleh pemilihan material adsorben yang sesuai. Zeolit merupakan salah satu material adsorben alami yang memiliki potensi besar karena strukturnya yang berpori, luas permukaan spesifik yang tinggi, serta kemampuan pertukaran ion yang kuat (Sarma et al., 2018). Selain itu, aktivasi zeolit, baik secara fisika maupun kimia, terbukti dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi terhadap senyawa-senyawa berbahaya seperti H_2S (Choi et al., 2016).

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas zeolit alami teraktivasi dalam menurunkan konsentrasi H_2S dari limbah cair industri migas di kilang PPSDM Migas. Fokus utama penelitian ini adalah menganalisis pengaruh variasi massa dan diameter zeolit terhadap penurunan konsentrasi H_2S , serta melihat keberhasilan adsorpsi melalui perubahan warna indikator (iodin dan tiosulfat) yang digunakan dalam pengujian laboratorium. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengkaji efektivitas adsorpsi secara teoritis dengan pendekatan konsep difusi molekuler dan teori fisika adsorpsi.

Rumusan masalah dalam penelitian ini mencakup tiga hal utama, yaitu, bagaimana perubahan warna larutan indikator menunjukkan keberhasilan adsorpsi dan bagaimana efektivitas zeolit dalam menurunkan konsentrasi H_2S ditinjau dari hasil uji pengukuran serta keterkaitannya dengan teori difusi molekuler dalam fisika. Dengan menjawab rumusan tersebut, penelitian ini bertujuan memberikan gambaran mendalam terkait parameter fisis yang memengaruhi efektivitas adsorpsi H_2S menggunakan zeolit.

Manfaat dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan teknologi pengolahan limbah cair industri migas yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Pemanfaatan zeolit sebagai adsorben alami tidak hanya mengoptimalkan kinerja pengolahan limbah, tetapi juga mendukung efisiensi biaya operasional dan pengurangan dampak lingkungan. Selain itu, hasil penelitian ini juga dapat menjadi dasar dalam mengembangkan implementasi teknologi adsorpsi berbasis zeolit di sektor industri migas Indonesia secara lebih luas.

Ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada penggunaan zeolit alami teraktivasi tanpa pembanding dengan adsorben lain, serta fokus pada variasi massa dan diameter partikel zeolit. Parameter lain seperti waktu kontak, pH, dan suhu dianggap konstan atau standar. Eksperimen dilakukan dalam skala laboratorium menggunakan sampel limbah cair asli dari kilang PPSDM Migas. Evaluasi efektivitas dilakukan berdasarkan pengukuran penurunan konsentrasi H_2S serta pengamatan visual terhadap perubahan warna larutan indikator.

Beberapa studi sebelumnya telah menunjukkan bahwa zeolit memiliki potensi tinggi dalam mengadsorpsi H_2S . Choi et al. (2016) menyatakan bahwa aktivasi zeolit secara kimia dapat meningkatkan kapasitas adsorpsinya terhadap sulfur. Sementara itu, penelitian oleh Sarma et al. (2018) menegaskan bahwa zeolit dengan luas permukaan dan volume pori yang tinggi sangat efektif dalam menangkap molekul-molekul kecil seperti H_2S . Dengan demikian, penelitian ini memperkuat kajian-kajian terdahulu dengan pendekatan eksperimental yang spesifik dan berbasis kondisi aktual di kilang PPSDM Migas.



