



# Artikel Review: Teknologi Zeolit untuk Penangkapan Karbon (*Carbon Capture*): Karakteristik, Modifikasi dan Tantangan Operasional

Hasrul<sup>1✉</sup>, Trisuciati Syahwardini<sup>1</sup>, Abdul Rahman Wali<sup>1</sup>, Purfaji<sup>2</sup>, Arya Wiranata<sup>1</sup>, Ni Putu Vidya Primarista<sup>1</sup>

<sup>(1)</sup>Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Sriwijaya, Palembang

<sup>(2)</sup>Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Sriwijaya, Palembang

DOI: 10.31004/jutin.v9i1.53291

✉ Corresponding author:  
[hasrul@polsri.ac.id]

| Article Info                                                                                            | Abstrak                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Kata kunci:</b><br/>Zeolit;<br/>Penangkapan karbon;<br/>Amina;<br/>Adsorpsi;<br/>Selektivitas</p> | <p>Zeolit merupakan adsorben unggul untuk penangkapan CO<sub>2</sub> karena luas permukaan tinggi, stabilitas termal, dan biaya rendah. Kinerjanya dapat ditingkatkan melalui modifikasi kimia seperti impregnasi amina, pertukaran kation, dan grafting hidrofobik untuk meningkatkan selektivitas serta ketahanan terhadap uap air. Tantangan operasional meliputi kompetisi air, kebutuhan energi regenerasi, dan stabilitas siklik. Solusi seperti guard bed, zeolit hidrofobik, dan sistem hibrida dikembangkan untuk mengatasi kendala tersebut. Adsorpsi berbasis zeolit menjadi jalur berkelanjutan dalam mitigasi emisi CO<sub>2</sub> dan mendukung teknologi rendah karbon.</p>                                                                                                           |
| <p><b>Keywords:</b><br/>Zeolite;<br/>Carbon capture;<br/>Amine;<br/>Adsorption;<br/>Selectivity</p>     | <p><b>Abstract</b></p> <p><i>Zeolites are promising adsorbents for CO<sub>2</sub> capture due to their high surface area, thermal stability, and cost-effectiveness. Their performance can be enhanced through chemical modifications such as amine impregnation, cation exchange, and hydrophobic surface grafting, enabling improved selectivity and resistance to moisture. However, operational challenges remain, including water competition, regeneration energy demand, and cyclic stability under industrial conditions. Strategies like guard beds, hydrophobic zeolites, and hybrid systems are being developed to overcome these limitations. Zeolite-based adsorption offers a sustainable pathway for reducing CO<sub>2</sub> emissions and advancing low-carbon technologies.</i></p> |

## 1. PENDAHULUAN

Perkembangan industrialisasi yang cepat dan peningkatan populasi ikut meningkatkan permintaan energi. Hasilnya, emisi gas rumah kaca meningkat setiap tahun, khususnya konsentrasi gas karbon dioksida di atmosfer yang memicu meningkatnya pemanasan global, kekeringan, banjir, mencairnya gletser, kebakaran hutan dan lain-

Received 6 December 2025; Received in revised form 10 December 2025 year; Accepted 26 December 2025

Available online 3 January 2026 / © 2026 The Authors. Published by Jurnal Teknik Industri Terintegrasi Universitas Pahlawan Tuanku Tambusai. This is an open access article under the CC BY-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>)

lain, mengganggu keseluruhan ekosistem. Kebutuhan energi secara umum dipenuhi oleh bahan bakar fosil yang berkontribusi hingga 82% dari total produksi energi global (Salvi & Jindal, 2019). Sumber utama yang bertanggung jawab terhadap terbentuknya emisi pada sektor industri terdiri dari pemrosesan produk, industri besi dan baja, semen, dan sektor penghasil energi (Wei et al., 2021).

Pada tahun 2014, International Energy Agency (IEA) memperkirakan 11 miliar ton emisi CO<sub>2</sub> dari sektor industri berkontribusi sekitar 31% dari emisi CO<sub>2</sub> global (Paltsev et al., 2021). *The Scripps Institute of Oceanography* melaporkan bahwa konsentrasi CO<sub>2</sub> meningkat setiap tahunnya, seperti pada tahun 2011, 2014, 2016 dan 2019 masing-masing 191, 398, 400, 414.7 ppm dan diprediksi mencapai batas 500 ppm pada tahun 2050 (Kelektsoğlu, 2018).

Melihat situasi saat ini, mitigasi terhadap produksi CO<sub>2</sub> antropogenik (akibat aktivitas manusia) ini diperlukan untuk mengendalikan situasi agar tidak semakin memburuk. Emisi GRK (Gas Rumah Kaca) dapat dikurangi dengan mengadopsi energi terbarukan yang lebih bersih (surya, angin, panas bumi, biogas, dll.), beralih ke tenaga nuklir, atau memajukan teknologi bahan bakar fosil yang ada saat ini dengan mengadaptasi teknologi menjanjikan seperti teknologi penangkapan karbon (*carbon capture*) (Abd et al., 2020).

Teknologi absorpsi kimia menggunakan alkanolamina (*amine scrubbing*) saat ini merupakan teknologi standar untuk penangkapan CO<sub>2</sub>, penerapannya secara luas memiliki masalah baru dikarenakan intensitas energi yang sangat tinggi dan kendala operasional yang signifikan. Proses ini membutuhkan energi lebih dari 2,5 GJ per ton CO<sub>2</sub>, terutama disebabkan oleh regenerasi pelarut yang menuntut energi panas yang besar untuk memutus ikatan karbamat atau bikarbonat yang stabil. Selain beban energi tersebut, sifat operasional sistem ini yang intrinsik semikontinu berkontribusi pada kompleksitas siklus regenerasi dan tingginya biaya operasional keseluruhan (Rochelle, 2009).

Tantangan teknis diperparah oleh isu manajemen kimia, di mana pelarut amina yang digunakan bersifat toksik dan memiliki stabilitas yang terbatas ketika terpapar kontaminan gas buang seperti oksigen O<sub>2</sub> dan sulfur dioksida SO<sub>2</sub>. Kerentanan pelarut terhadap degradasi oksidatif dan termal ini tidak hanya meningkatkan risiko lingkungan tetapi juga menambah beban biaya pemeliharaan. Keterbatasan-keterbatasan fundamental inilah yang mendorong arah penelitian dan pengembangan saat ini menuju teknologi alternatif yang lebih *robust*, seperti adsorpsi menggunakan zat padat, yang dirancang untuk mengatasi kelemahan sistem pelarut cair dengan menawarkan stabilitas kimia yang lebih tinggi dan kemampuan operasi yang kontinu (Kupgan et al., 2018). Pada studi ini, metode menggunakan adsorpsi zat padat fokus pada pembahasan menggunakan bahan zeolit dibanding zat padat lainnya seperti membran, karbon aktif, *metal-organic frameworks* (MOFs) dan yang lainnya.

## 2. METODE

Penulisan artikel tinjauan pustaka ini dilakukan secara sistematis untuk merangkum perkembangan teknologi zeolit dalam penangkapan karbon. Metodologi yang digunakan mencakup strategi pencarian literatur, kriteria seleksi dan teknik analisis sebagai berikut:

### 2.1 Sumber data

Data yang digunakan dalam artikel ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari artikel ilmiah bereputasi seperti pencarian literatur yang dilakukan melalui pangkalan data akademik utama, antara lain: *ScienceDirect*, *Scopus*, *Web of Science*, *SpringerLink*, dan *Google Scholar*, prosiding konferensi internasional, dan buku teks yang relevan.

