

# **Zeolit Alam Termodifikasi sebagai Solusi Cerdas Pencemaran Udara Akibat Emisi Gas Buang Berbahaya**

**Septina Praditia Malik, Sri Kadarwati**

Program Studi Kimia, FMIPA, Universitas Negeri Semarang  
srika@mail.unnes.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.15294/ka.v5i1.598>  
P-ISSN 2961-7448

## **ABSTRAK**

Pencemaran udara masih menjadi masalah serius yang dihadapi oleh Negara Indonesia. Pemerintah telah melaksanakan berbagai macam tindakan untuk menyelesaikan masalah tersebut, antara lain memberlakukan uji emisi kendaraan bermotor, penerapan sistem *Work From Home* (WFH) bagi pegawai di daerah Jabodetabek, penyemprotan jalan raya, penutupan usaha yang berpotensi memperparah pencemaran udara, pembuatan hujan buatan, hingga penyemprotan air dari atas gedung-gedung tinggi. Namun, upaya tersebut masih belum mampu mengatasi masalah pencemaran udara yang terjadi. Oleh sebab itu, dibutuhkan cara lain untuk mengatasinya yaitu dengan cara adsorpsi atau penyerapan menggunakan zeolit alam termodifikasi. Artikel ini membahas tentang penggunaan zeolit alam dan modifikasinya sebagai adsorben emisi gas buang berbahaya dengan tujuan untuk menemukan dan memberikan solusi atas masalah pencemaran udara yang terjadi. Modifikasi zeolit dapat dilakukan dengan senyawa amina, silika, logam, senyawa organik dan pemberian suasana asam. Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, zeolit memiliki kemampuan sebagai adsorben gas buang berbahaya. Hal ini dikarenakan zeolit memiliki permukaan berpori. Modifikasi zeolit akan meningkatkan kemampuan adsorpsinya dalam menjerap gas buang berbahaya penyebab pencemaran udara.

**Kata kunci:** zeolit alam, modifikasi, pencemaran udara, emisi gas buang, adsorben

## PENDAHULUAN

Berdasarkan data Worldometer, jumlah penduduk di dunia pada tahun 2023 sebesar 8,05 miliar jiwa. Pada tahun tersebut, Indonesia menempati peringkat keempat kategori negara dengan jumlah penduduk terbanyak di dunia. Penduduk Indonesia pada saat itu berjumlah 277,7 juta jiwa (Annur, 2023). Berdasarkan Badan Pusat Statistika (BPS) jumlah penduduk di Indonesia dari tahun 2022 - 2023 mengalami kenaikan dari 275.773,8 ribu jiwa menjadi 278.696,2 ribu jiwa (Badan Pusat Statistika, 2023). Akibatnya, jumlah kebutuhan masyarakat terhadap kendaraan bermotor sebagai alat transportasi juga meningkat. Berdasarkan laporan BPS, pada tahun 2022 kendaraan bermotor di Indonesia berjumlah 148.212.865 unit (Finaka, 2023).

Jumlah kendaraan bermotor yang semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk menyebabkan polusi udara semakin meningkat dan kualitas udara menjadi menurun. Hal ini dikarenakan asap kendaraan bermotor mengandung gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>), nitrogen oksida (NO), hidrokarbon dan timbal (Pb) yang merupakan gas pencemar. Selain itu, emisi gas berbahaya dari asap kendaraan bermotor juga menyebabkan munculnya berbagai masalah kesehatan. Menurut Ketua Komite Penanggulangan Penyakit Respirasi dan Polusi Udara (PPRPU), Agus Dwi Susanto, masalah Infeksi Saluran Pernafasan Akut (ISPA) di Jabodetabek meningkat selama bulan Januari-Juli tahun 2023 yaitu mencapai 100.000 kasus (Komariah, 2023). Selain itu, berdasarkan penelitian Organisasi Kesehatan Global Vital Strategis dan Dinas Lingkungan Hidup DKI Jakarta yang dilakukan pada 27 Februari 2023, kualitas udara yang buruk di daerah Jakarta menyebabkan sekitar 10.000 orang meninggal dan 5.000

orang dirawat akibat penyakit kardiorespirasi (Hairani, 2023). Oleh sebab itu, masalah pencemaran udara harus segera ditangani, salah satunya dengan cara penyerapan menggunakan material zeolit alam. Zeolit merupakan salah satu bahan galian mineral yang ditemukan di alam (Kusdarto, 2008). Berdasarkan buku Neraca Sumber Daya dan Cadangan Mineral Batubara dan Panas Bumi Indonesia Tahun 2022 karya Dudi Hermawan, Santia Ardi Mustofa, Lano Aditya Permana, Winda Nirmala, dan Tria Selvi Rustina, jumlah sumber daya zeolit ternilai sebesar 38.826.791 ton dan cadangan terbukti sebesar 1.201.575 ton. Zeolit merupakan material berpori yang banyak dimanfaatkan sebagai material penyerap (adsorben), fotokatalis dan katalis perengkah. Namun, pemanfaatan zeolit sebagai adsorban masih banyak dilakukan dalam bentuk murni (tidak termodifikasi). Padahal rata-rata zeolit memiliki ukuran yang relatif kecil yaitu 1-10 Å. Akibatnya, proses difusi polutan ke sisi aktif akan terganggu apabila zeolit dimanfaatkan secara langsung. Oleh sebab itu, zeolit perlu diaktivasi dan dimodifikasi terlebih dahulu. Modifikasi akan meningkatkan kemampuan zeolit dalam mengadsorpsi suatu zat. Oleh sebab itu, modifikasi zeolit sangat menarik untuk dipelajari, khususnya terkait pemanfaatannya sebagai adsorben dalam menyelesaikan masalah pencemaran udara akibat emisi gas buang berbahaya.

## METODE

Artikel ini membahas tentang penggunaan zeolit alam dan modifikasinya sebagai adsorben emisi gas buang berbahaya dengan tujuan untuk menemukan dan memberikan solusi atas masalah pencemaran udara yang terjadi.

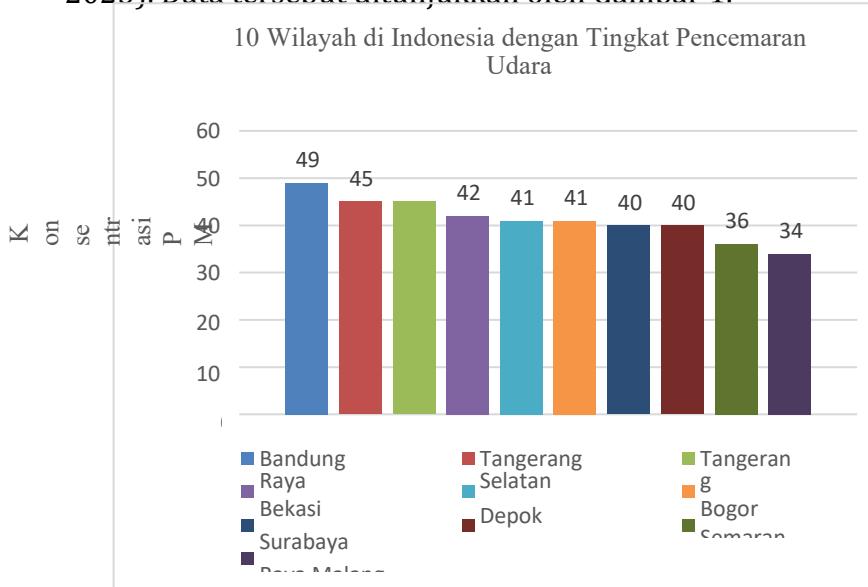
## PEMBAHASAN

### STATUS PENCEMARAN UDARA KOTA-KOTA BESAR DI INDONESIA

Pencemaran udara merupakan salah satu permasalahan

global yang umumnya ditandai dengan adanya penurunan kualitas udara. Pencemaran udara telah menjadi masalah serius yang perlu mendapatkan perhatian khusus, termasuk di Indonesia. Hal ini dibuktikan dengan adanya laporan Indeks Kualitas Udara Kehidupan (AQI) yang menyatakan bahwa Indonesia merupakan satu dari enam negara (China, Pakistan, India, Nigeria, dan Bangladesh) yang menyumbangkan pencemaran udara terbesar pada tahun 2023 yaitu mencapai 75% dari total beban pencemaran udara secara global (Isyana, 2023). Adapun penetapan kota atau wilayah di Indonesia yang menduduki tingkat pencemaran udara tertinggi pada bulan November tahun 2023 dapat ditinjau berdasarkan konsentrasi *Particulate Matter* (PM 2,5) dan skor Indeks Kualitas Udara (AQI) dari AQ-AIR.

Berdasarkan konsentrasi *Particulate Matter* (PM 2,5) terdapat 10 wilayah yang menduduki tingkat pencemaran udara tertinggi di Indonesia yaitu wilayah Bandung Raya ( $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Tangerang Selatan ( $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Tangerang ( $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Bekasi ( $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Depok ( $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Bogor ( $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Surabaya Raya ( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), DKI Jakarta ( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Semarang ( $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) dan Malang Raya ( $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (Annur, 2023). Data tersebut ditunjukkan oleh Gambar 1.



**Gambar 1. Tingkat Konsentrasi PM 2,5 10 Wilayah di Indonesia dengan Tingkat Pencemaran Tertinggi**

Berdasarkan *World Health Organization* (WHO), standar kualitas udara yang baik dalam 24 jam rata-rata mengandung PM 2,5 dengan konsentrasi 0-5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Fadhlurrahman, 2023), sedangkan berdasarkan Indeks Kualitas Udara Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (US-EPA) kualitas udara yang baik mengandung PM 2,5 dengan konsentrasi 0-2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Selain itu, menurut US-EPA kualitas udara moderat mengandung PM 2,5 pada rentang 12,1-35,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , kualitas udara tidak sehat bagi kelompok manusia yang sensitif mengandung PM 2,5 pada rentang 35,5-55,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , kualitas udara tidak sehat berada pada rentang PM 2,5 150-250,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , dan kualitas udara beracun berada pada rentang PM 2,5 > 250,4 (Annur, 2023). Oleh sebab itu, wilayah Bandung Raya hingga Semarang berada pada kategori kualitas udara tidak sehat sedangkan Malang Raya berada pada status kualitas udara moderat.