METODE PENELITIAN

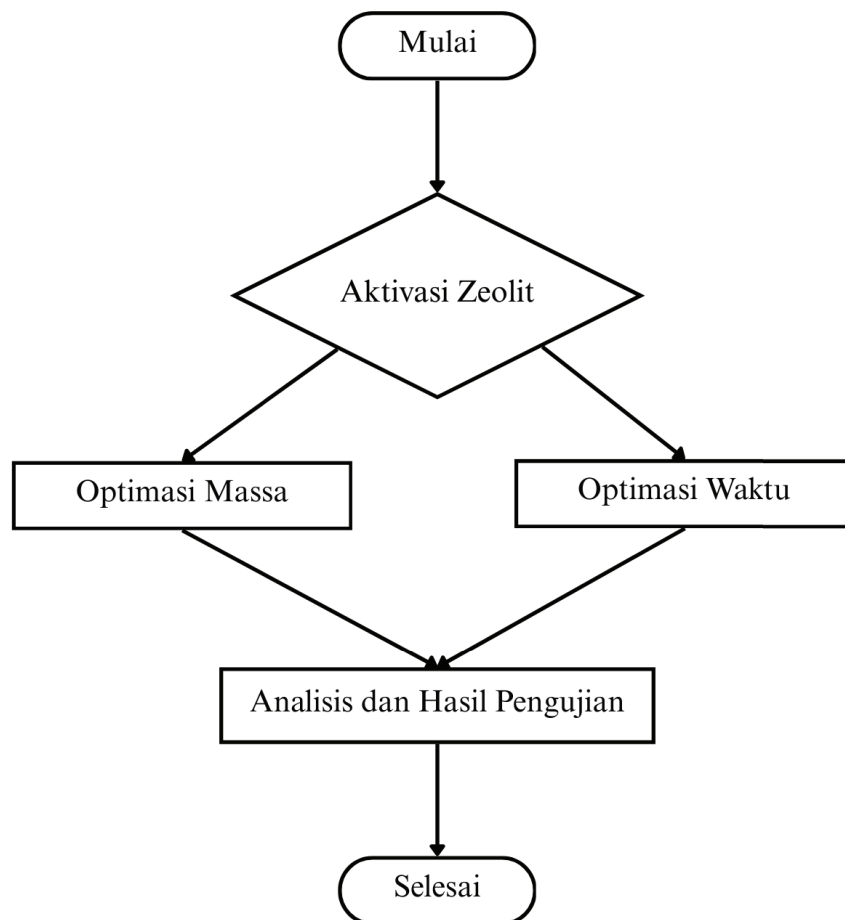
Penelitian ini dilakukan melalui pendekatan eksperimental di laboratorium dengan tahapan-tahapan sistematis yang bertujuan untuk mengaktivasi zeolit serta menguji kemampuannya dalam proses adsorpsi terhadap senyawa sulfida. Aktivitas penelitian ini dilaksanakan selama satu bulan di fasilitas laboratorium milik instansi teknis yang bergerak di bidang pengolahan dan pemanfaatan sumber daya energi.

Prosedur penelitian diawali dengan proses aktivasi zeolit alam melalui perlakuan fisik dan kimia. Sampel zeolit terlebih dahulu dihaluskan dan diseragamkan ukurannya menggunakan metode pengayakan. Tahapan aktivasi dilakukan dengan cara mencampurkan zeolit dengan larutan HCl dan aquades, kemudian diaduk dengan pengaduk magnetik dalam waktu tertentu, dilanjutkan proses pencucian dan penyaringan. Sampel kemudian dikeringkan dalam furnace bersuhu tinggi dan disimpan dalam kondisi kering untuk menjaga kestabilan struktur aktifnya.

Penelitian ini juga mencakup proses optimasi parameter penting yang mempengaruhi kinerja adsorpsi, antara lain variasi massa adsorben dan waktu interaksi. Berbagai variasi massa zeolit digunakan terhadap volume limbah tertentu untuk menentukan massa optimum yang memberikan efisiensi adsorpsi tertinggi. Sementara itu, uji waktu dilakukan untuk mengetahui waktu kontak optimum antara adsorben dan larutan sampel.

Seluruh hasil dari proses aktivasi dan pengujian kemudian dianalisis secara kuantitatif guna mengevaluasi efektivitas adsorpsi zeolit aktif terhadap kandungan senyawa H_2S dalam sampel. Metode evaluasi dilakukan dengan pendekatan perbandingan hasil karakterisasi antara perlakuan dan kontrol, serta memperhatikan perubahan parameter seperti pH dan kandungan ion dalam larutan.

