

Efektivitas Sorben Karbon Dioksida Berdasarkan Kapasitas Sorpsi, Waktu Tembus, dan Keamanan: Tinjauan Naratif

Ghani Phalosa^{1*}, Taufik Riadi², M. Keflin Syahputra³

Fakultas Farmasi Militer, Universitas Pertahanan Republik Indonesia

*Corresponding author.

*Email: phalosaghani@gmail.com

Abstrak

Akumulasi karbon dioksida dalam lingkungan tertutup merupakan tantangan kritis karena berdampak langsung terhadap kesehatan, kinerja kognitif, dan keselamatan operasional. Meskipun berbagai sorben karbon dioksida telah dikembangkan, penelitian yang ada umumnya mengevaluasi kapasitas sorpsi, waktu jenuh, atau aspek keamanan secara terpisah, sehingga menghasilkan bukti yang terfragmentasi dan belum memberikan panduan komprehensif untuk penilaian kinerja secara terpadu. Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi kesenjangan tersebut melalui evaluasi komparatif dan multidimensional terhadap berbagai sorben karbon dioksida berdasarkan kapasitas sorpsi, waktu jenuh, dan aspek keamanan. Metode yang digunakan adalah tinjauan literatur naratif dengan identifikasi sistematis dan sintesis komparatif terhadap publikasi ilmiah bereputasi yang membahas adsorben berbasis reaksi kimia, seperti soda lime, litium hidroksida, dan kalsium hidroksida, serta adsorben berbasis adsorpsi fisik, seperti karbon aktif, zeolit, dan kerangka logam-organik. Hasil analisis menunjukkan bahwa adsorben berbasis reaksi kimia umumnya memiliki kapasitas sorpsi lebih tinggi akibat reaksi kimia yang cepat, namun berpotensi mengalami waktu jenuh lebih singkat dan risiko operasional terkait reaksi eksotermik serta pembentukan produk sampingan. Sebaliknya, adsorben berbasis adsorpsi fisik cenderung menunjukkan kinerja dinamis yang lebih stabil dan kemampuan regenerasi yang lebih baik, meskipun kapasitas sorpsinya relatif moderat. Disimpulkan bahwa kapasitas sorpsi saja tidak cukup untuk memprediksi efektivitas operasional. Tinjauan ini menawarkan kerangka evaluasi berbasis trade-off kinerja sebagai dasar pemilihan sorben karbon dioksida yang lebih aman dan andal dalam lingkungan tertutup.

Kata kunci : Penyerap karbon dioksida, Trade-off kinerja, Waktu jenuh, Evaluasi keamanan

Abstract

Carbon dioxide accumulation in enclosed environments is a critical challenge due to its direct impact on health, cognitive performance, and operational safety. Although various carbon dioxide sorbents have been developed, existing studies generally address sorption capacity, saturation time, or safety aspects separately, resulting in fragmented evidence and not yet providing comprehensive guidance for integrated performance assessment. This study aims to address this gap through a comparative and multidimensional evaluation of various carbon dioxide sorbents based on sorption capacity, saturation time, and safety aspects. The method used is a narrative literature review with systematic collection and comparative synthesis of reputable scientific publications discussing chemical reaction-based sorbents, such as soda lime, lithium hydroxide, and calcium hydroxide, as well as physical adsorption-based adsorbents, such as activated carbon, zeolites, and metal-organic frameworks. The analysis results indicate that chemical reaction-based sorbents generally have higher sorption capacity due to the rapid chemical reaction, but potentially experience shorter saturation times and operational risks related to exothermic reactions and the formation of byproducts. In contrast, physical adsorption-based adsorbents tend to exhibit more stable dynamic performance and better regeneration ability, despite their relatively moderate sorption capacity. It is concluded that sorption capacity alone is insufficient to predict operational effectiveness. This review offers a performance-tradeoff-based evaluation framework as a basis for selecting safer and more reliable carbon dioxide sorbents in enclosed environments.