Berdasarkan skor Indeks Kualitas Udara (AQI) terdapat 8 kota di Indonesia dengan tingkat pencemaran udara tertinggi yang ditunjukkan oleh Tabel 1 (Sulistya, 2024).

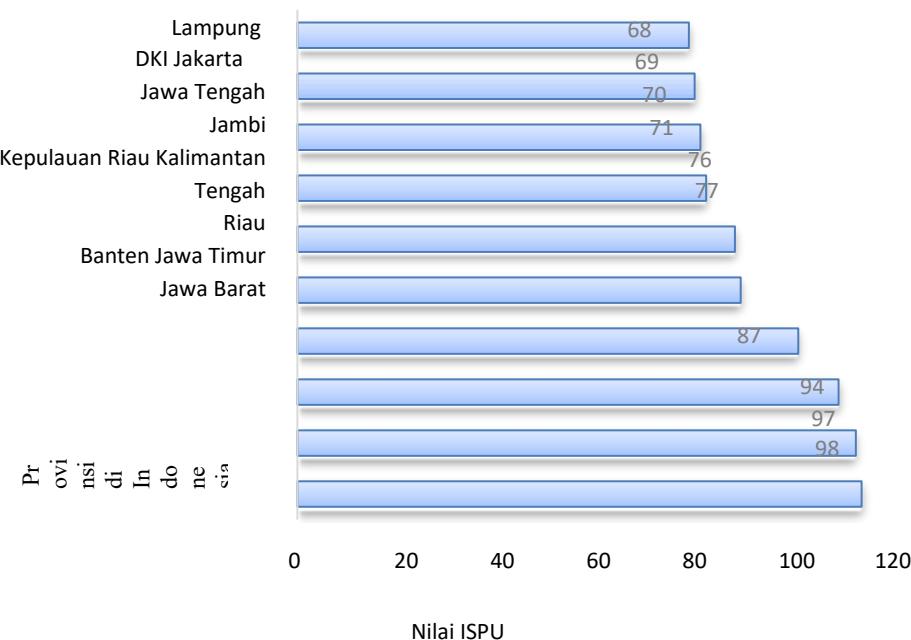
**Tabel 1. 8 Kota dengan Tingkat Pencemaran Udara Tertinggi di Indonesia pada Tanggal 19 Februari 2024.**

No.	Kota	Nilai AQI
1	Bandung	149
2	Serang	115
3	Surabaya	106
4	Tangerang Selatan	102
5	Jambi	90
6	Bogor	86
7	Pekanbaru	84
8	Medan	83

(Sumber: [DataIndonesia.id](https://www.dataindonesia.id))

Pada tanggal 26 Maret 2024, berdasarkan Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU) Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) tercatat terdapat 10 daerah dengan nilai ISPU tertinggi di Indonesia. 10 daerah tersebut meliputi: Jawa Barat, Jawa Timur, Banten, Riau, Kalimantan Tengah, Kepulauan Riau, Jambi, Jawa Tengah, DKI Jakarta dan Lampung sebagaimana yang ditunjukkan oleh Gambar 2 (Fadhlurrahman, 2024).

10 Provinsi dengan Nilai ISPU Tertinggi di Indonesia



Gambar 2. 10 Provinsi di Indonesia dengan Indeks Kualitas Udara terburuk pada Selasa, 26 Maret 2024  
(Sumber: Databoks)

Ada berbagai faktor penyebab pencemaran udara mulai dari aktivitas manusia, industri, hingga bencana alam. Aktivitas manusia yang dapat memicu terjadinya pencemaran udara, antara lain penggunaan kendaraan bermotor berbahan bakar fosil, pembakaran sampah di tempat terbuka, pembakaran hutan, dan penggunaan kayu bakar untuk

memasak. Asap kendaraan bermotor mengandung polutan berbahaya, seperti: gas karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO), senyawa hidrokarbon, karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), dan partikel-partikel berbahaya lainnya akibat pembakaran bahan bakar fosil dari mesin kendaraan bermotor. Berdasarkan sumber-sumber pencemaran udara tersebut, emisi gas buang kendaraan bermotor menjadi kontributor terbesar dalam kasus pencemaran udara dengan persentase 60-70%, kemudian disusul dengan emisi gas buang dari industri dengan persentase 10-15% (Puspitawati, 2014). Konsentrasi gas buang kendaraan bermotor di udara dipengaruhi oleh pertumbuhan penduduk. Semakin banyak jumlah penduduk maka kebutuhan kendaraan bermotor akan semakin banyak. Hal ini dikarenakan kendaraan bermotor telah menjadi kebutuhan pokok bagi masyarakat untuk memudahkan mereka menjalankan aktivitas sehari-hari. Oleh sebab itu, emisi gas buang dari kendaraan bermotor akan menjadi meningkat. Kemudian, pembakaran sampah juga menghasilkan gas-gas berbahaya, seperti: karbon monoksida, karbon dioksida, klorin, benzopirena, hidrokarbon, serta partikel debu atau partikel berbahaya lain yang biasa dikenal sebagai *particulate matter* (PM 2,5). Pembakaran hutan baik secara alami maupun disengaja oleh manusia juga dapat berkontribusi dalam pencemaran udara. Hal ini dikarenakan asap dari hasil pembakaran hutan mengandung gas sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>), karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>), senyawa hidrokarbon dan ozon (O<sub>3</sub>). Selain itu, penggunaan kayu bakar sebagai bahan bakar saat memasak juga dapat menyebabkan pencemaran udara karena berdasarkan *National Institute for Occupational Safety and Health*, asap pembakaran kayu menghasilkan gas nitrogen dioksida, formaldehida dan gas-gas lain yang bersifat karsinogenik (Harjanto *et al.*, 2022). Di sisi lain, kegiatan industri atau pabrik juga menjadi salah satu penyumbang pencemaran udara. Rata-rata emisi gas buang industri yang berasal dari pembakaran bahan bakar, seperti: batu bara dan

minyak bumi, atau proses kimia tertentu selama proses produksinya akan dibuang ke udara melalui cerobong asap. Bencana alam, seperti gunung meletus juga dapat menyebabkan pencemaran udara. Pada saat gunung berapi meletus, ia akan mengeluarkan abu dan gas vulkanik yang mengandung 1-40% gas CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>S, radon, hidrogen fluorida sebesar < 1 ppm, silika, hidrogen terhalogenasi, belerang sebesar 2-35%, hidrogen klorida sebesar 1-10%, dan hidrogen bromida sebesar 10<sup>-6</sup> bagian/volume (Irawan, 2019). Selain itu, erupsi gunung berapi juga menghasilkan gas sulfur yang akan naik ke atmosfer dan menimbulkan dampak negatif terhadap kualitas udara di lingkungan sekitar. Pencemaran udara baik akibat emisi gas buang dari kendaraan bermotor, industri, maupun bencana alam dapat menimbulkan berbagai macam dampak buruk bagi lingkungan sekitar dan kesehatan. Bagi lingkungan, pencemaran udara menyebabkan turunnya kualitas udara di lingkungan sekitar dan terjadinya pemanasan global (*global warming*). Hal ini dikarenakan sebagian gas penyebab pencemaran udara merupakan gas rumah kaca, seperti CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO, CH<sub>4</sub>, dan sebagainya. Gas rumah kaca tersebut berperan dalam menjaga suhu bumi dengan cara memerangkap panas. Semakin banyak konsentrasi gas rumah kaca maka panas yang diserap akan semakin banyak sehingga konsentrasi gas rumah kaca dalam jumlah yang berlebihan dapat menyebabkan pemanasan global. Adanya emisi gas berbahaya di udara dengan kandungan gas sulfur dioksida dan nitrogen dioksida dalam jumlah berlebihan juga dapat memicu terjadinya hujan asam yang dapat merusak ekosistem perairan dan pertumbuhan tanaman. Dampak negatif lain dari adanya emisi gas buang adalah terjadinya eutrofikasi. Eutrofikasi merupakan kondisi di mana air mengandung nitrogen dan fosfor dalam jumlah yang besar. Akibatnya, permukaan perairan menjadi tertutup alga, muncul bau tidak sedap, dan estetika lingkungan perairan menjadi hilang. Dampak negatif dari pencemaran udara yang

tak kalah penting adalah penipisan lapisan ozon yang berperan sebagai pelindung bumi dari paparan sinar ultraviolet.

Bagi kesehatan manusia, pencemaran udara dapat menimbulkan berbagai macam penyakit pernapasan, seperti: Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA), sesak nafas, asfiksia, bronkritis, dan kanker paru-paru. Selain itu, pencemaran udara juga dapat menyebabkan penglihatan kabur, iritasi mata, iritasi kulit, sakit kepala, mual, muntah, pusing, hingga keracunan. Adanya logam berat, seperti timbal (Pb), pada udara juga dapat menyebabkan penumpukan dan penyumbatan peredaran darah, gangguan fungsi sel, dan bahkan kematian. Adapun tindakan yang dilaksanakan oleh pemerintah dalam rangka menyelesaikan masalah pencemaran udara, antara lain:

1. Uji Emisi Kendaraan Bermotor

Uji emisi bertujuan untuk mengetahui kinerja dan efisiensi mesin kendaraan bermotor. Setiap kendaraan bermotor yang melintas dimintai bukti lulus uji emisi kendaraan bermotor. Apabila kendaraan yang digunakan tidak lulus uji emisi maka pengendara dikenai denda sebesar Rp 250.000 untuk sepeda motor dan Rp 500.000 untuk mobil. Uji emisi telah diterapkan di wilayah DKI Jakarta pada tahun 2023 oleh Polda Metro Jaya dan Dinas Lingkungan Hidup (BBC News, 2023).