Untuk memperjelas alur proses yang dilakukan dalam penelitian ini, berikut disajikan diagram alir proses penelitian:



Gambar 1. Diagram alir penelitian

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

A. *Hidrogen Sulfida (H₂S)*

Hidrogen sulfida (H₂S) adalah gas anorganik beracun yang tidak berwarna dan memiliki bau khas seperti telur busuk. Gas ini terbentuk secara alami dari dekomposisi senyawa organik yang mengandung sulfur, serta dihasilkan dalam berbagai proses industri seperti kilang minyak dan pengolahan limbah (Speight, 2014). H₂S bersifat polar, memiliki bentuk molekul bengkok, dan tergolong asam lemah yang mudah larut dalam air, menghasilkan larutan sedikit asam melalui dua tahap ionisasi (Zumdahl, 2014; Stumm & Morgan, 1996). Dalam air, H₂S menunjukkan kelarutan moderat sekitar 2,6 g/L pada 20 °C dan bersifat reduktor kuat yang dapat bereaksi dengan logam berat serta oksidator lainnya (Greenwood & Earnshaw, 1997).

Larutan H₂S berdampak serius terhadap lingkungan dan kesehatan. Di perairan, senyawa ini sangat toksik terhadap biota akuatik, bahkan pada konsentrasi <1 mg/L dapat menyebabkan kematian organisme (Camargo & Alonso, 2006). Pada manusia, paparan H₂S dalam bentuk gas atau larutan dapat menyebabkan iritasi, gangguan pernapasan, hingga kematian pada paparan tinggi. Konsentrasi di atas 500 ppm dapat bersifat fatal dalam waktu singkat (WHO, 2003; OSHA, 2023).

Dalam industri minyak dan gas, termasuk kilang PPSDM Migas, H₂S muncul sebagai kontaminan dalam limbah cair akibat proses pemisahan fraksi sulfur. H₂S dalam limbah ini bersifat korosif dan mengganggu proses biologis di IPAL, sehingga diperlukan pengolahan khusus sebelum dibuang ke lingkungan. Salah satu metode yang efektif adalah adsorpsi menggunakan zeolit, karena material ini memiliki kemampuan selektif untuk mengikat molekul H₂S dari larutan (Ali et al., 2020).

B. *Adsorpsi*

Adsorpsi merupakan proses penyerapan molekul atau ion dari suatu larutan ke permukaan padat, di mana zat yang diserap disebut adsorbat dan zat penyerap disebut adsorben. Proses ini melibatkan interaksi fisik maupun kimia antara permukaan adsorben dan molekul adsorbat, serta dipengaruhi oleh struktur pori, luas permukaan, konsentrasi larutan, dan suhu (Sutia Ayu et al., 2022; Arief, 2017).

Secara umum, adsorpsi terbagi menjadi dua jenis, yaitu adsorpsi fisik dan adsorpsi kimia. Adsorpsi fisik terjadi akibat gaya Van der Waals yang relatif lemah dan bersifat reversibel, sedangkan adsorpsikimia melibatkan pembentukan ikatan kimia antara adsorben dan adsorbat, sehingga bersifat lebih kuat dan spesifik (Indriana, 2022).

Proses adsorpsi digunakan secara luas dalam pengolahan limbah cair karena kemampuannya untuk mengikat kontaminan secara selektif. Adsorben yang memiliki struktur berpori, seperti zeolit, sangat efektif karena menawarkan luas permukaan internal yang besar untuk interaksi molekuler.

C. *Zeolit*

Zeolit adalah mineral aluminosilikat alami yang terbentuk dari endapan abu vulkanik, memiliki struktur kristal berongga dan berpori yang dapat menyerap, menukar ion, dan berfungsi sebagai katalis. Struktur ini menjadikan zeolit efektif sebagai adsorben, penukar ion, serta penyaring molekuler dalam berbagai aplikasi lingkungan dan industri (Mursi Sutarti, 1994; Barrer, 1982).