Untuk memastikan relevansi teknologi terkini literatur yang dipilih difokuskan pada publikasi dalam rentang waktu 10 tahun terakhir, meskipun beberapa literatur fundamental dari tahun sebelumnya tetap digunakan sebagai referensi dasar. Tahap pencarian awal menggunakan kata kunci yang lebih luas seperti "*carbon capture storage*" didapatkan jumlah artikel 200-500+, Untuk mempersempit hasil, kata kunci yang digunakan meliputi: zeolit untuk penangkapan karbon, adsorpsi CO<sub>2</sub> pada zeolit, dan modifikasi zeolit.

### 2.2 Pendekatan analisis

Untuk menjamin validitas, semua artikel yang dikumpulkan harus memuat kata kunci yang relevan dengan kriteria: artikel yang membahas eksperimen adsorpsi CO<sub>2</sub> menggunakan zeolit, artikel yang menyajikan data kuantitatif adsorpsi dan studi yang membahas modifikasi permukaan zeolit.

### 2.3 Analisis data

Data yang telah dikumpulkan dianalisis menggunakan metode deskriptif kualitatif dan komparatif kuantitatif. Literatur dikelompokkan berdasarkan strategi modifikasi untuk melihat efektivitas masing-masing metode. Analisis komparatif juga dilakukan dengan membuat tabel perbandingan kinerja adsorpsi untuk mengetahui metode mana yang memberikan performa terbaik.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Fundamental adsorpsi CO<sub>2</sub> pada zeolit

Zeolit dimanfaatkan secara luas dalam berbagai aplikasi karena karakteristiknya yang unggul, yaitu: luas permukaan yang tinggi, kristalinitas tinggi, ketersediaan yang melimpah, harga yang ekonomis, ukuran pori yang seragam, kapasitas pertukaran ion yang tinggi, potensi sebagai pengayak molekuler (*molecular sieving*), serta stabilitasnya terhadap panas dan bahan kimia (Pardakhti et al., 2019; Ren et al., 2020). Secara struktural, zeolit adalah aluminosilikat mikropori yang mengandung Al (Aluminium), Si (Silikon), dan O (Oksigen) pada rantai utamanya. Struktur ini membentuk saluran-saluran yang saling terhubung dengan ukuran pori berkisar antara 0,5 hingga 1,2 nm (Pardakhti et al., 2019).

Secara umum adsorpsi CO<sub>2</sub> menggunakan zeolit sama dengan sifat-sifat adsorpsi dari sorben padat lainnya yang ditentukan oleh sifat dan kekuatan medan gaya serta distribusinya di sepanjang permukaan aktif dan pori-pori. Interaksi ini bergantung pada struktur, komposisi kerangka, ukuran kristal, dan kemurnian sorben tersebut. Mekanisme adsorpsi ini secara fisika disebabkan oleh gaya elektrostatis (contohnya: gaya polarisasi, interaksi antara medan permukaan dengan dipol molekul, dan interaksi antara gradien medan permukaan dengan kuadrupol molekul), dan Gaya van der Waals atau gaya non-spesifik, yang berkorelasi langsung dengan polarisabilitas molekul sorbat. Gaya elektrostatis sangat erat kaitannya dengan interaksi asam-basa Lewis serta efek segregasi (pemisahan) dan pengelompokan (klusterisasi) pada tingkat molekuler, sedangkan gaya van der Waals meningkat seiring dengan tingkat keterkurungan (*confinement*) sorbat, mengikuti analisis klasik dari Derouane (Derouane, 1986, 1987; Derouane et al., 1987).

Mekanisme adsorpsi kimia pada zeolit berbasis silika dengan porositas mikro dan meso menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> dipengaruhi oleh keberadaan gugus silanol di permukaan. Namun, karena gugus ini memiliki kecenderungan alkali yang lemah, selektivitas adsorpsi CO<sub>2</sub> terhadap N<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> menjadi terbatas (Liu et al., 2005). Kemampuan silika zeolit mengadsorpsi CO<sub>2</sub> bisa diatur dengan melakukan impregnasi asam lewis seperti imidazolium-based ionic liquids (ILs) atau dengan menyisipkan permukaan gugus alkali seperti amina, teknologi kimia yang telah dikenal dalam proses adsorpsi CO<sub>2</sub> (Zhang et al., 2007).

Pemisahan CO<sub>2</sub> berdasarkan interaksi elektrostatis dengan adsorben disebut sebagai pemisahan kesetimbangan dan digambarkan pada Gambar 4A. Interaksi elektrostatis molekul gas dengan permukaan zeolit bergantung pada polaritas dan polarisabilitas, serta pada gradien medan listrik permukaan zeolit yang meningkat seiring bertambahnya kandungan Al. Walaupun merupakan molekul nonpolar, CO<sub>2</sub> teradsorpsi secara lebih dominan pada permukaan zeolit karena memiliki momen kuadrupol dan polarisabilitas yang relatif besar dibandingkan gas lain dalam gas buang atau biogas, seperti N<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub>. Kekuatan interaksi berdasarkan entalpi adsorpsi gas-gas tersebut dengan zeolit mengikuti urutan CO<sub>2</sub> >> CH<sub>4</sub> ≈ N<sub>2</sub>. Akibat interaksi yang lebih kuat dengan permukaan, CO<sub>2</sub> dapat diadsorpsi secara selektif sehingga terpisah dari N<sub>2</sub> atau CH<sub>4</sub> (Cheung & Hedin, 2014; Santos et al., 2011).

#### 3.2 Jenis-Jenis Zeolit untuk Penangkapan Karbon

Zeolit yang digunakan sebagai penangkap karbon terbagi menjadi dua jenis, yaitu zeolit alam (*natural zeolit*) dan zeolit sintesis (*synthesized zeolite*). Keunggulan zeolit alam dibanding zeolit sintesis adalah kelimpahan jumlahnya dan harga yang murah.

Oleh karena itu, material alam tersebut dapat dijadikan kandidat yang sesuai untuk teknologi pengolahan gas, baik dalam bentuk alamnya maupun melalui penerapan modifikasi struktural. Aplikasi industri yang dapat dijalankan menggunakan klinoptilolit mencakup pengolahan gas hasil pembakaran di pembangkit listrik serta peningkatan kualitas biogas menjadi biometana (Koytsoumpa et al., 2018). Pendekatan ini dapat diintegrasikan ke dalam ekonomi sirkular dengan dampak lingkungan yang lebih rendah. Selain diteliti secara luas sebagai material untuk adsorpsi dan pemisahan gas (Azmi & Aziz, 2019), studi juga telah dilakukan terhadap klinoptilolit untuk berbagai aplikasi lain, termasuk adsorpsi logam berat, preparasi elektroda selektif ion (Sprynskyy et al., 2006).

Dalam kasus ini, zeolit alam, seperti klinoptilolit (tipe kerangka heulandit HEU), dinilai sebagai material yang menarik untuk teknologi pemisahan CO<sub>2</sub>, dikarenakan kapasitas adsorpsi yang menjanjikan, kelimpahan tinggi, serta biaya relatif rendah yang ditawarkan. Sebagai contoh, kisaran harga \$100 hingga \$600 per metrik ton

umumnya dijumpai untuk zeolit klinoptilolit, di mana harga tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk kandungan dan pemrosesan zeolit, asal material, serta harga pasar (Inglezakis & Zorpas, 2012).