Keywords : Carbon dioxide sorbents, Performance trade-off, Breakthrough time, Safety assessment

Pendahuluan

Karbon dioksida (CO_2) merupakan gas tidak berwarna dan tidak berbau yang secara alami terdapat di atmosfer pada kadar sekitar 400 ppm. Dalam lingkungan tertutup, akumulasi CO_2 menjadi salah satu permasalahan paling kritis karena dapat berdampak langsung terhadap kesehatan, performa kognitif, dan keselamatan manusia. Lingkungan tertutup ekstrem, seperti kapal selam, memiliki keterbatasan pertukaran udara dengan lingkungan luar, sehingga peningkatan kadar CO_2 dapat terjadi dengan cepat apabila tidak dikendalikan secara efektif. Oleh karena itu, pemantauan dan pengendalian atmosfer secara berkelanjutan menjadi aspek vital dalam menjaga keselamatan operasional (Verma et al., 2021).

Sumber utama CO_2 dalam ruang tertutup berasal dari metabolisme manusia, yang besarnya dipengaruhi oleh tingkat aktivitas fisik dan kondisi operasional. Berbagai studi melaporkan bahwa produksi CO_2 dapat berkisar dari ratusan mililiter hingga lebih dari 2 L per menit per individu, tergantung intensitas aktivitas (Tipton et al., 2006; Dziak et al., 2012; Jia et al., 2014). Dalam lingkungan dengan jumlah personel yang besar, kondisi ini dapat menyebabkan akumulasi CO_2 dalam waktu singkat, sehingga diperlukan sistem penyerap CO_2 dengan kapasitas adsorpsi yang memadai dan waktu jenuh yang cukup untuk mempertahankan konsentrasi CO_2 pada batas aman.

Soda lime merupakan salah satu absorben CO_2 berbasis reaksi kimia yang paling umum digunakan dan dilaporkan memiliki daya serap sekitar 20 L CO_2 per 100 gram material (Freys, 1999). Namun, efektivitasnya dibatasi oleh waktu jenuh yang relatif singkat pada kondisi operasional tertentu, yang dipengaruhi oleh faktor seperti laju alir gas dan beban CO_2 (Feldman et al., 2021). Keterbatasan ini mendorong pengembangan dan pemanfaatan berbagai sediaan sorben CO_2 alternatif, termasuk absorben kimia seperti kalsium hidroksida, natrium hidroksida, dan litium hidroksida, serta adsorben fisik seperti karbon aktif dan material berbasis zeolit, yang masing-masing memiliki karakteristik fisikokimia, kapasitas sorpsi, dan profil keamanan yang berbeda.

Paparan CO_2 pada kadar melebihi ambang batas aman dapat menimbulkan hiperkapnia, yang ditandai dengan peningkatan laju pernapasan, sakit kepala, gangguan

kognitif, penurunan kesadaran, hingga risiko fatal pada konsentrasi tinggi (Wang et al., 2012). Selain itu, CO₂ dilaporkan dapat memengaruhi barier epitel paru dan menurunkan mekanisme pertahanan tubuh (Vadász et al., 2012). Dalam lingkungan hiperbarik atau kondisi kerja berat, dampak negatif CO₂ dapat semakin diperparah akibat interaksi dengan gas lain, sehingga menurunkan fungsi fisiologis dan performa memori (Doolette & Mitchell, 2011; Freiburger et al., 2016). Oleh karena itu, aspek keamanan menjadi parameter penting dalam pemilihan sediaan penyerap CO₂, selain efektivitas adsorpsinya.

Meskipun berbagai penelitian telah melaporkan kinerja sediaan penyerap CO₂ dengan fokus pada kapasitas adsorpsi, waktu jenuh, atau keamanan, hasil-hasil tersebut masih tersebar dan sering disajikan secara terpisah. Kajian yang membandingkan secara terpadu berbagai sediaan penyerap CO₂ berdasarkan ketiga parameter tersebut masih terbatas. Oleh karena itu, artikel ini disusun sebagai sebuah narrative review yang bertujuan untuk membandingkan efektivitas berbagai sediaan penyerap karbon dioksida berdasarkan kapasitas adsorpsi, waktu jenuh, dan keamanan, guna memberikan gambaran komprehensif sebagai dasar pemilihan sistem penyerap CO₂ yang efektif dan aman untuk aplikasi lingkungan tertutup maupun konteks kesehatan lainnya.