Sifat utama zeolit meliputi; Dehidrasi (Zeolit melepaskan molekul air melalui pemanasan, menciptakan pori-pori aktif untuk penyerapan molekul lain (Barrer, 1982)); Penyerapan (Setelah dikeringkan, zeolit mampu menyerap gas atau cairan secara selektif dalam sistem berair atau gas (Khairinal, 2000)); Pertukaran ion (Ion-ion dalam rongga zeolit dapat digantikan dengan ion lain berdasarkan ukuran, muatan, dan jenis zeolit, sehingga berguna dalam pengolahan air dan penghilangan kontaminan (Bambang et al., 1995)); Katalisis (Zeolit dapat mempercepat reaksi kimia tanpa berubah, berkat struktur porinya yang memungkinkan selektivitas molekul (molecular sieve)); Pemisah molekul (Zeolit mampu memisahkan senyawa berdasarkan ukuran dan polaritas, menjadikannya bahan yang ideal untuk pemurnian dan pengolahan limbah (Bambang et al., 1995)). Untuk meningkatkan efektivitasnya dalam proses adsorpsi, zeolit umumnya perlu melalui proses aktivasi atau modifikasi untuk memperbesar daya serap, daya tukar ion, dan aktivitas katalitiknya (Mursi Sutarti, 1994).

Aktivasi zeolit dilakukan untuk meningkatkan kapasitas adsorpsinya melalui dua metode utama: aktivasi fisik dan aktivasi kimia. Aktivasi fisik dilakukan dengan pemanasan pada suhu 300–400 °C



guna menghilangkan air dalam pori kristal, memperluas luas permukaan, dan membuka struktur berpori. Proses ini dapat dilakukan menggunakan oven laboratorium atau tungku vakum pada skala industri (Bambang et al., 1995).

Sementara itu, aktivasi kimia dilakukan dengan merendam zeolit dalam larutan asam kuat (seperti H_2SO_4) atau basa (seperti $NaOH$). Perlakuan ini bertujuan membersihkan pengotor, memperbaiki struktur kristal, serta memperbesar ukuran pori. Setelah perendaman, zeolit dicuci hingga netral dan dikeringkan sebelum digunakan dalam proses adsorpsi (Mursi Sutarti, 1994).

Massa zeolit berpengaruh signifikan terhadap kapasitas adsorpsi total. Semakin besar massa zeolit yang digunakan, semakin banyak situs aktif yang tersedia untuk menangkap molekul H_2S , karena luas permukaan dan jumlah pori aktif meningkat. Namun, setelah mencapai titik jenuh, peningkatan massa tidak lagi memberi pengaruh signifikan terhadap efisiensi adsorpsi, sebagaimana dijelaskan dalam isoterma Langmuir (Microporous and Mesoporous Materials, 2019).

Adsorpsi H_2S oleh zeolit terjadi melalui tiga mekanisme utama: (1) adsorpsi fisik, berupa interaksi awal melalui gaya van der Waals; (2) adsorpsi kimia, melibatkan ikatan antara H_2S dan kation logam (misalnya Na^+ atau Li^+) dalam struktur zeolit; serta (3) reaksi kimia, di mana H_2S dapat teroksidasi menjadi sulfur elemental di dalam pori-pori zeolit (ResearchGate, 2024).