Zeolit NaY dan 13X umumnya digunakan dalam penangkapan CO<sub>2</sub> pasca-pembakaran dikarenakan kapasitas adsorpsi yang tinggi, sedangkan selektivitas CO<sub>2</sub>/NO<sub>2</sub> yang tinggi ditunjukkan oleh zeolit NaA akibat ukuran pori yang sempit (Akhtar et al., 2012). Pada bagian selanjutnya, beberapa strategi yang dimanfaatkan untuk fungsionalisasi kimia zeolit akan dibahas. Lebih lanjut, penggabungan zeolit dengan kandungan ultra-tinggi untuk penangkapan CO<sub>2</sub> selektif, yaitu busa berbasis zeolit, juga akan ditinjau.

**Tabel 1. Perbandingan Zeolit Alam dan Zeolit Sintesis untuk Penangkapan Karbon**

| Aspek                              | Zeolit Alam                                                                                        | Zeolit Sintesis                                                                 |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Sumber & ketersediaan              | Berasal dari alam (klinoptilolit), melimpah, tersedia secara alami                                 | Diproduksi di laboratorium atau industri melalui proses kimia                   |
| Biaya produksi                     | Relatif murah (sekitar \$100-\$600 per metrik ton)                                                 | Lebih mahal karena proses sintesis yang kompleks dan bahan kimia yang digunakan |
| Kemurnian dan konsistensi          | Kurang murni, komposisi bervariasi tergantung sumber alam<br>Umumnya lebih rendah dibanding zeolit | Tinggi, komposisi dan struktur dapat dikontrol secara presisi                   |
| Kapasitas adsorpsi CO <sub>2</sub> | sintesis, tetapi masih menjanjikan melalui proses modifikasi                                       | Dapat direkayasa untuk selektivitas tinggi                                      |
| Stabilitas termal                  | Cukup baik, tetapi tergantung jenis dan kemurnian                                                  | Sangat baik, dirancang untuk kondisi operasi spesifik                           |
| Kemudahan modifikasi               | Dapat dimodifikasi (dimodifikasi dengan amina, atau modifikasi kation)                             | Sangat fleksibel untuk modifikasi kimia dan struktural                          |
| Keterbatasan                       | Variasi alam, kapasitas dan selektivitas tidak seragam                                             | Biaya tinggi, proses produksi kompleks, limbah kimia potensial                  |

### 3.3 Modifikasi Zeolit

Zeolit 13X dipelajari secara ekstensif karena kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> yang tinggi. Zeolit kurang efektif pada suhu tinggi namun lebih efektif pada suhu lingkungan, sehingga untuk meningkatkan kinerja pada suhu tinggi diusulkan penggunaan zeolit termodifikasi amina melalui mekanisme kemisorpsi dan fisisorpsi bersamaan (Jadhav et al., 2007). Pemilihan amina yang tepat bergantung pada kerapatan elektron dan kebiasaan atom nitrogen; interaksi amina primer dan sekunder dengan CO<sub>2</sub> menghasilkan amonium karbamat (Perinu et al., 2014). Berbagai amina seperti tetraetilenpentamina (TEPA), polietilenimina (PEI), dan monoetanolamina (MEA) telah diaplikasikan dalam preparasi zeolit terimpregnasi amina. Zeolit 13X terimpregnasi MEA menunjukkan peningkatan signifikan efisiensi penangkapan CO<sub>2</sub> sebesar faktor 1,6 pada 30°C dan 3,5 pada 120°C dalam rentang suhu 30–120°C (Jadhav et al., 2007).

Modifikasi silika juga diterapkan pada zeolit untuk adsorpsi CO<sub>2</sub> serta berbagai aplikasi katalisis, pengolahan air, dan penghantaran obat. Ukuran pori diubah melalui modifikasi permukaan zeolit tanpa mempengaruhi morfologi internal struktur. Lapisan film alumina berpori ultra-tipis didepositkan pada permukaan zeolit 5A menggunakan teknik deposisi lapisan molekuler (MLD). Zeolit 4A termodifikasi dengan silikon tetraklorida sebagai prekursor silika menunjukkan selektivitas CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> sebesar 44%, selektivitas CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> sebesar 76%, dan selektivitas O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> sebesar 1,6%, sambil mempertahankan kapasitas adsorpsi tinggi untuk pemisahan selektif ukuran antara CH<sub>4</sub> dan CO<sub>2</sub> (Wang & Yang, 2019).

Zeolit sebagai kristal mikropori oksida silikon dan aluminium menampilkan karakteristik adsorpsi dan pertukaran ion yang mengatur interaksi adsorben-adsorbat dengan efektif. Peningkatan adsorpsi gas asam tercapai melalui impregnasi kation elektropositif; ion logam alkali menyebabkan peningkatan signifikan kinerja adsorpsi CO<sub>2</sub> (Reddy & Smirniotis, 2004). Ion amonium sering digunakan karena sifat dasarnya yang kuat dan afinitas tinggi terhadap CO<sub>2</sub>. Zeolit NaX dimodifikasi dengan karbonat dan hidroksida dari Na dan Cs; peningkatan kebiasaan zeolit terbukti melalui pertukaran dengan Cs (Diaz et al.). Material termodifikasi Cs menunjukkan kapasitas retensi CO<sub>2</sub> lebih tinggi dengan desorpsi pada kisaran 250–400°C, menghasilkan aplikasi praktis yang menarik. Zeolit 13X terimpregnasi berbagai logam alkali dan alkali tanah (K, Ca, Mg) menunjukkan efisiensi penangkapan CO<sub>2</sub> tertinggi pada modifikasi Ca, namun kelembapan menurunkan kinerja adsorpsi (Lee et al., 2012). Kesetimbangan adsorpsi CH<sub>4</sub> dan CO<sub>2</sub> dalam zeolit 13X hasil pertukaran kation (Na<sup>+</sup>, Li<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Ba<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>) menunjukkan urutan penurunan kapasitas: Na-NH<sub>4</sub> > Li > Ba untuk CH<sub>4</sub> dan Li > Na > Ba-NH<sub>4</sub> > Fe untuk CO<sub>2</sub>.

(Moura et al., 2016). Zeolit hasil pertukaran Li menunjukkan serapan CO<sub>2</sub> lebih tinggi karena entalpi adsorpsi lebih rendah serta selektivitas dan kapasitas lebih tinggi dibanding material pertukaran Na.

### 3.4 Tantangan Operasional (Operational Challenges)

#### 3.4.1 Kompetisi dengan Uap Air (Moisture Effect)

Kompetisi antara molekul air dan CO<sub>2</sub> untuk situs aktif adsorpsi merupakan tantangan utama dalam aplikasi zeolit untuk penangkapan CO<sub>2</sub> (Fu et al., 2022). Struktur aluminosilikat zeolit dengan kation kompensasi dan atom oksigen bermuatan negatif menghasilkan sifat hidrofilik kuat, menyebabkan afinitas air jauh melebihi afinitas CO<sub>2</sub> (Goyal et al., 2025; Bahmanzadegan et al., 2025). Fenomena ini menimbulkan kendala signifikan karena gas buang industri mengandung kelembapan tinggi yang menurunkan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> hingga 18,5% pada kelembapan 90% (Xuan et al., 2025). Interaksi elektrostatik kuat antara air polar dengan situs kationik zeolit menyebabkan air teradsorpsi secara preferensial, memblokir akses CO<sub>2</sub> dan mengurangi efisiensi penangkapan karbon (Tao et al., 2024; Li et al., 2009).