2. *Work From Home* (WFH)

Pemerintah Provinsi DKI Jakarta melakukan uji coba *Work From Home* (WFH) khusus pegawai di lingkungan Pemerintahan Provinsi (Pemprov) DKI Jakarta pada tanggal 21 Agustus 2023. Pada saat itu, 50% pegawai bekerja secara WFH dan 50% pegawai bekerja di kantor. Namun, kebijakan ini belum mampu mengurangi pencemaran udara yang dibuktikan dengan skor Indeks Kualitas Udara di Jakarta yang masih berada pada kategori tidak sehat bagi kelompok sensitif (BBC News, 2023).

3. Penyemprotan Jalan

Penyemprotan jalan di daerah Pemprov DKI Jakarta telah dilaksanakan pada tanggal 17 Agustus 2023 menggunakan mobil pemadam kebakaran. Namun, kebijakan ini justru mendapat kritik dari para pakar perhimpunan dokter paru Indonesia. Menurut pakar perhimpunan dokter paru Indonesia penyemprotan jalan justru akan meningkatkan kadar PM 2,5 di udara (BBC News, 2023).

4. Pemberhentian usaha yang terindikasi menyebabkan pencemaran udara

4 perusahaan yang dianggap sebagai penyebab polusi udara telah diberhentikan oleh KLHK. Rasio Ridho Sari, selaku Direktur Jenderal Penegakan Hukum di KLHK telah menutup 3 perusahaan batubara dan 1 perusahaan lain yang berpotensi menambah jumlah PM 2,5 di udara (BBC News, 2023).

5. Membuat hujan buatan

Lembaga pemerintah Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) serta Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) melakukan modifikasi cuaca untuk menurunkan hujan buatan guna mengurangi pencemaran udara di Jakarta yang diperparah dengan cuaca panas di musim kemarau. Upaya ini dapat menurunkan nilai PM 2,5 namun hanya dalam jangka waktu singkat. Kemudian, jumlah PM 2,5 akan kembali naik. Penurunan nilai PM 2,5 yang terjadi juga masih dalam rentang kategori tidak sehat (BBC News, 2023).

6. Uji coba penyemprotan air dari atas gedung tinggi

Penyemprotan air dilakukan di Gedung Pertamina Jakarta Pusat dan Gelora Bung Karno (GBK) menggunakan mesin *water burst generator* yang dibuat oleh BRIN. Upaya ini merupakan teknologi modifikasi cuaca yang bisa dilakukan pada cuaca kering karena tidak bergantung pada awan. Penyemprotan air dari gedung tinggi ini mampu menurunkan nilai PM 2,5 dari 112 menjadi 52.

Namun, nilai PM 2,5 ini hanya merepresentasikan kondisi udara di sekitar gedung tempat penyemprotan tersebut dilakukan (BBC News, 2023).

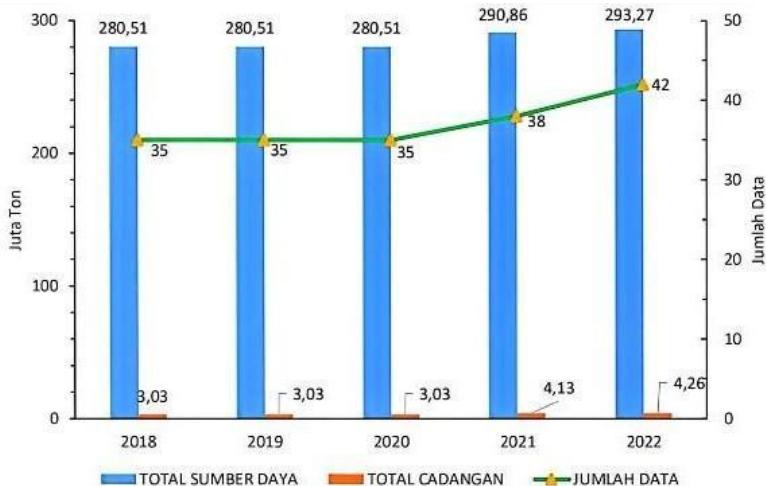
Selain upaya-upaya tersebut, pemerintah Indonesia juga mengembangkan ruang terbuka hijau, mendorong masyarakat menggunakan transportasi listrik yang ramah lingkungan, menyelenggarakan *car free day*, dan memberikan sanksi kepada pelaku pembakaran sampah. Namun, ternyata upaya tersebut belum dapat menurunkan tingkat pencemaran udara secara signifikan. Oleh sebab itu, dibutuhkan upaya lain untuk mengatasi masalah pencemaran udara tersebut. Dalam hal ini, metode adsorpsi menggunakan zeolit alam termodifikasi dapat menjadi pilihan yang tepat untuk mengatasi pencemaran udara akibat emisi gas buang berbahaya.

## **ZEOLIT ALAM INDONESIA SEBAGAI MATERIAL CERDAS**

Zeolit adalah mineral yang memiliki struktur atau kerangka alumina silika dengan rumus kimia  $Mx/n[(AlO_2)_x(SiO_2)_y \cdot wH_2O]$ . n adalah valensi kation M, w adalah jumlah molekul air per unit sel, serta x dan y adalah total jumlah tetrahedral per unit sel (Setyaningsih & Dewanti, 2022). Zeolit mempunyai struktur kristal tiga dimensi yang tersusun atas  $SiO_4$  dan  $AlO_4$  berbentuk tetrahedral.  $SiO_4$  dan  $AlO_4$  bergabung membentuk jaringan ionik. Pada zeolit, atom oksigen tersebar di antara atom Si dan Al. Perbedaan persebaran oksigen tersebut menentukan rapat muatan pada zeolit. Semakin besar perbandingan persebaran oksigen maka rapat muatan molekul zeolit semakin besar (Atikah 2017).

Zeolit termasuk bahan galian non logam dan mineral industri dengan sifat fisik dan kimia yang unik yaitu dapat digunakan sebagai adsorben (penyerap), penukar ion, penyaring molekul dan katalisator. Di Indonesia, sumber daya dan cadangan zeolit dari tahun 2018 hingga tahun 2022 terus mengalami peningkatan sebagaimana yang ditunjukkan

oleh Gambar 3.



Gambar 3. Sumber Daya dan Cadangan Zeolit di Indonesia tahun 2018 hingga 2022

(Sumber: Hermawan *et al.*, 2022)

Adapun kelimpahan sumber daya dan cadangan zeolit yang dimiliki oleh beberapa provinsi di Indonesia pada Tahun 2022 ditunjukkan oleh Tabel 2 (Hermawan *et al.*, 2022).

Tabel 2. Jumlah Sumber Daya dan Cadangan Zeolit di Beberapa Provinsi yang Ada di Indonesia pada Tahun 2022

No.	Provinsi	Jumlah Lokasi	Hipotetik (Ton)	Sumber Daya (Ton)			Cadangan (Ton)	
				Terek	Tertunjuk	Terukur	Terkira	Terbukti
1	Jawa Barat	10	24.651.000	-	16.841.617	8.548.786	-	1.173.321
2	Lampung	10	1.580.000	100.000.000	124.325.389	30.202.005	3.030.283	9.754
3	Nusa Tenggara Timur	19	165.850.163	13.190.000	82.500	76.000	25.000	18.500
4	Sulawesi Barat	1	26.400.000	-	-	-	-	-
5	Sulawesi Selatan	1	1.400.000	-	-	-	-	-
6	Sumatera Utara	1	16.200.000	-	-	-	-	-
Total		42	236.081.163	113.190.000	141.249.506	38.826.791	3.055.283	1.201.575

(Sumber: Hermawan *et al.*, 2022)

Zeolit alam ditemukan secara alami di sekitar batuan sedimen, seperti di kawasan gunung berapi, atau mengendap membentuk batuan sedimen. Pembentukan zeolit disebabkan oleh perubahan alam dari bahan vulkanik menjadi sedimen

yang mengendap selama berjuta-juta tahun lalu. Zeolit alam berbeda dengan zeolit yang diperoleh dari hasil sintesis. Perbedaan tersebut terletak pada faktor yang mempengaruhi proses pembentukan, komposisi zeolit dan struktur atau bentuk zeolit yang dihasilkan. Faktor yang mempengaruhi pembentukan zeolit alam adalah kondisi geografis dan geologis alam sedangkan zeolit hasil sintesis dipengaruhi oleh teknik dan keadaan pada saat zeolit tersebut disintesis (Juniansyah *et al.*, 2023). Berdasarkan komposisi penyusunnya, zeolit alam umumnya mengandung Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, dan K<sup>+</sup> sedangkan zeolit hasil sintesis umumnya hanya mengandung Na<sup>+</sup> dan K<sup>+</sup>. Bentuk zeolit alam biasanya tidak teratur dan tidak dapat dikontrol sedangkan zeolit hasil sintesis kemungkinan memiliki struktur yang teratur karena dapat dikontrol (Dongoran *et al.*, 2021). Berdasarkan struktur dan komposisinya, zeolit alam dapat dibedakan menjadi analsim, kabasit, klinoptilolit, erionit, faujasit, ferrierit, laumontit, mordenit dan phillipsit sebagaimana yang tercantum dalam Tabel 3.