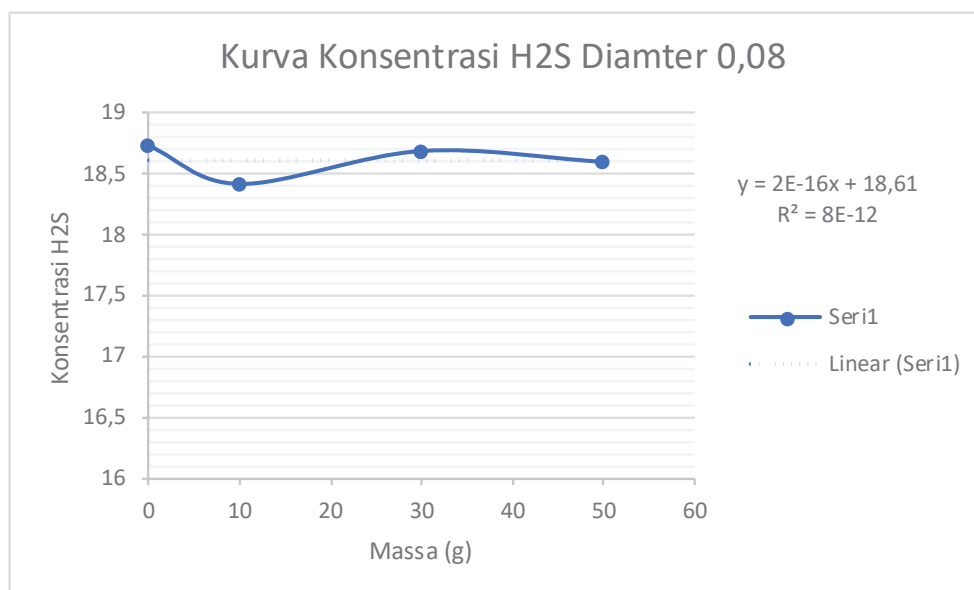
Reaksi H_2S dengan iodin (I_2) dimanfaatkan sebagai metode titrasi untuk mendeteksi dan mengevaluasi efisiensi adsorpsi. Dalam larutan asam, H_2S mereduksi I_2 menjadi ion iodida (I^-) dan sulfur elemental. Sisa iodin yang tidak bereaksi kemudian dititrasi menggunakan larutan natrium tiosulfat ($Na_2S_2O_3$). Semakin sedikit iodin yang tersisa, semakin tinggi efisiensi adsorpsi H_2S pada zeolit (Pawlak & Pawlak, 1999).

Tabel 1. Hasil Uji Adsorpsi H_2S Menggunakan Zeolit Dengan Variasi Ukuran Sampel dan Pengamatan Titrasi Iodin-Thiosulfat

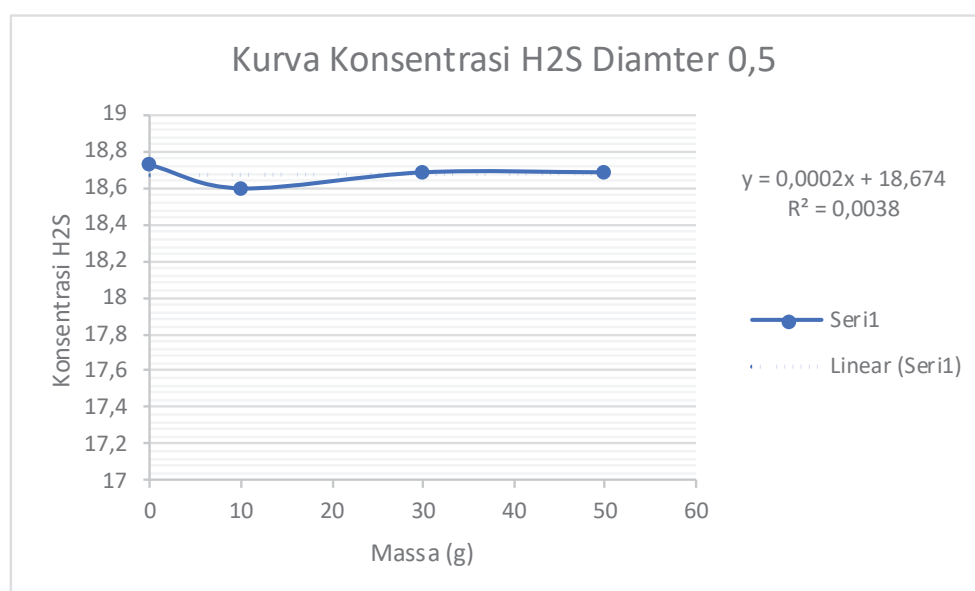
Mas- sa (g)	Diame- ter (cm)	Volume thio- sulfate (ml)	Total tetesan thiosul- fat	Enda- pan	Warna larutan	Warna iodin	Warna biru mun- cul	Warna hilang setelah titrasi	Bau H_2S berku- rang
Tan- pa Zeo- lit	-	0,18	2	Sedikit	Keruh	Pudar	YA	YA	YA
10	0,08	0,26	3	Sedikit	Bening	Pudar	YA	YA	YA
	0,5	0,32	4	Sedikit	Bening	Pudar	YA	YA	YA
30	0,08	0,2	3	Ada	Bening	Pudar	YA	YA	YA
	0,5	0,2	1	Banyak	Bening	Sedikit pudar	YA	YA	YA
50	0,08	0,24	3	Banyak	Bening	Pudar	YA	YA	YA
	0,5	0,2	3	Ada banyak	Keruh	Pudar	YA	YA	YA