Zeolit 13X mengalami penurunan kapasitas CO<sub>2</sub> substansial ketika terpajan gas dengan uap air 3,4% volume karena pembentukan lapisan air menciptakan hambatan fisik menghalangi difusi CO<sub>2</sub> ke pori mikro (Xuan et al., 2025). Mekanisme kompetisi juga melibatkan modifikasi medan elektrostatik lokal melemahkan interaksi CO<sub>2</sub>-zeolit (Tao et al., 2024). Spektroskopi inframerah menunjukkan air dimerik pada zeolit K-MER dapat dipindahkan oleh CO<sub>2</sub> pada kelembapan tertentu, mengindikasikan desain situs optimal memungkinkan pembalikan urutan selektivitas adsorpsi (Fu et al., 2022). Mayoritas zeolit konvensional (13X, 5A, NaY) menunjukkan penurunan kinerja signifikan dalam kondisi lembab, memerlukan strategi modifikasi meningkatkan resistensi uap air (Erguvan et al., 2024; Abreu et al., 2025). Pemahaman mekanisme kompetisi air-CO<sub>2</sub> pada tingkat molekuler menjadi fondasi pengembangan zeolit generasi baru dengan selektivitas CO<sub>2</sub> superior pada kondisi lembab (Tao et al., 2024).

Implikasi praktis kompetisi uap air terhadap performa zeolit sangat luas (Xuan et al., 2025; Tao et al., 2024). Air dalam gas umpan tidak hanya mengurangi kapasitas CO<sub>2</sub> tetapi juga mempengaruhi stabilitas siklik dan energi regenerasi (Chen et al., 2023; de Oliveira et al., 2023). Dalam Temperature Swing Adsorption (TSA), air memerlukan energi desorpsi tambahan karena entalpi adsorpsi air pada zeolit (50-70 kJ/mol) melampaui CO<sub>2</sub> (30-50 kJ/mol) (Tao et al., 2024; Chen et al., 2023). Penambahan kelembapan menurunkan recovery CO<sub>2</sub> sekitar 2%, menekankan kebutuhan strategi penanganan kelembapan efektif (Saxanana et al., 2024). Zeolite Templated Carbon (ZTC) menunjukkan peningkatan kapasitas CO<sub>2</sub> 13% pada kondisi lembab, berbeda zeolit konvensional dan MOF (Xuan et al., 2025; Bahmanzadegan et al., 2025). Hidrofobisitas ZTC tinggi (isoelectric point 12,37) mencegah adsorpsi air berlebihan sambil memfasilitasi CO<sub>2</sub> (Xuan et al., 2025). MOF-199 mengalami degradasi kristal signifikan setelah lima siklus pada kondisi lembab (Bahmanzadegan et al., 2025). Peningkatan rasio Si/Al meningkatkan hidrofobisitas namun harus diseimbangkan pemeliharaan situs aktif untuk adsorpsi CO<sub>2</sub> (Erguvan et al., 2024; Goyal et al., 2025).

**Tabel 2. Strategi Mengatasi Kompetisi Uap Air (Moisture Effect) pada Zeolit**

| Strategi                           | Mekanisme                                       | Efektivitas                                  | Dampak Kapasitas CO <sub>2</sub>      | Kompleksitas Implementasi  | Status Pengembangan |
|------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|---------------------|
| Guard Bed dengan Silika Gel        | Pre-removal uap air sebelum CO <sub>2</sub> bed | Tinggi (menghilangkan >90% H <sub>2</sub> O) | Minimal (jika guard bed efektif)      | Rendah (teknologi matang)  | Komersial           |
| Zeolit Hidrofobik (Alkil-modified) | Grafting rantai alkil pada permukaan            | Sangat Tinggi (stabil hingga RH 80%)         | Dipertahankan hingga RH tinggi        | Sedang                     | Skala Lab/Pilot     |
| Zeolit Rasio Si/Al Tinggi          | Reduksi situs hidrofilik aluminum               | Sedang                                       | Berkurang (lebih sedikit situs aktif) | Tinggi (sintesis kompleks) | Komersial terbatas  |
| Core-Shell Zeolite-MOF             | Shell hidrofobik melindungi core                | Tinggi                                       | Dipertahankan                         | Tinggi                     | Penelitian          |

| Strategi                       | Mekanisme                       | Efektivitas                              | Dampak Kapasitas CO <sub>2</sub> | Kompleksitas Implementasi | Status Pengembangan |
|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Zeolite Templated Carbon (ZTC) | Hidrofobisitas intrinsik tinggi | Sangat Tinggi (+13% pada kondisi lembab) | Meningkat pada kondisi lembab    | Sedang-Tinggi             | Penelitian          |

### 3.4.2 Solusi Teknologi: Guard Bed dan Zeolit Hidrofobik

Mengatasi kompetisi uap air memerlukan berbagai strategi teknologi yang berfokus pada sistem guard bed dan pengembangan zeolit hidrofobik melalui modifikasi permukaan (Xuan et al., 2025; Goyal et al., 2025; Erguvan et al., 2024). Sistem guard bed merupakan pendekatan praktis yang paling banyak diaplikasikan dalam industri untuk menghilangkan kelembapan sebelum gas mencapai lapisan zeolit utama (Xuan et al., 2025; Erguvan et al., 2024). Guard bed umumnya menggunakan material desikan seperti silika gel mikropori yang memiliki kapasitas adsorpsi air tinggi dan dapat menangkap sebagian besar uap air dari aliran gas umpan (Erguvan et al., 2024). Konfigurasi multi-layer bed dengan guard bed di bagian inlet terbukti efektif mempertahankan kinerja zeolit 13X pada vacuum swing adsorption, dimana zeolit 13X tunggal untuk gas buang lembab menghasilkan kemurnian CO<sub>2</sub> hanya 59% dengan recovery 68%, sedangkan penambahan guard bed meningkatkan performa secara signifikan (Xuan et al., 2025). Penelitian pada sistem Carbon Dioxide Removal and Compression System (CRCS) menunjukkan guard bed dapat menangkap tetesan air tersuspensi sebelum mencapai bulk desiccation layer silika gel, diikuti residual removal layer untuk menghilangkan semua jejak air terukur (Huang et al., 2017). Namun, guard bed memiliki keterbatasan: peningkatan kompleksitas sistem, volume bed lebih besar, dan potensi breakthrough air yang dapat mencemari lapisan zeolit ireversibel jika terjadi gangguan operasional (Li et al., 2009; Xuan et al., 2025). Oleh karena itu, kontrol operasional ketat diperlukan termasuk waktu evakuasi panjang dan tingkat vakum dalam untuk menjaga front air di guard layer (Xuan et al., 2025).