Tabel 3. Zeolit Alam Berdasarkan Struktur dan Komposisinya

Zeolit	Rumus Kimia Ideal	Si/Al (mol/mol)	KTK	Fraksi Posisi Tetrahedral Si	Kation
Analsim	Na[AlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ]·H <sub>2</sub> O	1,5-2,8	3,57-5,26	0,60-0,74	Na
Kabasit	(Ca <sub>0,5</sub> , Na, K) <sub>4</sub> [Al <sub>4</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>24</sub> ]·12H <sub>2</sub> O	1,4-4,0	2,49-4,66	0,58-0,80	Na, K, Ca
Klinoptilolit	(Na, K, dan Ca) <sub>2-3</sub> Al <sub>3</sub> (Al, Si) <sub>2</sub> Si <sub>13</sub> O <sub>36</sub> ·12H <sub>2</sub> O	4,0-4,7	2,04-2,60	0,80-0,85	Na, K, Ca
Erionit	K <sub>2</sub> (Na, Ca <sub>0,5</sub> ) <sub>8</sub> [Al <sub>10</sub> Si <sub>26</sub> O <sub>72</sub> ]·~30 H <sub>2</sub> O	2,6-3,8	2,68-3,42	0,72-0,79	Na, K, Ca
Faujasit	(Na, Ca <sub>0,5</sub> , Mg <sub>0,5</sub> K) <sub>x</sub> [Al <sub>x</sub> Si <sub>12-x</sub> O <sub>24</sub> ]·16H <sub>2</sub> O	2,1-2,8	2,98-3,42	0,68-0,74	Na, K, Mg
Ferrierit	(K, Na, Mg <sub>0,5</sub> , Ca <sub>0,5</sub> ) <sub>6</sub> [Al <sub>6</sub> Si <sub>30</sub> O <sub>72</sub> ]·18H <sub>2</sub> O	4,9-5,7	2,09-2,30	0,84-0,85	Ca
Laumontit	Ca <sub>4</sub> [Al <sub>8</sub> Si <sub>16</sub> O <sub>48</sub> ]·18H <sub>2</sub> O	1,9-2,4	3,82-4,31	0,66-0,71	Na, K, Mg
Mordenit	(Na <sub>2</sub> , Ca, K) <sub>4</sub> [Al <sub>8</sub> Si <sub>40</sub> O <sub>96</sub> ]·28H <sub>2</sub> O	4,0-5,7	2,05-2,43	0,80-0,85	Na, K, Ca
Phillipsit	(K, Na, Ca <sub>0,5</sub> , Ba <sub>0,5</sub> ) <sub>x</sub> [Al <sub>x</sub> Si <sub>16-x</sub> O <sub>32</sub> ]·12H <sub>2</sub> O	1,1-3,3	2,92-5,64	0,52-0,77	Na, K, Ca

(Sumber: Riwu dan Neolaka, 2021 )

Adapun sifat dari beberapa jenis zeolit alam ditunjukkan oleh Tabel 4.

Tabel 4. Sifat Fisika dari Sejumlah Jenis Zeolit Alam

Zeolit	Porositas	Stabilitas Kalor	Densitas (g.cm <sup>-3</sup> )	Skala Kekerasan (Mohs)
Analsim	18	Tinggi	2,22	5 - 5,5
Kabasit	47	Tinggi	2,05 - 2,20	4 - 5
Klinoptilolit	34	Tinggi	2,14 - 2,17	3,5 - 4
Erionit	35	Tinggi	2,02 - 2,13	3,5 - 4
Mordenit	28	Tinggi	2,12 - 2,15	3 - 4
Phillipsit	31	Moderat	2,20	4 - 4,5

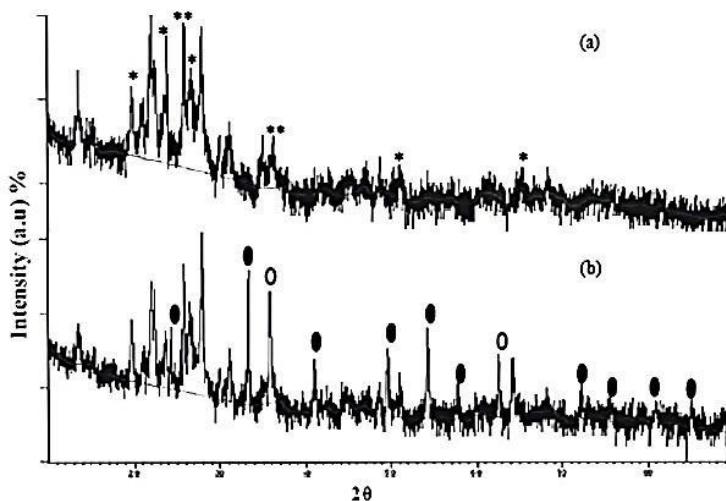
(Sumber: Riwu dan Neolaka, 2021 )

Berdasarkan daerah ditemukannya, zeolit alami yang ada di Indonesia terdiri atas beberapa macam, diantaranya Zeolit Alam Gunung Kidul, Zeolit Alam Sukabumi, Zeolit Alam Yogyakarta, Zeolit Alam Tasikmalaya, Zeolit Alam Ende dan Zeolit Alam Blitar. Zeolit Alam Gunung Kidul memiliki struktur mineral modernit pada saat dilakukan aktivasi secara kimia menggunakan larutan HCl. Pada saat dilakukan aktivasi secara fisika menggunakan pemanasan, Zeolit Alam Gunung Kidul memiliki struktur modernit serta klinoptilolit. Zeolit Alam Gunung Kidul memiliki kandungan utama berupa (Ca, Na, K).Al<sub>2</sub>Si10O<sub>24</sub> dengan pengotor kuarsa dengan komposisi 45,65%-52,75% kadar silikanya, 65,56% kadar SiO<sub>2</sub>, dan 11,04% kadar Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Atikah, 2017). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Atikah (2017), struktur Zeolit Alam Gunung Kidul mirip dengan struktur Zeolit Alam Malang yaitu mempunyai struktur moderat. Komponen terbesar penyusun Zeolit Alam Gunung Kidul adalah alumina dan silika. Kemampuan adsorpsi, volume, luas permukaan, dan Kapasitas Tukar Kation (KTK) Zeolit Alam Gunung Kidul dapat ditingkatkan dengan pengaktifan secara kimia.

Zeolit Alam Sukabumi tersusun atas tiga komposisi mineral, yaitu kuarsa, klinoptilolit dan modernit dari mineral kuarsa dengan modernit sebagai komposisi terbanyak. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Juniansyah *et al.* (2017), Zeolit Alam Sukabumi dapat ditransformasi menjadi

zeolit baru dengan menggunakan 3 variasi pembandingnya yaitu zeolit, NaOH, dan air zam-zam. Percobaan 1 dengan variasi zeolit : NaOH : air zam-zam = 1 : 4 : 40 menghasilkan zeolit faujasit dan mineral kuarsa. Percobaan 2 dengan zeolit : NaOH : air zam-zam = 1 : 2 : 40 menghasilkan zeolit faujasit dan analsim. Percobaan 3 dengan komposisi zeolit : NaOH : air zam-zam = 1 : 0 : 40 tidak menghasilkan zeolit baru.

Zeolit alam dari Tegalrejo, Daerah Istimewa Yogyakarta tersusun atas klipnotilolit dan modernit dengan komposisi oksida terbesarnya adalah SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Selain itu, zeolit alam dari Tegalrejo juga mengandung komposisi ortoklas, plagioklas, opal, dan mineral lainnya yang memiliki kapasitas pertukaran kation sebesar 26,50 mol (+)/kg hingga 50,17 mol (+)/kg (Selvina *et al.*, 2021). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Oktaviani *et al.* (2019), Zeolit Alam Tasikmalaya memiliki komposisi sebagaimana yang tertera dalam Gambar 4.



Gambar 4. Hasil Karakterisasi Zeolit Alam Tasikmalaya Menggunakan X-Ray Diffraction (XRD) (a) Setelah Proses Aktivasi Zeolit Alam Tasikmalaya (b) Zeolit-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

(Sumber : Oktaviani *et al.*, 2019)

Berdasarkan Gambar 5 (a) diketahui bahwa setelah proses aktivasi, zeolit menunjukkan puncak difraksi pada

nilai  $2\theta$   $22,4308^\circ$ ,  $25,7429^\circ$ ,  $26,6009^\circ$ , dan  $30,9614^\circ$ . Dari data tersebut dapat diketahui bahwa sampel Zeolit Alam Tasikmalaya setelah diaktivasi mengandung zeolit jenis Klinoptilolit. Sedangkan, puncak difraksi pada nilai  $2\theta$   $22,4308^\circ$ ,  $26,6009^\circ$ , dan  $27,7322^\circ$  menunjukkan bahwa dalam zeolit yang dianalisis terkandung zeolit jenis mordenit. Kemudian, berdasarkan Gambar 5 (b) analisis zeolit-Fe2O3 menunjukkan pola difraksi pada nilai  $2\theta$   $24,1954^\circ$ ,  $33,2027^\circ$ ,  $40,9409^\circ$ ,  $49,497^\circ$ ,  $54,1393^\circ$ ,  $57,6740^\circ$ ,  $72,0937^\circ$ ,  $84,992^\circ$ , dan  $88,6555^\circ$  yang berarti bahwa sampel tersebut mengandung Fe2O3. Selain itu, diperoleh juga puncak difraksi pada nilai  $2\theta$   $35,6977^\circ$  dan  $62,4724^\circ$  yang menunjukkan bahwa sampel mengandung Fe3O4. Sehingga, dapat diketahui bahwa di dalam zeolit-Fe2O3 terkandung campuran Fe2O3 dan Fe3O4. Perbedaan Gambar 5 (a) dan (b) terletak pada intensitas dan indeks Millernya. Pada Gambar 5 (a) intensitas menunjukkan komposisi SiO<sub>2</sub> dan Al2O<sub>3</sub>. Indeks miller SiO<sub>2</sub> dalam Zeolit Alam Tasikmalaya setelah diaktivasi berada pada nilai [1,0,0], [1,0,1], [1,1,2], dan [1,1,3] sedangkan indeks miller Al2O<sub>3</sub> berada pada nilai [0,1,2] dan [1,0,4] (Oktaviani *et al.*, 2019).

Karakteristik zeolit alam asal Tasikmalaya, antara lain berwarna putih kehijauan apabila dalam keadaan segar, hijau gelap, putih keabu-abuan, hingga putih kecoklatan pada saat mengalami pelapukan serta berbentuk butiran halus hingga sedang (Kusdarto, 2008). Adapun komposisi dari zeolit alam asal Tasikmalaya ditunjukkan oleh Tabel 5.