Metode

Studi ini menggunakan pendekatan narrative literature review untuk membandingkan efektivitas berbagai sorben karbon dioksida (CO₂) berdasarkan kapasitas sorpsi, waktu jenuh, dan aspek keamanan. Pendekatan ini dipilih karena literatur yang tersedia menunjukkan tingkat heterogenitas yang tinggi, mencakup perbedaan desain eksperimental, mekanisme sorpsi (kimia dan fisika), kondisi operasional (suhu, tekanan, kelembaban, dan laju alir gas), serta variasi parameter dan satuan pelaporan hasil, sehingga tidak memungkinkan dilakukan meta-analisis kuantitatif terstandarisasi.

Publikasi yang relevan dikumpulkan dari basis data Scopus, PubMed, Web of Science, dan Google Scholar menggunakan kombinasi kata kunci seperti “carbon dioxide absorbent,” “CO₂ adsorption capacity,” “saturation time,” “breakthrough time,” “soda

lime,” “lithium hydroxide,” “activated carbon,” “zeolite,” dan “metal–organic frameworks.” Kriteria inklusi meliputi artikel penelitian asli, artikel tinjauan, dan laporan teknis yang diterbitkan dalam 40 tahun terakhir serta membahas kinerja, karakteristik operasional, atau aspek keamanan sorben CO₂ dalam lingkungan tertutup atau terkontrol.

Proses seleksi literatur dilakukan secara bertahap melalui identifikasi awal, penyaringan judul dan abstrak, serta evaluasi teks penuh untuk memastikan kesesuaian dengan tujuan penelitian. Duplikasi artikel dihapus, dan hanya publikasi yang memenuhi kriteria inklusi yang dianalisis lebih lanjut. Untuk meningkatkan validitas kajian, setiap sumber dievaluasi secara kritis berdasarkan reputasi jurnal, kejelasan metodologi, konsistensi hasil, serta relevansi terhadap konteks aplikasi sorben CO₂.

Data yang diekstraksi mencakup jenis dan komposisi sorben, kapasitas sorpsi, waktu jenuh, kondisi pengujian, serta potensi risiko keselamatan. Temuan kemudian dianalisis secara deskriptif-komparatif dengan mengelompokkan hasil berdasarkan jenis sorben, mekanisme sorpsi, dan kondisi operasional, untuk mengidentifikasi pola kinerja, hubungan antar parameter, serta trade-off antara kapasitas sorpsi, waktu jenuh, dan aspek keamanan.

Hasil dan Pembahasan

Untuk mempermudah perbandingan antar penyerap CO₂ yang berbeda, Tabel 1 merangkum karakteristik kinerja utama, termasuk kapasitas adsorpsi, waktu tembus, mekanisme, dan aspek keamanan.

Tabel 1. Perbandingan Karakteristik Berbagai Sediaan Penyerap Karbon Dioksida (CO₂)

Jenis Sorben	Mekanisme	Kapasitas Sorpsi (mmol CO ₂ /g)	Waktu Jenuh	Aspek Keamanan	Kelebihan	Keterbatasan
Soda Lime	Kemisorpsi	~4.5 – 6.7	±20–200 menit	Risiko panas, CO & Compound A	Kapasitas tinggi, matang	Waktu jenuh singkat
Lithium Hydroxide (LiOH)	Kemisorpsi	~12.7	Bervariasi	Reaksi eksotermik	Sangat tinggi	Mahal, regenerasi terbatas
Calcium Hydroxide (Ca(OH) ₂)	Kemisorpsi	~68 (teoretis maksimum)	Sangat tergantung kondisi	Iritasi	Murah	Sensitif kondisi
Karbon Aktif	Fisorpsi	~1.8 – 14.4	±10–54 menit	Depleksi O ₂	Stabil	Sensitif kelembaban
Zeolit	Fisorpsi + Kemisorpsi	~0.3 – 13.3	±70–175 menit	Umumnya aman	Selektif	Sensitif air
MOFs	Hybrid	~3 – 33	Sangat bervariasi	Stabilitas	Kapasitas tinggi	Mahal & kompleks

1. Kapasitas Sorpsi Karbon Dioksida (CO₂)

Kapasitas sorpsi merupakan parameter fundamental dalam mengevaluasi efektivitas sorben karbon dioksida (CO₂), karena secara langsung mencerminkan kemampuan material untuk menangkap CO₂ per satuan massa. Dalam literatur,

kapasitas sering dilaporkan dalam berbagai satuan, seperti g/g, mg/g, mmol/g, atau volume gas per massa material. Untuk memudahkan perbandingan antar material, seluruh data dalam pembahasan ini dikonversi ke satuan mmol CO₂/g.