Tabel 2. Konsentrasi H_2S

Massa (g)	Diameter (cm)	Konsentrasi S^{2-} (mg/L)	Konsentrasi H_2S (mg/L)
Tanpa Zeolit		17.63	18.73
10	0,08	17.33	18.42
	0,5	17.50	18.60
30	0,08	17.58	18.69
	0,5	17.58	18.69
50	0,08	17.50	18.60
	0,5	17.58	18.69



Gambar 2. Kurva konsentrasi H₂S diameter 0,08



Gambar 3. Kurva konsentrasi H₂S diameter 0,5

Penelitian menunjukkan bahwa variasi massa (10, 30, 50 gram) dan diameter partikel zeolit (0,08 cm dan 0,5 cm) tidak memberikan penurunan konsentrasi H₂S yang signifikan dalam larutan limbah kilang PPSDM Migas Cepu. Pada diameter 0,08 cm, konsentrasi H₂S justru sedikit meningkat seiring bertambahnya massa zeolit. Tren serupa juga terjadi pada partikel berdiameter 0,5 cm, dengan nilai regresi linier (R^2) sangat rendah, menandakan hubungan yang lemah antara massa zeolit dan konsentrasi H₂S. Hasil ini mengindikasikan bahwa efektivitas adsorpsi tidak hanya ditentukan oleh massa dan ukuran zeolit, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh faktor kinetika dan kondisi sistem, seperti waktu kontak, distribusi zeolit, serta kemungkinan aglomerasi partikel halus atau hambatan difusi ke dalam pori zeolit.

Hasil Perubahan warna larutan (iodin dan thiosulfat) menunjukkan keberhasilan absorpsi H₂S, menunjukkan bahwa semakin besar massa zeolit dan semakin kecil ukuran partikel zeolit, semakin efektif penurunan konsentrasi H₂S dalam larutan. Hal ini dibuktikan dengan perubahan warna larutan menjadi keruh, pudarnya warna coklat iodin, dan hilangnya warna biru setelah titrasi tiosulfat, yang



menandakan H₂S berhasil terserap. Zeolit dengan massa 50 g dan ukuran partikel 0,08 cm menunjukkan efektivitas adsorpsi tertinggi. Ini menunjukkan bahwa luas permukaan dan jumlah situs aktif sangat berperan dalam keberhasilan penyerapan H₂S.

Penelitian menunjukkan bahwa zeolit efektif menurunkan konsentrasi H₂S dalam larutan. Sampel tanpa zeolit memiliki konsentrasi H₂S tertinggi (18,73 mg/L), sementara penambahan zeolit dengan massa lebih besar (50 gram) dan ukuran partikel lebih kecil (0,08 cm) menghasilkan penurunan konsentrasi H₂S yang signifikan. Volume titrasi yang meningkat juga menandakan jumlah H₂S yang terserap makin besar. Efektivitas penurunan H₂S tidak hanya bergantung pada massa zeolit, tetapi lebih dipengaruhi oleh ukuran partikel, luas permukaan, dan struktur pori zeolit. Zeolit dengan ukuran partikel kecil memiliki rasio luas permukaan lebih besar, yang memperbanyak situs aktif untuk penyerapan H₂S. Penelitian juga menunjukkan adanya titik jenuh adsorpsi: setelah massa zeolit mencapai 50 g, peningkatan jumlah zeolit tidak lagi signifikan menurunkan konsentrasi H₂S. Perubahan warna biru larutan iodimetri menjadi tidak berwarna mengindikasikan bahwa H₂S telah berhasil dihilangkan oleh zeolit. Secara keseluruhan, zeolit bekerja secara efektif melalui mekanisme fisika (adsorpsi dan difusi). Hasil ini menegaskan bahwa pendekatan berbasis fisika material dan dinamika molekul sangat relevan untuk mengoptimalkan pengolahan limbah yang mengandung H₂S.