Tabel 5. Komposisi Mineral Zeolit Tasikmalaya

Jenis Minera l	Ukura n ( $\mu$ )	%	Keterangan
Plagioklas	6 – 240	5,7	Berbentuk kristalin, sebagai penokris dengan massa dasar zeolite

Kwarsa	4 – 45	2,4	Berbentuk kristalin, terpisah dengan mineral lain, sebagai penokris, dengan massa dasar zeolite
Mika/glass	8 – 242	10,3	Berbentuk kristalin, sebagai penokris dengan massa dasar Zeolite
Oksida besi	15 – 38	0,4	Berbentuk kristalin, sebagai penokris dengan massa dasar zeolite
Zeolit	1 – 14	81,2	Berbentuk kristalin yang tidak beraturan

(Sumber: Kusdarto, 2008)

Zeolit alam di Kabupaten Ende berjumlah sebesar 6.115.000 ton. Zeolit ini dimanfaatkan oleh masyarakat sekitar sebagai bahan aditif semen karena kandungan alumina silikanya (Wolo *et al.*, 2019). Berdasarkan penelitian Lema dan Sabuna (2022), Zeolit Alam Ende berpotensi sebagai agen *feed release* untuk ransum ayam *broiler* karena memiliki struktur pori yang unik dan dapat dimodifikasi sesuai kebutuhan. Zeolit Ende juga memiliki kemampuan adsorpsi yang baik dalam mengurangi kadar amonia pada proses metabolisme pakan.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Naafi *et al.* (2023), zeolit alam asal Blitar memiliki komposisi mineral sebagaimana yang terdapat dalam Tabel 6 dengan karakteristik zeolit yang ditunjukkan oleh Tabel 7.

Tabel 6. Komposisi Mineral Zeolit Alam Blitar

Element	NZB (%)	AZB-0.5 (%)	AZB-1.0 (%)
Al	8.4	8.2	8.2
Si	56.4	55.5	55.3
Fe	16.9	16.8	17.5
Ca	10.5	10.7	10.7
K	5.11	5.32	5.28
Ti	0.98	1.04	1.0
V	0.03	0.04	0.02
Mn	0.35	0.33	0.37
Cu	0.12	0.14	0.13
Zn	0.03	0.07	0.07
Sr	0.78	0.78	0.78
Si/Al	6.71	6.77	6.74

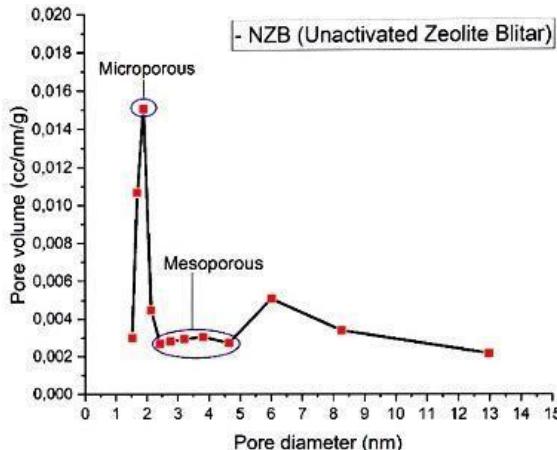
(Sumber: Naafi *et al.*, 2023)

Tabel 7. Karakteristik Zeolit Alam Blitar

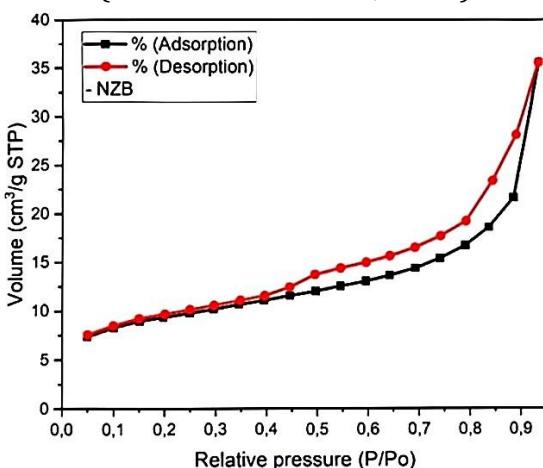
Material	$S_{ext}^a$ ( $m^2 g^{-1}$ )	$V_{micro}^b$ ( $cc g^{-1}$ )	$V_{meso}^c$ ( $cc g^{-1}$ )	$V_{total}^d$ ( $cc g^{-1}$ )	Pore size <sup>e</sup> (nm)
NZB	31.462	0.00578	0.04944	0.05522	3.51028
AZB-0.5	21.9152	0.00193	0.04291	0.04484	4.09164
AZB-1.0	24.1587	0.00155	0.04832	0.04987	4.12847

<sup>a</sup> Multipoint BET, <sup>b</sup> t-method, <sup>c</sup>  $V_{total} - V_{micro}$ , <sup>d</sup> at P/Po = 0.93698,<sup>e</sup> Average pore size(Sumber: Naafi *et al.*, 2023)

Gambar 5 menunjukkan hasil analisis Barret-Joyner-Halendra (BJH) oleh Naafi *et al.* (2023) yang memberikan informasi bahwaditnjau dari daya adsorpsinya terhadap gas nitrogen, Zeolit Alam Blitar memiliki tiga tipe ukuran yaitu mikropori ( $d < 20\text{\AA}$ ), mesopori ( $20\text{\AA} < 500\text{\AA}$ ), dan makropori ( $d > 500\text{\AA}$ ). Kemudian, uji kemampuan adsorpsi Zeolit Alam Blitar terhadap gas N<sub>2</sub> ditunjukkan oleh Gambar 6.



Gambar 5. Hasil Uji BJH pada Zeolit Alam Blitar

(Sumber: Naafi *et al.*, 2023)

Gambar 6. Kemampuan Adsorpsi Desorpsi Zeolit Alam

Blitar terhadap Gas N2

(Sumber: Naafi *et al.*, 2023)

Berdasarkan Gambar 6 diketahui bahwa kurva memiliki *loop* histeresis sempit dimana kurva adsorpsi dan desorpsi meningkat secara bertahap seiring dengan kenaikan tekanan relatif. Hal ini berarti volume adsorpsi juga meningkat. Saturasi tidak terjadi pada saat tekanan kesetimbangan mendekati tekanan uap jenuh yang umumnya memperlihatkan pori-pori berbentuk pelat yang mengarah ke pembentukan pori-pori celah (Naafi *et al.*, 2023).

Zeolit sudah banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang

kehidupan, misalnya sebagai adsorben, katalis dalam pembuatan biodiesel dan material penghantar obat. Zeolit dapat digunakan sebagai adsorben karena memiliki permukaan berpori untuk proses penyerapan. Zeolit dapat digunakan sebagai adsorben logam-logam berat, seperti adsorpsi ion  $\text{Fe}^{2+}$  dalam air tanah (Yoesoef *et al.*, 2018), adsorpsi ion  $\text{Pb}^{2+}$ , adsorpsi ion  $\text{Cr}^{3+}$ , sebagai acuan dalam pemurnian etanol menggunakan metode distilasi adsorpsi, adsorben zat warna remazol *yellow Fg*, sebagai adsorben dalam pengolahan air limbah cair pada industri sarung tenun (Udyani *et al.*, 2022), serta adsorpsi senyawa organik pada air lindi di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) batu layang. Sebagai katalis dalam pembuatan biodiesel, zeolit memiliki keunggulan yaitu reaksi esterifikasi asam lemak bebas dalam minyak goreng bekas dan reaksi transesterifikasi dapat terjadi secara bersama-sama (Aziz *et al.*, 2012). Di bidang biomedis, zeolit dapat digunakan sebagai material pembawa obat. Hal ini dikarenakan zeolit memiliki struktur pori yang lebih kecil daripada material lain. Ukuran pori zeolit yang sesuai dengan ukuran molekul obat dapat meningkatkan kemampuan adsorpsi obat ke dalam pori-pori zeolit sehingga mendukung sistem penghantaran obat. Pada prosesnya, molekul-molekul obat akan dilepaskan ke dalam matriks secara terkontrol dan spesifik (sesuai bagian yang dituju) (Riwu dan Neolaka, 2021). Selain itu, zeolit juga dimanfaatkan dalam bidang pertanian, diantaranya sebagai bahan ameliorasi bagi tanah dengan kapasitas tukar kation yang rendah, sebagai media pertumbuhan tanaman hortikultura maupun bibit tanaman perkebunan, bahan campuran dalam pembuatan pupuk kompos, dan bahan campuran pakan ternak sapi. Zeolit alam ini juga dapat digunakan sebagai media penjernihan air (Susanti *et al.*, 2023).

## ZEOLIT ALAM SEBAGAI ADSORBEN YANG POTENSIAL

Adsorpsi merupakan suatu proses penjerapan atom, ion, atau molekul dalam suatu larutan pada permukaan zat penyerap. Dalam proses adsorpsi, terdapat zat yang berperan sebagai adsorben dan adsorbat. Adsorben adalah zat yang berperan sebagai zat penjerap sedangkan adsorbat adalah zat yang akan dijerap (Saputri, 2020). Zeolit adalah salah satu adsorben yang potensial. Zeolit dapat digunakan untuk menjerap berbagai macam adsorbat, mulai dari logam berat, air limbah, hingga gas berbahaya.

Adsorpsi dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu adsorpsi fisika dan kimia. Adsorpsi fisika merupakan adsorpsi yang dapat terjadi akibat adanya gaya fisika, seperti gaya Van der Waals (Masruhin *et al.*, 2018). Gaya tarik menarik dalam adsorpsi fisika bersifat lemah dan umumnya terjadi pada zat atau senyawa bersuhu rendah. Gaya tahan adsorpsi fisika terhadap molekul-molekul fluida lebih cepat tercapai karena derajat adsorpsinya sama dengan derajat panas kondensasi gas menjadi cair. Energi yang dibutuhkan dalam adsorpsi fisika umumnya juga sangat kecil yaitu sekitar 10 kJ/mol sehingga reaksinya bersifat *reversible*. Reaksi *reversible* artinya reaksi dapat berlangsung dua arah yaitu dari reaktan menuju produk dan dari produk menuju reaktan. Umumnya, adsorpsi zeolit berlangsung secara fisika.