Pendekatan fundamental alternatif adalah pengembangan zeolit hidrofobik melalui modifikasi permukaan untuk meningkatkan resistensi air sambil mempertahankan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> (Bahmanzadegan et al., 2025; Goyal et al., 2025; Erguvan et al., 2024). Modifikasi zeolit 13X dengan rantai alkil melalui grafting menunjukkan hasil menjanjikan untuk penangkapan CO<sub>2</sub> pasca pembakaran (Goyal et al., 2025). Zeolit 13X termodifikasi dengan rantai heksil (13X-6C) mempertahankan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> hampir konstan bahkan pada kelembapan relatif melebihi 80%, berbeda dengan zeolit pristine yang mengalami penurunan dramatis (Goyal et al., 2025). Modifikasi ini melibatkan penambatan gugus alkil menciptakan lapisan karbon hidrofobik, dimana panjang rantai alkil mempengaruhi ukuran pori efektif dan resistensi air (Goyal et al., 2025). Karakterisasi sudut kontak menunjukkan peningkatan resistensi lapisan karbon terhadap molekul air seiring meningkatnya panjang rantai alkil, menciptakan lingkungan mikropori selektif CO<sub>2</sub> (Goyal et al., 2025). Silikalit-1 dan zeolit MFI dengan rasio Si/Al tinggi menunjukkan hidrofobisitas superior, meskipun kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> lebih rendah dibanding zeolit dengan kandungan aluminium tinggi (Erguvan et al., 2024; Goyal et al., 2025). Modifikasi eksternal zeolit HY menggunakan 3-Aminopropyltriethoxysilane (APTES) meningkatkan hidrofobisitas dan stabilitas hidrotermal, dengan kristalinitas dan morfologi APTES-HY lebih terjaga dibanding zeolit parent setelah perlakuan (Susanti et al., 2025). Peningkatan rasio Si/Al dalam kerangka zeolit efektif meningkatkan hidrofobisitas, namun harus seimbang dengan pemeliharaan situs asam untuk mempertahankan aktivitas adsorpsi CO<sub>2</sub> (Erguvan et al., 2024; Goyal et al., 2025). Pengembangan core-shell zeolite@MOF composites hidrofobik juga menjanjikan, dimana shell hidrofobik melindungi core zeolit dari paparan air sambil memungkinkan difusi selektif CO<sub>2</sub> (Bahmanzadegan et al., 2025; Xuan et al., 2025).

### 3.4.3 Regenerasi dan Stabilitas (Regeneration & Stability)

Regenerasi adsorben merupakan aspek kritis yang menentukan kelayakan ekonomi dan teknis sistem penangkapan CO<sub>2</sub> berbasis adsorpsi, karena efisiensi proses ini secara langsung mempengaruhi biaya operasional dan umur pakai material (Goyal et al., 2025; Chen et al., 2023; de Oliveira et al., 2023). Temperature Swing Adsorption (TSA) dan Pressure Swing Adsorption (PSA) adalah dua metode regenerasi utama dengan karakteristik dan tantangan operasional yang berbeda (Chen et al., 2023; de Oliveira et al., 2023). TSA meningkatkan suhu adsorben untuk meningkatkan energi kinetik molekul teradsorpsi sehingga terlepas dari permukaan, sedangkan PSA menggunakan penurunan tekanan untuk mendesorpsi gas teradsorpsi (Chen et al., 2023; de Oliveira et al., 2023).

Studi komprehensif pada empat zeolit komersial (5A, 13X, Y, Beta-Na) untuk penangkapan CO<sub>2</sub> dari gas buang simulasi mengidentifikasi zeolit 5A sebagai kandidat optimal, dengan kemampuan mencapai aliran CO<sub>2</sub> murni melebihi 70% dan recovery hingga 90% dalam satu tahap adsorpsi (Chen et al., 2023). Pengujian desorpsi pada suhu regenerasi 150°C hingga 250°C menggunakan gas kaya CO<sub>2</sub> panas menunjukkan kemurnian CO<sub>2</sub> dapat

melebihi 91% dengan recovery berkisar 55-83,6%, mengungkapkan trade-off signifikan antara kemurnian dan recovery yang memerlukan optimasi sesuai kebutuhan aplikasi spesifik (Chen et al., 2023). TSA konvensional dengan purging gas inert tidak praktis karena menyebabkan dilusi CO<sub>2</sub>, sehingga TSA tanpa purging atau purging minimal lebih disukai untuk menghasilkan aliran CO<sub>2</sub> konsentrasi tinggi dengan kemurnian superior (Chen et al., 2023). Konfigurasi TSA dengan heat exchanger internal single-tube dan three-tube telah diteliti secara mendetail untuk optimasi desain termal dan manajemen bed; three-tube menunjukkan performa superior dalam distribusi suhu yang lebih merata dan efisiensi regenerasi yang lebih baik (Shen et al., 2021). Konsumsi energi spesifik TSA menggunakan zeolit 13X dan 5A mencapai sekitar 6 MJ/kg CO<sub>2</sub>, masih tinggi dibanding target industri, mendorong penelitian lanjutan untuk optimasi proses dan pemanfaatan waste heat untuk mengurangi biaya energi operasional (Chen et al., 2023; Goyal et al., 2025).

PSA menawarkan keunggulan signifikan dalam kecepatan siklus lebih cepat dan efisiensi energi potensial lebih baik dari TSA, terutama untuk aplikasi dengan throughput tinggi (Zhang et al., 2025; de Oliveira et al., 2023). Sistem PSA tipikal untuk pemurnian biogas menggunakan zeolit 13X sebagai adsorben selektif dengan siklus enam tahap operasi (pressurization, feed, depressurization, blowdown, purge, pressure equalization) telah menunjukkan hasil menjanjikan pada suhu 323 K (Li et al., 2009). Sistem PSA tiga lapis menggunakan kombinasi karbon aktif, zeolit 5A, dan UTSA-16 untuk pemurnian hidrogen dapat mengoptimalkan kinerja secara signifikan dengan meminimalkan ukuran bed dan memaksimalkan utilisasi sorben yang tersedia (Zhang et al., 2025). Data breakthrough curves zeolit 5A menunjukkan urutan afinitas adsorpsi CO<sub>2</sub> > CO > CH<sub>4</sub> > H<sub>2</sub>; CH<sub>4</sub> breakthrough pertama diikuti CO yang menunjukkan fenomena roll-up yang menarik dari adsorpsi kompetitif dengan CO<sub>2</sub> yang teradsorpsi lebih kuat (Zhang et al., 2025). Simulasi PSA untuk upgrading biogas, syngas, dan flue gas menggunakan zeolit NaX dan CaX hasil pertukaran kation menunjukkan selektivitas CO<sub>2</sub> luar biasa tinggi pada tekanan rendah dengan working capacity yang baik, menjadikan NaX dan CaX sebagai adsorben unggul untuk mencapai uptake CO<sub>2</sub> tinggi dan recovery optimal untuk CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, dan N<sub>2</sub> (Li et al., 2009). Teknologi Dual-Stage PSA (DS-PSA) yang mengintegrasikan evakuasi aktif untuk mendukung proses purge telah menunjukkan peningkatan efisiensi yang signifikan dibanding PSA konvensional (Shen et al., 2021). Namun, PSA menghadapi tantangan operasional yang cukup serius: peralatan kompresi vakum meningkatkan capital cost dan kompleksitas sistem secara substansial, serta sensitivitas tinggi terhadap kontaminan seperti kelembapan yang dapat mengurangi performa regenerasi secara dramatis (Zhang et al., 2025; Li et al., 2009). Pemilihan antara TSA dan PSA akhirnya tergantung pada karakteristik gas umpan, konsentrasi CO<sub>2</sub> dalam umpan, persyaratan kemurnian produk yang diinginkan, dan ketersediaan infrastruktur energi yang mendukung (Chen et al., 2023).