Perbedaan mekanisme sorpsi, baik melalui absorpsi kimia (absorben) maupun adsorpsi fisik (adsorben), menyebabkan variasi yang signifikan dalam kapasitas antar berbagai jenis sorben CO₂.

Absorben Kimia

Soda Lime

Soda lime merupakan salah satu absorben CO₂ berbasis reaksi kimia yang paling luas digunakan. Kapasitas sorpsi CO₂ soda lime dilaporkan berkisar antara 0,9–8,2 mmol CO₂/g (setara dengan 0,04–0,36 g/g), dengan variasi yang dipengaruhi oleh kelembaban relatif (Gall et al., 2015).

Penelitian lanjutan menunjukkan bahwa modifikasi komposisi soda lime dapat meningkatkan performa sorpsi CO₂. Ghuge dan Mandal (2023) melaporkan bahwa penambahan silikon dioksida tidak hanya meningkatkan kekuatan tekan material, tetapi juga meningkatkan kapasitas sorpsi CO₂. Selain itu, interaksi CO₂ dengan soda lime dipengaruhi oleh kondisi kinetika reaksi, dengan konstanta laju dalam rentang $1,8 \times 10^{-2}$ hingga $1,5 \times 10^{-1} \text{ m}^2 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$, di mana laju reaksi meningkat pada kelembaban relatif yang lebih tinggi (Gall et al., 2015). Temuan ini menunjukkan bahwa kapasitas sorpsi soda lime tidak hanya bergantung pada komposisi kimia, tetapi juga pada kondisi operasional.

Perbandingan antar produk komersial menunjukkan bahwa Amsorb memiliki kapasitas sekitar 2,5–3,4 mmol/g, sedangkan Medisorb dan Sodasorb masing-masing mencapai sekitar 4,8–5,4 mmol/g dan 6,4–6,6 mmol/g (hasil konversi dari 5,5–14,8 L/100 g) (Murray et al., 1999). Meskipun memiliki kapasitas lebih rendah, Amsorb menawarkan

keunggulan tertentu, terutama tidak menyebabkan degradasi anestesi volatil, yang menjadikannya menarik dari perspektif keamanan klinis.

Lithium Hydroxide

Litium hidroksida (LiOH) dikenal sebagai penyerap CO₂ dengan kapasitas sorpsi yang sangat tinggi, terutama untuk aplikasi lingkungan tertutup ekstrem. Studi eksperimental menunjukkan bahwa LiOH dapat mencapai kapasitas sorpsi maksimum hingga sekitar 12,7 mmol CO₂/g (setara dengan 559 mg/g) (Ahmadi et al., 2023a). Kinerja penyerapan LiOH sangat dipengaruhi oleh suhu, tekanan, ukuran partikel, dan kadar air.

Pada kondisi optimal, yaitu suhu 333 K, tekanan 4,72 bar, dan ukuran partikel sekitar 200 µm, LiOH menunjukkan karakteristik penangkapan CO₂ yang sangat unggul. Proses penyerapan berlangsung melalui reaksi kimia yang kompleks, mengikuti model kinetik orde kedua, bersifat spontan, dan eksotermik (Ahmadi et al., 2023a). Kombinasi kapasitas adsorpsi tinggi dan kinetika reaksi yang cepat menjadikan LiOH sebagai salah satu penyerap CO₂ paling efektif, meskipun aspek termal dan regenerasi menjadi tantangan tersendiri dalam penggunaannya.

Calcium Hydroxide

Kalsium hidroksida (Ca(OH)₂) juga menunjukkan kemampuan penyerapan CO₂ yang signifikan, dengan performa yang sangat bergantung pada kondisi larutan dan parameter eksperimental. Kalsium hidroksida dilaporkan mampu mencapai kapasitas hingga sekitar 69,3 mmol CO₂/g (setara dengan 3,05 g/g) pada kondisi larutan jenuh (Han et al., 2011a).

Penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa suhu, konsentrasi, dan kekuatan ion memiliki pengaruh substansial terhadap laju penyerapan CO₂. Wehrung et al. (2024a) melaporkan bahwa peningkatan suhu dari 283 K menjadi 363 K dapat meningkatkan penyerapan hingga 37%, sementara keberadaan NaCl dalam air laut meningkatkan kapasitas penyerapan hingga 75%. Selain itu, penggunaan sistem pencampuran yang

lebih efisien, seperti static mixers, secara signifikan mempercepat proses pelarutan dan reaksi karbonasi.

Adsorben Fisik

Activated Carbon

Karbon aktif merupakan adsorben fisik yang mengandalkan luas permukaan dan struktur mikropori untuk menangkap CO₂. Karbon aktif yang diaktivasi menggunakan KOH dengan volume mikropori total sebesar 0,62 cm³/g dan luas permukaan sekitar 1400 m²/g menunjukkan kapasitas sorpsi sekitar 1,8 mmol CO₂/g pada kondisi eksperimental 30 mol% CO₂ dan suhu 25 °C (Shahkarami et al., 2015).

Sumber biomassa sebagai prekursor karbon aktif juga menunjukkan potensi besar. Karbon aktif dari residu kenari dilaporkan memiliki kapasitas hingga sekitar 6,8 mmol CO₂/g (hasil konversi dari 301,1 mg/g) pada suhu 25 °C dan tekanan atmosfer dalam waktu paparan 60 menit (Ahmed et al., 2023). Karbon aktif berbasis bambu juga menunjukkan kapasitas sekitar 7,0 mmol/g (Wei et al., 2012a), sedangkan karbon aktif termodifikasi dapat mencapai hingga 14,4 mmol/g (Srenscek-Nazzal et al., 2016).

Modifikasi kimia terbukti meningkatkan kapasitas adsorpsi secara signifikan. Srenscek-Nazzal et al. (2016) melaporkan bahwa karbon aktif komersial yang dimodifikasi dengan KOH mencapai kapasitas adsorpsi CO₂ hingga 14,44 mmol/g, yang berkorelasi kuat dengan peningkatan luas permukaan BET. Sementara itu, karbon aktif dari kayu zaitun menunjukkan kapasitas penyerapan maksimum antara 0,81–2,49 mmol CO₂/g, sebagaimana didukung oleh pemodelan isoterm Langmuir dan analisis termodinamika (Ibrahim et al., 2019).

Zeolite

Zeolit menunjukkan kapasitas adsorpsi CO₂ yang luas, berkisar antara 0,3–13,3 mmol CO₂/g, tergantung pada struktur, jenis kation, dan kondisi eksperimental. Karbon-templated zeolit yang terdoping nitrogen dilaporkan mencapai kapasitas tertinggi sebesar

6,9 mmol/g (Xia et al., 2011). Zeolit chabazite yang mengandung seng mampu mengadsorpsi hingga 0,67 mmol CO₂/g (Fu et al., 2022), sedangkan zeolit yang dipromosikan dengan natrium menunjukkan kapasitas tinggi hingga 13,3 mmol/g pada kadar Na sebesar 25% (Joshi & Sivachandiran, 2024).

Jenis kation memainkan peran kunci dalam performa adsorpsi, di mana kation divalen seperti Mg²⁺ dan Cu²⁺ umumnya menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan ion monovalen (Abreu et al., 2025). Selain itu, suhu, tekanan, dan ukuran pori juga sangat memengaruhi kapasitas penyerapan CO₂ pada zeolit (Norberto J. Abreu et al., 2025).