Adsorpsi kimia adalah jenis adsorpsi yang melibatkan gaya atau ikatan kimia, seperti ikatan kovalen koordinasi. Adsorpsi kimia memiliki kemampuan adsorpsi dan ikatan antara adsorbat dengan adsorben yang lebih kuat dibandingkan adsorpsi fisika. Adsorpsi kimia terjadi pada suhu tinggi. Energi yang dibutuhkan agar adsorpsi kimia dapat berlangsung relatif lebih besar yaitu sebesar 42 kJ/mol sampai 420 kJ/mol. Reaksi dalam adsorpsi

kimia umumnya bersifat *irreversible* artinya reaksinya hanya berjalan satu arah. Perbedaan adsorpsi fisika dan kimia terdapat pada Tabel 8.

Tabel 8. Perbedaan antara Adsorpsi Fisika dan Kimia

Adsorpsi Fisika	Adsorpsi Kimia
Molekul terikat pada adsorben akibat adanya gaya Van der Walls.	Molekul terikat pada adsorben akibat adanya ikatan kimia, seperti ikatan kovalen.
Dapat mengadsorpsi semua jenis gas.	Dapat mengadsorpsi semua jenis gas, kecuali gas mulia.
Entalpi reaksinya 8 kJ/mol sampai 25 kJ/mol.	Entalpi reaksinya 83 kJ/mol sampai 830 kJ/mol.
Lapisan <i>multilayer</i> dapat terbentuk.	Lapisan <i>monolayer</i> dapat terbentuk.
Adsorpsi terjadi pada suhu di bawah titik didih adsorbat.	Adsorpsi terjadi pada suhu tinggi.
Jumlah adsorpsi pada permukaan adalah fungsi adsorbat.	Jumlah adsorpsi pada permukaan adalah karakteristik adsorben dan adsorbat.
Jumlah zat teradsorpsi berbanding lurus dengan kenaikan tekanan.	Jumlah zat teradsorpsi berbanding lurus dengan banyak inti aktif adsorben yang dapat bereaksi dengan adsorbat.
Tidak melibatkan energi aktivasi.	Melibatkan energi aktivasi tertentu.
Bersifat spesifik.	Bersifat sangat spesifik.
Di bawah suhu kritis.	Di atas suhu kritis.

(Sumber: Murachman *et al.*, 2014)

Pada saat proses adsorpsi berlangsung, zat yang akan diadsorpsi akan menempel pada permukaan adsorben akibat

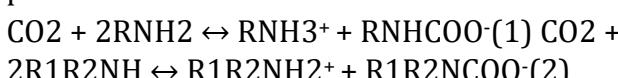
adanya gaya tarik dari permukaan suatu zat. Pertama, adsorbat akan bergerak menuju lapisan film yang ada di permukaan adsorben. Kemudian, ia akan terdifusi ke permukaan adsorben tersebut sehingga terjadi penempelan atau penjerapan adsorbat terhadap adsorben.

## **MODIFIKASI ZEOLIT DALAM MENINGKATKAN KEMAMPUAN ADSORPSI**

Zeolit alam telah banyak dimanfaatkan sebagai adsorben mulai dari logam berat, limbah industri, hingga zat warna pencemar lingkungan. Selain itu, zeolit alam juga berpotensi sebagai adsorben emisi gas buang kendaraan, seperti CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, dan sebagainya sehingga zeolit dapat menjadi solusi yang tepat untuk mengurangi atau bahkan menyelesaikan masalah pencemaran udara. Namun, kemampuan zeolit alam sebagai adsorben terbatas pada luas permukaan, jumlah dan ukuran pori, kualitas pori, dan konsentrasi maupun jenis gas yang akan dijerap. Suhu tinggi dan tekanan yang rendah juga dapat menurunkan kemampuan adsorpsi zeolit. Oleh sebab itu, dibutuhkan inovasi untuk meningkatkan efektivitas zeolit dalam menjerap emisi gas buang berbahaya, salah satunya dengan memodifikasi zeolit menggunakan bahan lain, seperti: amina, silika, senyawa organik dan memberikan perlakuan asam.

### **1. Modifikasi Zeolit dengan Amina**

Amina yang bersenyawa dengan molekul atau zat lain, seperti *monoethanolamine* (MEA), *diethanolamine* (DEA), dan *tetraethylenepentamine* (TEPA) dapat digunakan untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi dan selektivitas zeolit. Gugus amina membantu mengaktifkan situs pada aluminium dalam struktur zeolit, meningkatkan luas permukaan, memperkecil ukuran pori, dan meningkatkan stabilitas serta volume porositas. Interaksi antara gas CO<sub>2</sub> dengan amina dituliskan dalam persamaan 1 dan 2.



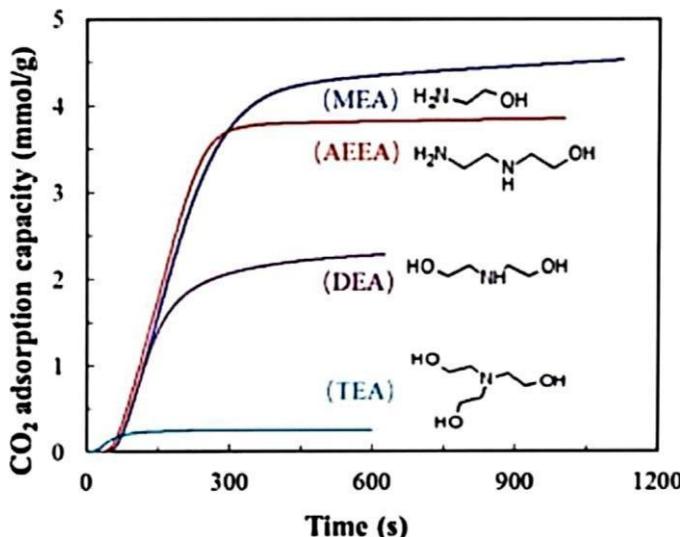
Adsorpsi CO<sub>2</sub> menggunakan zeolit termodifikasi amina dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain derajat fungsionalisasi, jenis zeolit yang digunakan, serta jenis dan konsentrasi gas yang akan dijerap. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Mortazavi *et al.* (2021) modifikasi zeolit menggunakan MEA, *triethanolamine* (TEA), dan *hexylamine* mampu meningkatkan luas permukaan, meningkatkan volume porositas, dan mengurangi ukuran pori. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Banaei *et al.* (2018) modifikasi zeolit alam NA-Y termodifikasi MEA memiliki kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> yang lebih tinggi daripada zeolit alam Na-Y yang termodifikasi DEA. Hal ini dikarenakan hambatan sterik zeolit alam Na-Y termodifikasi MEA lebih rendah. Ilustrasi proses modifikasi amina pada zeolit ditunjukkan oleh Gambar 7.

Gambar 7. Tahap Modifikasi Zeolit dengan Amina



(Sumber: Bahmanzadegan dan Ghaemi, 2024)

Adapun kemampuan adsorpsi zeolit termodifikasi berbagai jenis amina terhadap gas CO<sub>2</sub> ditunjukkan oleh Gambar 8.



Gambar 8. Kemampuan Adsorpsi Zeolit Termodifikasi Amina  
 (Sumber: Bahmanzadegan dan Ghaemi, 2024)

Berkaitan dengan selektivitas zeolit dalam proses adsorpsi CO<sub>2</sub>, adanya modifikasi menggunakan amina mampu membentuk struktur pori zeolit dan menciptakan adsorben hibrida untuk menjerap CO<sub>2</sub> secara efektif.

## 2. Modifikasi Zeolit dengan Silika

Modifikasi zeolit dengan bahan silika dapat dilakukan melalui metode sintesis secara insitu dan impregnasi (pencangkokan). Modifikasi ini bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan, ukuran pori dan kemampuan adsorpsi zeolit. Zhou (2013) membuat komposit silika mesopori MCM-41 dengan surfaktan *cetyltrimethyl ammonium bromide* (CTAB). MCM-41 adalah suatu material berpori yang terbentuk dari silika amorf, memiliki bentuk struktur teratur dan rongga dengan ukuran seragam, memiliki susunan heksagonal dengan luas permukaan yang besar, serta memiliki stabilitas termal yang baik (Hasanah *et al.*, 2018). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Zhou (2013) tersebut diperoleh kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> sebesar 4,08 mmol/g. Hal ini menunjukkan bahwa komposit mesopori

dan silika berperan dalam proses penyerapan CO<sub>2</sub>. Keuntungan penggunaan zeolit 5A dengan MCM-41 adalah menghasilkan material dengan pori-pori yang lebih banyak dan lebih besar sehingga kemampuan adsorpsi terhadap CO<sub>2</sub> meningkat.

### 3. Modifikasi Zeolit dengan Logam

Salah satu logam yang dapat digunakan untuk memodifikasi zeolit adalah tembaga (Cu). Hasil modifikasi zeolit menggunakan logam Cu dikenal sebagai CuZSM-5 yang berpotensi untuk mengadsorpsi gas CO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>. Uniknya, zeolit termodifikasi logam Cu dapat diaplikasikan secara langsung pada katalitik konverter kendaraan bermotor. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Montoro *et al.* (2021) penggunaan CuZSM-5 dalam katalitik konverter mampu mengurangi gas buang kendaraan bermotor dengan persentase penurunan emisi gas CO sebesar 68%. Adanya penambahan CuZSM-5 menunjukkan stabilitas termal dan kapasitas penghilangan gas CO dan hidrokarbon. Berdasarkan penelitian tersebut juga dapat diketahui bahwa CuZSM-5 mampu mengurangi emisi kendaraan bermotor dari proses pembakaran bahan bakar minyak bumi maupun bensin.