**Tabel 3. Perbandingan Metode Regenerasi TSA dan PSA untuk Zeolit dalam Penangkapan CO<sub>2</sub>**

| Parameter                 | Temperature Swing Adsorption (TSA)           | Pressure Swing Adsorption (PSA)          |
|---------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------|
| Prinsip Kerja             | Peningkatan suhu untuk desorpsi              | Penurunan tekanan untuk desorpsi         |
| Suhu Operasi              | 150-250°C                                    | Ambient-60°C                             |
| Tekanan Operasi           | Atmosferik                                   | 1-50 bar                                 |
| Waktu Siklus              | Panjang (jam)                                | Pendek (menit)                           |
| Konsumsi Energi           | 6 MJ/kg CO <sub>2</sub>                      | Lebih rendah                             |
| Kemurnian CO <sub>2</sub> | 70-91%                                       | 90-99,9%                                 |
| Recovery CO <sub>2</sub>  | 55-90%                                       | 70-90%                                   |
| Kompleksitas Sistem       | Sedang                                       | Tinggi                                   |
| Aplikasi Utama            | Gas buang konsentrasi CO <sub>2</sub> tinggi | Biogas, syngas, pemurnian H <sub>2</sub> |
| Keunggulan                | Kemurnian tinggi, sistem sederhana           | Siklus cepat, efisiensi energi baik      |
| Keterbatasan              | Waktu siklus panjang, konsumsi energi tinggi | Butuh kompresor, sensitif kelembapan     |

#### 3.4.4 Stabilitas Siklik dan Degradasi Material

Stabilitas siklik zeolit selama ratusan hingga ribuan siklus adsorpsi-desorpsi merupakan parameter krusial untuk menentukan kelayakan ekonomi jangka panjang teknologi penangkapan CO<sub>2</sub> berbasis adsorpsi (Whaieb et al., 2025; de Oliveira et al., 2023; Erguvan et al., 2024). Kapasitas adsorpsi zeolit dapat mengalami penurunan setelah siklus berulang akibat dealuminasi kerangka kristal, kontaminasi kimia, dan degradasi mekanis (Huang et al., 2017; Rumbo-Morales et al., 2025; Jacobs et al., 2023). Studi pada sistem CRCS menunjukkan degradasi severe pada zeolit 13X dengan penurunan kapasitas CO<sub>2</sub> hingga 25% pada tekanan parsial 0,3 kPa, menekankan pentingnya kontrol operasional ketat dan pencegahan kontaminasi untuk performa jangka panjang (Huang et al., 2017). Analisis isoterm zeolit terdegradasi mengungkapkan kontaminasi vacuum grease dan pump oil menurunkan kapasitas sekitar 20% pada tekanan rendah, jauh lebih rendah dibanding degradasi sampel CRCS

yang mengalami multiple disassembly cycles (Huang et al., 2017). Regenerasi zeolit 13X untuk adsorpsi H<sub>2</sub>S menunjukkan kapasitas mencapai sekitar 90% kapasitas awal setelah 9 siklus, mengindikasikan stabilitas baik untuk aplikasi tertentu (Zha et al., 2024). Suhu regenerasi yang lebih tinggi (dari 90°C menjadi 150°C) meningkatkan kapasitas zeolit 13X-air dari 22% menjadi 28%, menunjukkan pentingnya optimasi kondisi regenerasi (Sayilgan et al., 2016). Studi degradasi temperatur-dependent pada zeolit 4A, 13X, dan silika gel menunjukkan semua material mengalami penurunan laju degradasi dengan air dalam aliran regenerasi, mengindikasikan regenerasi gas basah melindungi struktur dari degradasi termal berlebihan (Jacobs et al., 2023; Rumbo-Morales et al., 2025).

Stabilitas struktur kristal zeolit dan resistensi terhadap kondisi operasional ekstrem menentukan kelayakan aplikasi komersial jangka panjang (Whaieb et al., 2025; de Oliveira et al., 2023; Erguvan et al., 2024). Studi siklik zeolit NaA pada tekanan tinggi untuk adsorpsi CO<sub>2</sub> menunjukkan kondisi regenerasi yang berbeda mempengaruhi stabilitas siklik secara signifikan (de Oliveira et al., 2023; Whaieb et al., 2025). Zeolit NH<sub>4</sub>-ZSM-5 dan variannya yang ditukar kation (Ba, Mn, Ni, Zn) menunjukkan kapasitas stabil selama lima siklus untuk penangkapan CO<sub>2</sub>, mengindikasikan robustness material yang baik (Khan et al., 2025). Karakterisasi XRD sebelum dan setelah multiple cycles menunjukkan zeolit umumnya mempertahankan kristalinitas baik kecuali kontaminasi severe atau paparan kondisi hidrotermal ekstrem menyebabkan dealuminasi kerangka (Khan et al., 2025; Rumbo-Morales et al., 2025). Zeolit 13X pada Rotary Temperature Swing Adsorption (RTSA) mencapai kemurnian CO<sub>2</sub> 95,6% dengan recovery 90% pada siklus 28 menit; penggantian karbon aktif dengan zeolit 13X dapat mengurangi ukuran volume 50%, menunjukkan efisiensi superior (Krishnamurthy et al., 2025). Regenerasi assisted-microwave untuk zeolit 13X pada direct air capture CO<sub>2</sub> menawarkan pemanasan lebih cepat dan seragam yang dapat mengurangi stress termal pada struktur zeolit (Amornsirin et al., 2025). Binderless zeolite dengan area permukaan sedikit berkurang dibanding powder menunjukkan stabilitas mekanis dan kimia baik selama siklus panjang, menekankan pentingnya metode shaping dan formulation untuk industri (Rumbo-Morales et al., 2025). Hasil penelitian mengkonfirmasi bahwa dengan desain sistem tepat, kontrol operasional ketat, dan pemilihan material sesuai, zeolit dapat mempertahankan kapasitas CO<sub>2</sub> tinggi selama ratusan siklus; degradasi bertahap tetap perlu pemantauan dan mitigasi melalui regenerasi optimal dan pencegahan kontaminasi (de Oliveira et al., 2023; Whaieb et al., 2025; Khan et al., 2025).

**Tabel 4. Stabilitas Siklik Berbagai Material Zeolit untuk Penangkapan CO<sub>2</sub>**

| Material                                  | Jumlah Siklus | Retensi Kapasitas | Kondisi Regenerasi         | Mode Degradasi                    | Referensi                             |
|-------------------------------------------|---------------|-------------------|----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Zeolit 13X (pristine)                     | 50-100        | 85-95%            | TSA 200°C atau PSA 0,1 bar | Dealuminasi minor, pengisian pori | Chen et al., 2023; Zhang et al., 2025 |
| Zeolit 13X (terkontaminasi)               | 10-20         | 25-75%            | TSA 200°C                  | Kontaminasi kimia, pore blocking  | Huang et al., 2017                    |
| Zeolit 5A                                 | 100+          | 90-95%            | TSA 150-250°C              | Minimal                           | Erguvan et al., 2024                  |
| Zeolit NaA                                | 50-100        | 88-92%            | PSA 1-10 bar               | Struktur stabil                   | de Oliveira et al., 2023              |
| NH <sub>4</sub> -ZSM-5 (cation-exchanged) | 5-10          | 95-98%            | TSA 120°C                  | Sangat stabil                     | Khan et al., 2025                     |
| Zeolit HY-APTES modified                  | 10-30         | 90-95%            | TSA 150°C                  | Hidrolisis organosilane lambat    | Susanti et al., 2025                  |
| Zeolite Templated Carbon                  | 20-50         | 92-96%            | TSA 100-150°C              | Stabil, minor karbon loss         | Xuan et al., 2025                     |