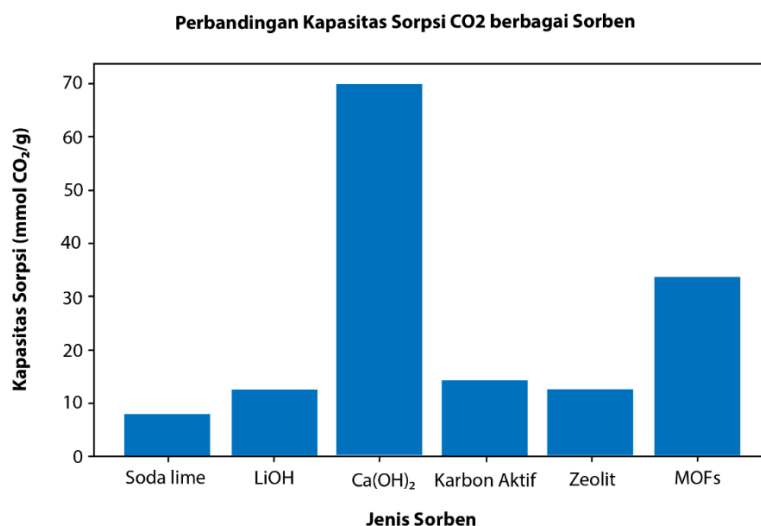
Metal–Organic Frameworks (MOFs)

Metal–organic frameworks (MOFs) merupakan kelas adsorben berpori dengan kapasitas penyerapan CO₂ yang sangat tinggi. MOFs menunjukkan kapasitas sorpsi yang sangat luas, berkisar antara sekitar 3,2–33,5 mmol CO₂/g pada suhu ruang (Millward & Yaghi, 2005), berdasarkan isoterm gravimetrik hingga tekanan 42 bar. Beberapa MOFs menunjukkan selektivitas CO₂/N₂ yang sangat tinggi, mencapai sekitar 600 pada kondisi 313 K dan 1 bar (Nandi et al., 2021).

MOFs heterometalik juga menunjukkan performa unggul. IUST-4, misalnya, mencapai kapasitas adsorpsi CO₂ sekitar 3,2–33,5 mmol CO₂/g pada suhu 25 °C, yang dikaitkan dengan interaksi sinergis antara ion Cd dan Zn (Kazemi et al., 2025). MOFs ultramikropori menunjukkan kapasitas sekitar 3,5 mmol/g pada kondisi ambien (Nandi et al., 2018), sementara Mg-MOF-74 mencapai 10,185 mmol/g pada tekanan 1 bar dan meningkat hingga 12,810 mmol/g pada 40 bar (Subedi et al., 2024). MOF heterometalik CPM-200s bahkan mencapai kapasitas hingga 9,3 mmol/g pada 273 K dan 1 bar, mendekati rekor tertinggi yang pernah dilaporkan (Zhai et al., 2016).

Perbedaan kapasitas sorpsi yang diamati antar berbagai sorben CO₂ menunjukkan bahwa kinerja penyerapan tidak hanya ditentukan oleh komposisi material, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh mekanisme dasar interaksi antara CO₂ dan sorben serta kondisi operasional. Oleh karena itu, pemahaman terhadap mekanisme sorpsi

menjadi penting untuk menjelaskan variasi kapasitas yang dilaporkan dalam literatur. Untuk memperjelas perbandingan tersebut, disajikan visualisasi komparatif pada Gambar 1.



Gambar 1. Perbandingan kapasitas sorpsi CO₂ berbagai sorben (mmol CO₂/g) berdasarkan literatur, disajikan secara semi-kuantitatif untuk menunjukkan kecenderungan umum antar material.

2. Mechanism-Related: CO₂ Absorption Reaction Mechanisms

Pemahaman terhadap mekanisme penyerapan karbon dioksida (CO₂) merupakan aspek krusial dalam mengevaluasi efektivitas berbagai sediaan penyerap. Mekanisme penyerapan menentukan tidak hanya kapasitas adsorpsi, tetapi juga laju reaksi, waktu jenuh, stabilitas material, serta implikasi keselamatan selama penggunaan. Secara umum, mekanisme penyerapan CO₂ dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori utama, yaitu penyerapan berbasis reaksi kimia (chemisorption) dan penyerapan berbasis interaksi fisik (physisorption), meskipun pada beberapa material kedua mekanisme tersebut dapat terjadi secara simultan. Perbedaan mendasar ini menjadi dasar variasi performa antar sediaan penyerap CO₂.

Mechanism of CO₂ Absorption by Soda Lime

Soda lime menyerap CO_2 melalui reaksi kimia yang melibatkan konversi kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) menjadi kalsium karbonat (CaCO_3). Proses penyerapan ini berlangsung cepat dan secara kinetik dapat dimodelkan sebagai reaksi pseudo-orde pertama (Perdanawati & Dewi, 2010; Author et al., 2023). Reaksi dimulai dengan pembentukan asam karbonat dari CO_2 dan uap air, yang selanjutnya bereaksi dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ untuk menghasilkan CaCO_3 dan air sebagai produk akhir.