### 4. Modifikasi Zeolit dengan Senyawa Organik

Senyawa organik yang dapat digunakan dalam modifikasi zeolit untuk mengadsorpsi emisi gas buang berbahaya, antara lain *Metal Organic Framework* (MOF) dan polietilenimina (PEI). *Metal Organic Framework* (MOF) merupakan bahan berpori yang terbuat dari ion logam dan logam organik yang memiliki luas permukaan besar dan ukuran pori-pori yang dapat disesuaikan. Bahan ini dapat digunakan sebagai bahan pelapis pada permukaan zeolit dengan tujuan meningkatkan luas permukaan secara spesifik dan menciptakan situs adsorpsi tambahan untuk CO<sub>2</sub>. Gabungan MOF dengan zeolit menghasilkan bahan hibrida sehingga mampu

meningkatkan kapasitas adsorpsi, stabilitas, dan selektivitasnya. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Lestari *et al.* (2021) penggunaan zeolit termodifikasi MOF untuk mengadsorbsi CO<sub>2</sub> berlangsung optimal pada suhu 298 K, tekanan 2 bar, dan 20% berat dengan kapasitas adsorpsi sebesar 7,009 mol/ gram. Apabila dibandingkan dengan zeolit 13X, karbon aktif, dan alumina mesopori maka zeolit termodifikasi MOF memiliki kemampuan adsorpsi yang lebih unggul.

Zeolit termodifikasi PEI memiliki beberapa keuntungan, antara lain biaya yang dibutuhkan relatif murah dan stabilitas termalnya tinggi. Kapasitas penyerapan gas CO<sub>2</sub> oleh zeolit termodifikasi PEI meningkat seiring dengan menurunnya berat molekul PEI dan jumlah cabang PEI. Berdasarkan penelitian yang dilaksanakan oleh Li *et al.* (2013) dapat diketahui bahwa PEI bercabang dengan berat molekul 800 g/mol dan penambahan silika memiliki kapasitas adsorpsi tertinggi yaitu sekitar 202 mg CO<sub>2</sub>/gram pada suhu 105°C dalam tekanan atmosfer. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Karka *et al.* (2019) kemampuan zeolit termodifikasi PEI dalam menjerap gas CO<sub>2</sub> secara maksimal terjadi pada suhu 75°C dengan pemuatan PEI sebesar 60% sehingga kapasitas adsorpsinya meningkat menjadi 1,22 mol/gram. Adanya cabang dalam PEI akan membantu meningkatkan sifat adsorpsinya terhadap gas CO<sub>2</sub>. Berdasarkan penelitian tersebut juga dapat diketahui bahwa zeolit termodifikasi PEI memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih baik dibandingkan zeolit alam murni tanpa modifikasi (Karka *et al.*, 2019).

## 5. Modifikasi Zeolit dengan Pemberian Suasana Asam

Perlakuan asam yang diberikan pada modifikasi permukaan zeolit mampu meningkatkan kemampuan adsorpsinya dalam menjerap gas CO<sub>2</sub> karena dapat menciptakan situs baru pada permukaan zeolit. Penyerapan gas CO<sub>2</sub> menggunakan zeolit termodifikasi

perlakuan asam sangat dipengaruhi oleh faktor konsentrasi, konsentrasi dan jenis asam yang digunakan, waktu kontak dan suhu saat adsorpsi berlangsung. Reaksi yang berlangsung semakin lama dan konsentrasi asam yang lebih tinggi umumnya akan membentuk situs aktif yang lebih banyak dengan kapasitas adsorpsi terhadap CO<sub>2</sub> yang lebih besar. Namun, perlu diperhatikan bahwa konsentrasi asam yang terlalu tinggi dapat menyebabkan penurunan kemampuan penyerapan CO<sub>2</sub>. Peningkatan porositas zeolit yang dimodifikasi dengan asam dapat menjelaskan peningkatan volume mesopori dan total pori. Dengan memanfaatkan asam lemah, seperti H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, pada zeolit dapat menyebabkan adanya perbaikan substansial pada struktur mikropori tanpa mengurangi integritas kristalnya. Di sisi lain, penggunaan asam kuat, seperti HCl dan HNO<sub>3</sub>, dapat menyebabkan kerusakan struktur kristalnya. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Kongnoo *et al.* (2017), asam klorida sebagai pemberi suasana asam menunjukkan kapasitas adsorpsi terbaik pada suhu 279 K dan tekanan 0,8 bar dengan kemampuan adsorpsi sebesar 4,49 mol/gram. Kemudian, berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Kongnoo *et al.* (2017), zeolit yang berada dalam lingkungan asam mengalami peningkatan jumlah CO<sub>2</sub> yang dapat teradsorpsi sebesar 22%.

## PENUTUP

Berdasarkan laporan AQI tahun 2023, Indonesia merupakan satu dari enam negara penyumbang pencemaran udara terbesar di dunia. Hal ini mengindikasikan bahwa tingkat pencemaran udara di Indonesia tergolong tinggi dan harus segera ditangani. Pemerintah Indonesia telah melaksanakan berbagai tindakan dalam rangka menangani masalah tersebut, diantaranya dengan pemberlakuan uji emisi, penyemprotan jalan, penerapan sistem WFH, pembuatan hujan buatan, hingga penutupan sejumlah usaha

yang berkontribusi dalam masalah pencemaran udara. Namun sayangnya, upaya tersebut belum mampu menyelesaikan masalah yang terjadi. Oleh sebab itu, perlu diterapkan cara lain untuk mengatasinya yaitu dengan menyerap partikel dan zat berbahaya penyebab pencemaran udara menggunakan zeolit alam yang jumlahnya cukup melimpah di Indonesia.

Zeolit alam dapat digunakan sebagai adsorben emisi gas buang berbahaya penyebab pencemaran udara karena permukaannya yang berpori. Meskipun demikian, kemampuan adsorpsinya dibatasi oleh luas permukaan, jumlah pori, kualitas pori, ukuran pori, serta konsentrasi dan jenis adsorbat yang akan diserap. Oleh sebab itu, zeolit alam perlu dimodifikasi dengan senyawa amina (seperti: MEA, TEA, DEA, dan TEPA), silika, logam tembaga (Cu), senyawa organik (seperti MOF dan polietilenimina), serta pemberian suasana asam. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, modifikasi zeolit dengan material tersebut dapat meningkatkan luas permukaan, memperbanyak jumlah pori-pori dan situs aktif yang akan digunakan untuk menyerap, serta meningkatkan stabilitas termal zeolit sehingga kemampuan dan kapasitas adsorpsinya terhadap emisi gas buang berbahaya penyebab pencemaran udara dapat meningkat. Oleh sebab itu, metode adsorpsi menggunakan zeolit alam termodifikasi dapat menjadi solusi dan pilihan yang tepat dalam mengatasi masalah pencemaran udara akibat emisi gas buang berbahaya yang terjadi di Indonesia.

## DAFTAR PUSTAKA

- Annur, C. M., 2023. *10 Negara dengan Jumlah Penduduk Terbanyak di Dunia Pertengahan 2023*, Databoks, dilihat 26 Maret 2024, <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2023/07/28/10-negara-dengan-jumlah-penduduk-terbanyak-di-dunia-pertengahan-2023>.
- Atikah, 2017. Potensi Zeolit Alam Gunug Kidul Teraktivasi

- sebagai Media Adsorben Pewarna Tekstil. *Arena Tekstil*, 32 (1): 17-24. doi: <https://dx.doi.org/10.31266/at.v32i1.2650>.
- Aziz, I., Nurbayati, S., & Rahman A., 2012. Penggunaan Zeolit Alam sebagai Katalis dalam Pembuatan Biodiesel. *Valensi*, 2 (4): 511-515. doi: <https://doi.org/10.15408/jkv.v2i4.268>.
- Banaei, M., Anbia, M., & Kazemipour, M., 2018. Enhancement of CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> Adsorptive Selectivity by Functionalized Nano Zeolite, *Journal Ultrafine Grained Nanostruct*, 51 (2): 174-182. doi: <https://doi.org/10.22059/jufgnsm.2018.02.10>.
- Badan Pusat Statistika, 2023. *Jumlah Penduduk Pertengahan Tahun (Ribu Jiwa) 2022-2023*, bps.go.id, dilihat 26 Maret 2024, [https://www.bps.go.id/id/statistics/table/2/MTk3NSMy/jumlah-penduduk-pertengahan tahun--ribu-jiwa-.html](https://www.bps.go.id/id/statistics/table/2/MTk3NSMy/jumlah-penduduk-pertengahan-tahun--ribu-jiwa-.html).
- Bahmanzadegan, F. & Ghaemi, A., 2024. Modification and Functionalization of Zeolites to Improve the Efficiency of CO<sub>2</sub> Adsorption: a Review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9: 1-16. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100564>.
- BBC News, 2023. *Uji Emisi Sampai Semprot Jalan-Upaya Pemerintah Berhasil Turunkan Tingkat Polusi Udara Jakarta?*, BBC News Indonesia, <https://www.bbc.com/indonesia/indonesia-66687436>.
- Dongoran, J., Sulistyawati, P., Simangunsong, S. Y., Paksi, P. G. R., & Pasaribu, M. H., 2021. Perkembangan Zeolit sebagai Katalis Alam Potensial. *Jurnal Jejaring Matematika dan Sains*, 3 (2): 28-39. doi: <http://dx.doi.org/10.36873/jjms.2021.v3.i2.604>.
- Fadhlurrahman, I., 2023. *Kualitas Udara Jakarta Kamis Malam di Level Sedang Namun Konsentrasi PM 2,5 Masih 2,4 Kali Lipat Standar WHO*, Databoks, dilihat 27 Maret 2024, <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2023/10/26/kuali-tas-udara-jakarta-kamis-malam-di-level>

sedang-namun- konsentrasi-pm25-masih-37-kali-lipat- standar-who.

Fadhlurrahman, I., 2024. *Jawa Barat Paling Polusi di Indonesia Pagi Ini (Selasa, 26 Maret 2024)*, Databoks, dilihat pada 27 Maret 2024, <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2024/03/26/jawa-barat-paling-polusi-di-indonesia-pagi-ini-selasa-26-maret-2024>.

Finaka, A. W., 2023. *Indonesia Produsen Kendaraan Bermotor Terbesar*, Indonesiabaik.id, dilihat 26 Maret 2024, <https://indonesiabaik.id/infografis/indonesia-produsen-kendaraan-bermotor-terbesar>.