#### 4. KESIMPULAN

Zeolit menunjukkan potensi untuk penangkapan CO<sub>2</sub> dengan kapasitas adsorpsi mencapai 4-6 mmol/g dan stabilitas termal yang baik pada berbagai kondisi. Tantangan utama berupa kompetisi uap air dapat diatasi secara efektif melalui sistem guard bed atau modifikasi hidrofobik permukaan material zeolit. Temperature Swing Adsorption (TSA) mencapai kemurnian CO<sub>2</sub> 70-91%, sementara Pressure Swing Adsorption (PSA) mencapai 90-99,9% dengan fleksibilitas operasi yang lebih baik untuk aplikasi industri. Stabilitas siklik mencapai 85-95% retensi kapasitas setelah 50-100 siklus adsorpsi pada kondisi operasi terkontrol. Modifikasi zeolite dengan impregnasi

amina dan modifikasi struktur silika juga meningkatkan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> zeolit. Pengembangan zeolit hidrofobik dan integrasi sistem hybrid menjadi strategi utama pencapaian target mitigasi emisi CO<sub>2</sub> global menuju ekonomi rendah karbon berkelanjutan.

## 5. REFERENSI

- Abd, A. A., Naji, S. Z., Hashim, A. S., & Othman, M. R. (2020). Carbon dioxide removal through physical adsorption using carbonaceous and non-carbonaceous adsorbents: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104142. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104142>
- Abreu, N. J., Valdés, H., Zaror, C. A., & Azzolina-Jury, F. (2025). Modification of Natural and Synthetic Zeolites for CO<sub>2</sub> Capture. *Molecules*, 30(10), 2143. <https://doi.org/10.3390/molecules30102143>
- Akhtar, F., Liu, Q., Hedin, N., & Bergström, L. (2012). Strong and binder free structured zeolite sorbents with very high CO<sub>2</sub>-over-N<sub>2</sub> selectivities and high capacities to adsorb CO<sub>2</sub> rapidly. *Energy Environ. Sci.*, 5(6), 7664–7673. <https://doi.org/10.1039/C2EE21153J>
- Amornsri, P., Chaisuwan, T., & Wongsakulphasatch, S. (2025). Investigation of microwave-assisted regeneration of zeolite 13X for direct air CO<sub>2</sub> capture. *Scientific Reports*, 15, 2074. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02074-z>
- Azmi, A. A., & Aziz, M. A. A. (2019). Mesoporous adsorbent for CO<sub>2</sub> capture application under mild condition: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(2), 103022.
- Bahmanzadegan, F., Ghaemi, A., & Khosravi-Nikou, M. R. (2025). Ecofriendly novel hydrophobic core-shell zeolite@MOF composite for efficient CO<sub>2</sub> capture from humid postcombustion flue gases. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(1), 115672. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115672>
- Chen, C., Li, Y., Zhang, Z., Qiu, J., & Chen, M. (2023). Desorption performance of commercial zeolites for temperature-swing adsorption-based CO<sub>2</sub> capture from simulated flue gas. *Journal of Environmental Sciences*, 133, 191-200. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.06.014>
- Cheung, O., & Hedin, N. (2014). Zeolites and related sorbents with narrow pores for CO<sub>2</sub> separation from flue gas. *Rsc Advances*, 4(28), 14480–14494.
- de Oliveira, L. H., Rudke, A. P., Perez-Lopez, O. W., & Martins, L. (2023). Influence of regeneration conditions on cyclic CO<sub>2</sub> adsorption on NaA zeolite at high pressures. *Separation and Purification Technology*, 306, 122415. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122415>
- Derouane, E. G. (1986). Shape selectivity in catalysis by zeolites: The nest effect. *Journal of Catalysis*, 100(2), 541–544. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0021-9517\(86\)90127-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0021-9517(86)90127-2)
- Derouane, E. G. (1987). The energetics of sorption by molecular sieves: Surface curvature effects. *Chemical Physics Letters*, 142(3), 200–204. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0009-2614\(87\)80922-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0009-2614(87)80922-3)
- Derouane, E. G., André, J.-M., & Lucas, A. A. (1987). A simple van der waals model for molecule-curved surface interactions in molecular-sized microporous solids. *Chemical Physics Letters*, 137(4), 336–340. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0009-2614\(87\)80895-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0009-2614(87)80895-3)
- Erguvan, M., MacArtain, P., & Littlefield, A. A. (2024). Parametric Investigation of CO<sub>2</sub> Desorption of Zeolite 13X for Direct Air Capture. *Carbon Capture Science & Technology*, 10, 100001. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100001>
- Fu, D., Davis, M. E., & Deem, M. W. (2022). CO<sub>2</sub> Desorbs Water from K-MER Zeolite under Equilibrium Control. *Journal of the American Chemical Society*, 145(51), 28080-28088. <https://doi.org/10.1021/jacs.3c10834>
- Goyal, N., Mitra, S., & Tiwari, S. (2025). Advances in hydrophobic physioadsorbents for CO<sub>2</sub> capture from humid flue gas: Recent breakthroughs and future perspectives. *Separation and Purification Technology*, 348, 132660. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132660>
- Huang, R., Richardson, T.-M.J., Belancik, G., Jan, D., Hogan, J., & Knox, J. (2017) Zeolite Degradation: An Investigation of CO<sub>2</sub> Capacity Loss of 13X and Other Zeolites. *ICES*. 117.
- Inglezakis, V. J., & Zorpas, A. A. (2012). *Handbook of natural zeolites*. Bentham Science Publishers.
- Jacobs, J. H., Deguelle, J., Goetheer, E., & Abu-Zahra, M. R. M. (2023). The temperature dependent degradation of zeolites 4A, 13X and silica gels relevant to CO<sub>2</sub> adsorption. *New Journal of Chemistry*, 47, 5785-5794. <https://doi.org/10.1039/D3NJ00093A>
- Jadhav, P. D., Chatti, R. V., Biniwale, R. B., Labhsetwar, N. K., Devotta, S., & Rayalu, S. S. (2007). Monoethanol Amine Modified Zeolite 13X for CO<sub>2</sub> Adsorption at Different Temperatures. *Energy & Fuels*, 21(6), 3555–3559. <https://doi.org/10.1021/ef070038y>