Efisiensi mekanisme penyerapan soda lime sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor kunci. Luas permukaan spesifik memainkan peran penting, di mana peningkatan luas permukaan material secara langsung meningkatkan jumlah situs reaksi yang tersedia untuk interaksi dengan CO_2 (Author et al., 2023). Dari aspek kinetika, laju reaksi relatif konstan hingga tingkat karbonasi mencapai sekitar 90%, setelah itu laju penyerapan mulai menurun secara signifikan akibat terbentuknya lapisan produk reaksi yang menghambat difusi CO_2 ke situs aktif (Juvekar & Sharma, 1973).

Selain itu, proses peletisasi soda lime juga memengaruhi mekanisme penyerapan. Metode preparasi yang berbeda, seperti disc-type dan extruder-type pelletizers, menghasilkan struktur pori dan distribusi ukuran partikel yang berbeda, yang pada akhirnya berdampak pada efisiensi penyerapan CO_2 . Secara termodinamika, mekanisme penyerapan soda lime mengikuti isoterm Langmuir, yang mengindikasikan bahwa penyerapan terjadi pada situs aktif yang terbatas dan homogen (Perdanawati & Dewi, 2010). Namun, efisiensi penyerapan dapat menurun selama siklus penggunaan berulang akibat fenomena sintering dan abrasi material, yang menyebabkan berkurangnya luas permukaan efektif.

Litium hidroksida (LiOH) menyerap CO₂ melalui reaksi kimia langsung yang menghasilkan litium karbonat (Li₂CO₃). Proses ini bersifat spontan dan eksotermik, menjadikannya sangat efektif dalam lingkungan tertutup dengan kebutuhan penyerapan CO₂ yang tinggi (Ahmadi et al., 2023b). Mekanisme reaksi LiOH dengan CO₂ menunjukkan karakteristik kinetika orde kedua, yang mencerminkan ketergantungan laju reaksi terhadap konsentrasi reaktan (Zhuo et al., 2009).

Penyerapan optimal LiOH dilaporkan terjadi pada kondisi moderat, khususnya pada suhu sekitar 333 K dan tekanan 4,72 bar (Ahmadi et al., 2023b). Produk padat Li₂CO₃ terbentuk pada permukaan LiOH, namun tidak sepenuhnya menghalangi reaksi lanjutan, sehingga penyerapan dapat berlanjut hingga tingkat konversi karbonat yang tinggi (Zhuo et al., 2009). Kelembaban diketahui berperan positif dalam mekanisme ini, karena membantu memfasilitasi reaksi kimia, sementara proses penyerapan lebih dikendalikan oleh kinetika reaksi dibandingkan oleh difusi massa (Essaki et al., 2004).

Pada suhu yang lebih tinggi, konversi karbonat maksimum dapat mencapai sekitar 83%, yang menunjukkan bahwa peningkatan energi termal dapat mempercepat reaksi karbonasi tanpa sepenuhnya menghambat ketersediaan situs aktif (Jiang et al., 2021). Meskipun memiliki efisiensi tinggi, sifat eksotermik reaksi LiOH menuntut perhatian khusus terhadap aspek manajemen panas dan keselamatan operasional.

Mechanism of CO₂ Absorption by Calcium Hydroxide

Mekanisme penyerapan CO₂ oleh kalsium hidroksida (Ca(OH)₂) melibatkan serangkaian reaksi kompleks yang menghasilkan kalsium karbonat sebagai produk akhir. Proses ini diawali dengan pembentukan senyawa antara yang tidak stabil, yaitu kalsium bikarbonat [Ca(HCO₃)₂], dengan energi aktivasi sekitar 40 kJ/mol (Yu et al., 2013). Senyawa antara ini kemudian mengalami disosiasi lebih lanjut menjadi ion karbonat (CO₃²⁻), yang selanjutnya bereaksi dengan ion kalsium untuk membentuk CaCO₃ (W. Zhang et al., 2020).