KESIMPULAN

Perubahan warna larutan iodin dan tiosulfat terbukti menjadi indikator penting dalam mengamati keberhasilan adsorpsi gas H₂S oleh zeolit. Pudarnya warna coklat dari larutan iodin menunjukkan bahwa iodin telah bereaksi dengan H₂S terlarut, sementara hilangnya warna biru setelah titrasi tiosulfat menandakan bahwa iodin telah habis bereaksi—indikasi bahwa H₂S telah sepenuhnya terserap oleh zeolit. Fenomena ini berkaitan erat dengan teori difusi molekuler dan adsorpsi dalam Fisika, di mana molekul H₂S berdifusi menuju permukaan dan ke dalam pori-pori zeolit, lalu berinteraksi dengan situs aktif melalui gaya van der Waals dan ikatan kimia. Semakin baik difusi dan keterikatan molekul H₂S pada zeolit, semakin cepat warna larutan berubah, menunjukkan efisiensi proses adsorpsi. Hasil ini menegaskan bahwa prinsip-prinsip dasar fisika material, khususnya pada permukaan berpori dan mekanisme difusi, sangat menentukan keberhasilan penghilangan H₂S dari larutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, I., Asim, M. and Khan, T. A., 2020. *Low-cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater*. Journal of Environmental Management, 90(4), pp.2313–2342.
- Arief, M., 2017. *Adsorpsi dalam Perspektif Fisika dan Lingkungan*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Atkins, P. and de Paula, J., 2010. *Atkins' Physical Chemistry*. 9th ed. Oxford: Oxford University Press.
- Bambang, P., et al., 1995. *Zeolit dan Aplikasinya dalam Industri dan Lingkungan*. Jakarta: Penerbit ITB.
- Barrer, R. M., 1982. *Zeolites and Clay Minerals as Sorbents and Molecular Sieves*. London: Academic Press.
- Camargo, J.A. and Alonso, Á., 2006. *Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment*. Environment International, 32(6), pp.831–849.
- Greenwood, N.N. and Earnshaw, A., 1997. *Chemistry of the Elements*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Indriana, D., 2022. *Prinsip Dasar Adsorpsi dalam Lingkungan dan Energi*. Surabaya: CV. Literasi Nusantara.
- Khairinal, 2000. *Pemanfaatan Zeolit Alam sebagai Adsorben dalam Pengolahan Limbah Cair*. Jakarta: Bumi Aksara.
- Mursi Sutarti, 1994. *Karakteristik dan Aktivasi Zeolit Alam Indonesia*. Jakarta: LIPI Press.
- Speight, J.G., 2014. *Gas Processing: Environmental Aspects and Methods*. Waltham: Gulf Professional Publishing.
- Stumm, W. and Morgan, J.J., 1996. *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural*

- Waters*. 3rd ed. New York: Wiley-Interscience.
- Sutia Ayu, et al., 2022. *Teknik Adsorpsi untuk Pengolahan Limbah Cair Industri*. Bandung: UNPAD Press.
- WHO (World Health Organization), 2003. *Hydrogen Sulfide: Human Health Aspects*. [online] Geneva: WHO. Available at: <https://www.who.int> [Accessed 13 July 2025].
- Yang, R.T., 2003. *Adsorbents: Fundamentals and Applications*. New Jersey: Wiley-Interscience.
- Yuan, W., Zhang, H. and Wu, J., 2007. *Modified zeolite with chitosan for enhanced removal of metal ions*. *Journal of Hazardous Materials*, 147(1), pp.401–405.