Hairani, R., 2023. *Polusi Udara, Ancaman Kesehatan yang Tak Terlihat*, Radio Republik Indonesia, dilihat 2 April 2024, <https://www.rri.co.id/indepth/166/polusi-udara-ancaman-kesehatan-yang-tak-terlihat?page=6>.

Harjanto, T. R., Khasanah, M., & Putri, A. N. R., 2022. Industri Tahu Rakyat dalam Tinjauan Life Cycle Assesment. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan*, 4 (2): 65-73. doi: <http://dx.doi.org/10.35970/jppl.v4i2.1436>.

Hasanah, N., Sutarno, & Kunarti, E. S., 2018. Kajian Karakteristik MCM-41 yang Dimodifikasi dengan Logam Zn secara Direct Synthesis. *Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia*, 3 (3): 183-192. doi: <https://doi.org/10.20961/jkpk.v3i3.22808>.

Hermawan, D., Mustofa, S. A., Permana, L. A., Nirmala, W., & Rustina, T. S., 2022. *Neraca Sumber Daya dan Cadangan Mineral Batubara dan Panas Bumi Indonesia*. Bandung: Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.

Irawan, D. E., 2019. *Mengapa Asap Gunung Meletus Berbahaya Bagi Manusia*, Anak Bertanya, dilihat pada 27 Maret 2024, <https://anakbertanya.com/mengapa-asap-gunung-meletus-berbahaya-bagi-manusia/>.

Isyana, F., 2023. *Polusi Udara, Apa Penyebab dan Dampaknya*

- Bagi Kesehatan?, Otoklix, dilihat pada 27 Maret 2024,  
<https://otoklix.com/blog/polusi-udara/>.*
- Juniansyah, R., Suhendar, D., & Hadisantoso, E. P., 2017. Studi Transformasi Zeolit Asal Sukabumi dengan Menggunakan Air Zam-Zam sebagai Sumber Akuades. *Al-Kimiya*, 4 (1): 23-30. doi: <http://dx.doi.org/10.15575/ak.v4i1.5080>.
- Karka, S., Kodokula S., Nandury S. V., 2019. Polyethylenimine Modified Zeolite 13X for CO<sub>2</sub> Capture: Adsorption and Kinetic Studies. *ACS Menghitung*, 11 (1): 52-59. doi: <http://dx.doi.org/10.1021/acsomega.9b02047>.
- Komariah, F., 2023. *Penderita ISPA di Jakarta Mendekati Raturan Ribu Kasus*, Radio Republik Indonesia, dilihat 27 Maret 2024, <https://www.rri.co.id/aceh/kesehatan/337337/penderita-ispa-di-jakarta-mendekati-ratusan-ribu-kasus>.
- Kongnoo, 2017. Surface Characteristics and CO<sub>2</sub> Adsorption Capacities of Acid-Activated Zeolite 13X Prepared from Palm Oil Mill Fly Ash. *Fuel*, 193 (1): 385-394. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.12.087>.
- Kusdarto, 2008. Potensi Zeolit di Indonesia. *Jurnal Zeolit Indonesia*, 7 (2): 78-87.
- Lema, A. T., & Sabuna, C., 2022. Kajian Karakteristik Zeolit Alam Ende sebagai Kandidat Feed Release Ransum Ayam Broiler dalam Mereduksi Kadar Amonia. *Seminar Nasional Politani Kupang ke-5*, 5 (1): 323-329.
- Lestari, W. W., Yunita, L., Saraswati, T. E., Heraldy, E., Khafidhin, M. A., Krisnandi, Y. K., Arrozi, U. S. F., & Kadja, G. T. M., 2021. Fabrication of Composite Materials MIL-100 (Fe)/Indonesian Activated Natural Zeolite as Enhanced CO<sub>2</sub> Capture Material. *Chemical Papers*, 75 (7): 3253-3263. doi: <https://doi.org/10.1007/s11696-021-01558-2>.
- Li, B., Duan, Y., Luebke, D., & Morreale, B., 2013. Advances in CO<sub>2</sub> Capture Technology: a Patent Review, *Appl. Energy*

- 102 (1): 1439–1447. doi:  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.009>.
- Masruhin, Rasyid, R., & Yani, S., 2018. Penjeronan Logam Berat Timbal (Pb) dengan Menggunakan Lignin Hasil Isolasi Jerami Padi. *Journal of Chemical Process Engineering*, 3 (1): 11-20. doi:  
<http://dx.doi.org/10.33536/jcpe.v3i1.188>.
- Montoro, J. A. A., Flores, J. W. V., & Olivera C. A. C., 2021. Automotive Internal Combustion Gas Reduction Using CuZSM-5 in a Catalytic. *Chemical Engineering Transactions*, 86 (1):451-456. doi:  
<https://doi.org/10.3303/CET2186076>.
- Mortazavi, N., Bahadori, M., Marandi, A., Tangestaninejad, S., Moghadam, M., Mirkhani, V., & Baltork, I. M., 2021. Enhancement of CO<sub>2</sub> Adsorption on Natural Zeolite, Modifies Clinoptilolite with Cations, Amines, & Ionic Liquid. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 22: 1-10. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scp.2021.100495>.
- Murachman, B., Putra, E. S., & Wulandary, 2014. Dekolorisasi dan Deoilisasi Parafin Menggunakan Adsorben Zeolit, Arang Aktif, dan Pirolisis Batu Bara. *Jurnal Rekayasa Proses*, 8 (2): 40-48. doi:  
<https://doi.org/10.22146/jrekpros.11371>.
- Naafi, A. N. A., Tjahjanto, R. T., & Prananto, Y. P., 2023. Effect of NaOH Concentration toward the Characteristic of Activated Natural Zeolite from Blitar-East Java. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 26 (2): 50-56. doi:  
<http://dx.doi.org/10.14710/jksa.26.2.50-56>.
- Oktaviani, R., Hindryawati, N., & Panggabean, A. S., 2019. Modifikasi dan Karakterisasi Zeolit Alam Tasikmalaya dengan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Jurnal Atomik*, 4 (1): 30-35.
- Puspitawati, I. W., 2014. *Polusi Udara dan Uji Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor sebagai Prasyarat Pemberian Perpanjangan STNK*, DIY,  
BAPPEDA  
<https://bappeda.jogjaprov.go.id/artikel/detail/46-a->

- polusi- udara-dan-uji-emisi-gas-buang-kendaraan- bermotor sebagai prasyarat-pemberian-perpanjngn- stnk.
- Riwu, A. A. P., & Neolaka, Y. A. B., 2021. Review: Zeolit Alam sebagai Material Penghantar Obat. *Jurnal βeta Kimia*, 1 (2): 7-14. doi: <https://doi.org/10.35508/jbk.v1i2.5574>.
- Saputri, C. A., 2020. Kapasitas Adsorpsi Serbuk Nata de Coco terhadap Ion Pb<sup>2+</sup> Menggunakan Metode Batch. *Jurnal Kimia*, 14 (1): 71-76. doi: <http://dx.doi.org/10.24843/JCHEM.2020.v14.i01.p12>.
- Selvina, M., Fahrialam, A., Wijaya, L. N., Karunianti, A. R., & Warmada, I. W., 2021. Studi Karakteristik Zeolit di Yogyakarta serta Pemanfaatnya sebagai Builder Agent Rumah Tangga. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 22 (4): 189-196. doi: <http://dx.doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v22i4.650>.
- Setyaningsih, S. & Dewanti, B. A., 2022. Sintesis dan Karakterisasi Zeolit Mordenit (MOR) secara Hidrotermal Menggunakan Kaolin dan Abu Sekam Padi sebagai Sumber Silika. *MJoCE*, 12 (1): 23. doi: <https://doi.org/10.30598/MJoCEvol12iss1pp23-32>.
- Sulistya, F., 2024. *8 Kota Indonesia dengan Polusi Udara Tertinggi, Bandung Teratas (19 Februari 2024)*, Data Indonesia, dilihat 27 Maret 2024, <https://dataindonesia.id/varia/detail/8-kota-indonesia-dengan-polusi-udara-tertinggi-bandung-teratas-19-februari-2024>.
- Susanti, N. E., Sari, Y. I., & Indawati, N., 2023. Penggunaan Zeolit Alam sebagai Media Penyaring Air dalam Skala Rumah Tangga pada Kawasan Karst Malang Selatan. *Abdimas Mandalika*, 2 (2): 76-84. doi: <https://doi.org/10.31764/am.v2i2.12957>.
- Udyani, K., Pitaloka, P. N. L., Tias, N. C. N., & Muliawati, E. C., 2022. Pemanfaatan Zeolit Teraktivasi oleh Asam Sulfat sebagai Adsorben pada Pengolahan Limbah Cair Warna

- pada Industri Sarung Tenun secara Adsorpsi, *Journal of Industri Process, and Chemical Engineering*, 2 (1): 96-100. doi: <https://doi.org/10.31284/j.joiche.2022.v2i1.3323>.
- Wolo, D., Ngapa, Y. D., & Carvallo, L., 2019. Potensi Zeolit Alam Ende sebagai Bahan Aditif Semen untuk Meningkatkan Kuat Tekan Beton. *Jurnal Dinamika Sains*, 3 (1): 34-41. doi: <https://doi.org/10.37478/optika.v3i1.112>.
- Yoesoef, A., Mulyadi, E., & Rosariawari F., 2018. Penggunaan Zeolit alam untuk Adsorpsi Ion Fe (II) dalam Air Tanah dengan Aktivasi Asam Nitrat. *Journal Envirotek*, 9 (2): 1-5. doi: <https://doi.org/10.33005/envirotek.v9i2.969>.
- Zhou, 2013. CO<sub>2</sub> Capture on Micro/Mesoporous Composites of (Zeolite A)/(MCM-41) with Ca<sup>2+</sup> Located: Computer Simulation and Experimental Studies, *Solid State Sciences*, 24 (1): 107-114. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2013.07.008>