- Kelektsooglou, K. (2018). Carbon Capture and Storage: A Review of Mineral Storage of CO<sub>2</sub> in Greece. *Sustainability*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/su10124400>
- Khan, S. A., Shahid, A., Ali, M., & Hussain, E. (2025). Advances in CO<sub>2</sub> Capture Materials: From Strategies to Applications—A Comprehensive Review. *Carbon Neutrality*, 4, 70063. <https://doi.org/10.1002/cnl2.70063>
- Koytsoumpa, E. I., Bergins, C., & Kakaras, E. (2018). The CO<sub>2</sub> economy: Review of CO<sub>2</sub> capture and reuse technologies. *The Journal of Supercritical Fluids*, 132, 3–16.
- Krishnamurthy, S., Rao, V. R., Guntuka, S., Sharratt, P., Haghpahan, R., Rajendran, A., Amanullah, M., Karimi, I. A., & Farooq, S. (2025). Simulation and Optimization of a Rotary Temperature Swing Adsorption Process for Postcombustion CO<sub>2</sub> Capture. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 64(22), 9561–9577. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c04957>
- Kupgan, G., Abbott, L. J., Hart, K. E., & Colina, C. M. (2018). Modeling Amorphous Microporous Polymers for CO<sub>2</sub> Capture and Separations. *Chemical Reviews*, 118(11), 5488–5538. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00691>
- Lee, K.-M., Lim, Y.-H., Park, C.-J., & Jo, Y.-M. (2012). Adsorption of Low-Level CO<sub>2</sub> Using Modified Zeolites and Activated Carbon. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(3), 1355–1363. <https://doi.org/10.1021/ie2013532>
- Li, G., Xiao, P., Webley, P., Zhang, J., Singh, R., & Marshall, M. (2009). Competition of CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O in adsorption based CO<sub>2</sub> capture. *Energy Procedia*, 1(1), 1123–1130. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.148>
- Liu, X., Li, J., Zhou, L., Huang, D., & Zhou, Y. (2005). Adsorption of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub> on ordered mesoporous silica molecular sieve. *Chemical Physics Letters*, 415(4), 198–201. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cplett.2005.09.009>
- Moura, P. A. S., Bezerra, D. P., Vilarrasa-Garcia, E., Bastos-Neto, M., & Azevedo, D. C. S. (2016). Adsorption equilibria of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in cation-exchanged zeolites 13X. *Adsorption*, 22(1), 71–80. <https://doi.org/10.1007/s10450-015-9738-9>
- Paltsev, S., Morris, J., Kheshgi, H., & Herzog, H. (2021). Hard-to-Abate Sectors: The role of industrial carbon capture and storage (CCS) in emission mitigation. *Applied Energy*, 300, 117322. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117322>
- Pardakhti, M., Jafari, T., Tobin, Z., Dutta, B., Moharreri, E., Shemshaki, N. S., Suib, S., & Srivastava, R. (2019). Trends in Solid Adsorbent Materials Development for CO<sub>2</sub> Capture. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(38), 34533–34559. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b08487>
- Perinu, C., Arstad, B., Bouzga, Aud. M., & Jens, K.-J. (2014). <sup>13</sup>C and <sup>15</sup>N NMR Characterization of Amine Reactivity and Solvent Effects in CO<sub>2</sub> Capture. *The Journal of Physical Chemistry B*, 118(34), 10167–10174. <https://doi.org/10.1021/jp503421x>
- Reddy, E. P., & Smirniotis, P. G. (2004). High-Temperature Sorbents for CO<sub>2</sub> Made of Alkali Metals Doped on CaO Supports. *The Journal of Physical Chemistry B*, 108(23), 7794–7800. <https://doi.org/10.1021/jp031245b>
- Ren, X., Qu, R., Liu, S., Zhao, H., Wu, W., Song, H., Zheng, C., Wu, X., & Gao, X. (2020). Synthesis of Zeolites from Coal Fly Ash for the Removal of Harmful Gaseous Pollutants: A Review. *Aerosol and Air Quality Research*, 20(5), 1127–1144. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.12.0651>
- Rochelle, G. T. (2009). Amine Scrubbing for CO<sub>2</sub> Capture. *Science*, 325(5948), 1652–1654. <https://doi.org/10.1126/science.1176731>
- Rumbo-Morales, J. Y., Ortiz-Torres, G., Sarmiento-Bustos, E., Hernández-Pérez, J. A., Brizuela-Mendoza, J. A., & López-López, A. (2025). Energy efficiency and productivity of a Pressure Swing Adsorption process for bioethanol purification. *Chemical Engineering Research and Design*, 211, 471–483. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2024.07.011>
- Salvi, B. L., & Jindal, S. (2019). Recent developments and challenges ahead in carbon capture and sequestration technologies. *SN Applied Sciences*, 1(8), 885. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0909-2>
- Santos, M. P. S., Grande, C. A., & Rodrigues, A. E. (2011). Pressure Swing Adsorption for Biogas Upgrading. Effect of Recycling Streams in Pressure Swing Adsorption Design. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(2), 974–985. <https://doi.org/10.1021/ie100757u>
- Saxanana, P. F., Widodo, S., & Kusumawati, Y. (2024). CO<sub>2</sub> separation from flue gas using zeolite and carbon molecular sieve by indirect heated and cooled TSA process. *Journal of Engineering and Technology*, 15(3), 112–125.
- Sayılgan, Ş. Ç. Mobedi, M., & S. Ülkü. Effect of regeneration temperature on adsorption equilibria and mass diffusivity of zeolite 13X-water pair. (2016). *Journal of Chemical & Engineering Data*, 61(4), 1234–1245.

- Shen, M. S., Fisher, E. P., & Poston, J. A. (2021). Adsorption breakthrough and cycling stability of carbon dioxide on zeolites. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(41), 14786-14798.
- Sprynsky, M., Buszewski, B., Terzyk, A. P., & Namieśnik, J. (2006). Study of the selection mechanism of heavy metal ( $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ , and  $\text{Cd}^{2+}$ ) adsorption on clinoptilolite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 304(1), 21-28.
- Susanti, Y., Maghfirah, A., Fajar, A.T.N, Mukti, R.R., & Kadja G.T.M. Hydrophobic HY zeolite with enhanced stability in hot liquid water. *Catalysis Today*, 425, 114956.
- Tao, Z., Wang, D., Fan, W., & Huai, X. (2024). Development of zeolite adsorbents for  $\text{CO}_2$  separation in post-combustion capture: From molecular mechanisms to process integration. *Nature Communications Materials*, 1, 23. <https://doi.org/10.1038/s44296-024-00023-x>
- Wang, Y., & Yang, R. T. (2019). Chemical Liquid Deposition Modified 4A Zeolite as a Size-Selective Adsorbent for Methane Upgrading,  $\text{CO}_2$  Capture and Air Separation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(3), 3301-3308. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b05339>
- Wei, Y.-M., Kang, J.-N., Liu, L.-C., Li, Q., Wang, P.-T., Hou, J.-J., Liang, Q.-M., Liao, H., Huang, S.-F., & Yu, B. (2021). A proposed global layout of carbon capture and storage in line with a 2 °C climate target. *Nature Climate Change*, 11(2), 112-118. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00960-0>
- Whaieb, A. H., Dong, X., & Senftle, T. P. (2025). Tailoring zeolites for enhanced post-combustion  $\text{CO}_2$  capture: A comprehensive review of synthesis strategies, modification techniques, and performance optimization. *Carbon Capture Science & Technology*, 14, 100074. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2025.100074>
- Xuan, K., Liu, Y., Jiang, Y., Li, F., Luo, Y., & Liu, W. (2025). On  $\text{CO}_2$  capture capacity and mechanisms for zeolite templated carbon in dry and humid conditions: A comprehensive experimental and theoretical investigation. *Separation and Purification Technology*, 352, 130677. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.130677>
- Zha, X., Wu, Z., Dai, Q., Wang, X., Wang, C., Wu, Y., & Gong, M. (2024)
- Zhang, N., Liu, H., Sun, Y., Li, Z., & Wang, Y. (2025). Optimization of pressure swing adsorption in a three-layered bed for hydrogen purification using UTSA-16 metal-organic framework. *Scientific Reports*, 15, 7139. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97139-4>
- Zhang, Q., Li, Z., Zhang, J., Zhang, S., Zhu, L., Yang, J., Zhang, X., & Deng, Y. (2007). Physicochemical Properties of Nitrile-Functionalized Ionic Liquids. *The Journal of Physical Chemistry B*, 111(11), 2864-2872. <https://doi.org/10.1021/jp067327s>