Laju dan efisiensi penyerapan sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional, termasuk suhu, konsentrasi reaktan, dan kekuatan ion larutan. Wehrung et al. (2024b) menunjukkan bahwa peningkatan suhu dan keberadaan ion tertentu dapat mempercepat laju reaksi karbonasi secara signifikan. Selain itu, keberadaan pengotor garam tertentu dapat bertindak sebagai katalis, meningkatkan laju penyerapan CO₂ tanpa mengubah mekanisme dasar reaksi. Kompleksitas mekanisme ini menjadikan Ca(OH)₂ sangat sensitif terhadap kondisi lingkungan, namun juga menawarkan fleksibilitas dalam pengoptimalan proses.

Mechanism of CO₂ Absorption by Activated Carbon

Penyerapan CO₂ oleh karbon aktif terjadi melalui mekanisme ganda yang melibatkan adsorpsi fisik dan interaksi kimia permukaan. Struktur mikropori yang berkembang dengan baik memungkinkan CO₂ teradsorpsi secara fisik melalui gaya van der Waals, sementara gugus fungsi permukaan berperan dalam interaksi kimia yang lebih kuat. Chang et al. (2023) menunjukkan adanya dual-site bonding, di mana CO₂ ditangkap melalui adsorpsi fisik pada pori dan melalui interaksi kimia pada situs basa Lewis.

Kontribusi relatif antara struktur pori dan gugus fungsi permukaan telah dikuantifikasi secara rinci. Ma et al. (2020) melaporkan bahwa sekitar 63% kapasitas penyerapan CO₂ berasal dari struktur pori, sementara sekitar 37% sisanya dikontribusikan oleh gugus fungsi oksigen, khususnya karboksil dan hidroksil. Mikropori sempit dengan ukuran antara 0,33–0,82 nm memainkan peran dominan dalam meningkatkan kapasitas adsorpsi CO₂ (Wei et al., 2012b).

Secara termodinamika, penyerapan CO₂ pada karbon aktif bersifat eksotermik dan didominasi oleh mekanisme fisik, meskipun keberadaan gugus fungsional yang mengandung oksigen dan nitrogen dapat memperkuat interaksi CO₂ dengan permukaan adsorben (Guo et al., 2024). Kombinasi mekanisme ini memberikan karbon aktif fleksibilitas tinggi dalam aplikasi penyerapan CO₂, terutama pada kondisi tekanan dan suhu moderat.

Mechanism of CO₂ Absorption by Zeolites

Zeolit menyerap CO_2 melalui kombinasi mekanisme physisorption dan chemisorption, yang sangat dipengaruhi oleh karakteristik kerangka kristal dan jenis kation yang terdistribusi di dalam rongga zeolit. Mekanisme penyerapan melibatkan dua proses utama, yaitu adsorpsi fisik CO_2 melalui gaya van der Waals dan pembentukan ikatan kovalen antara oksigen dalam molekul CO_2 dengan atom aluminium pada kerangka zeolit (Ren et al., 2019).

Beberapa faktor struktural diketahui sangat menentukan efektivitas mekanisme ini, termasuk jenis dan distribusi kation, rasio Si/Al, medan listrik dalam rongga zeolit, serta momen kuadrupol molekul CO_2 (Bonenfant et al., 2008). Studi eksperimental dan komputasi menunjukkan bahwa kation divalen umumnya meningkatkan kekuatan interaksi CO_2 dengan kerangka zeolit dibandingkan kation monovalen.

Kekuatan bukti mekanistik tergolong tinggi, dengan berbagai penelitian mengonfirmasi keberadaan mekanisme ganda ini pada berbagai jenis zeolit, meskipun kapasitas penyerapan bervariasi secara signifikan bergantung pada struktur dan komposisi material (Okello et al., 2023; Elsayed et al., 2025). Variabilitas ini menegaskan pentingnya desain material yang tepat dalam mengoptimalkan performa zeolit sebagai penyerap CO_2 .

Mechanism of CO_2 Absorption by Metal–Organic Frameworks (MOFs)

Metal–organic frameworks (MOFs) menyerap CO_2 melalui mekanisme yang kompleks, melibatkan interaksi elektrostatik, pembentukan ikatan kimia, dan interaksi struktural spesifik dengan situs logam terbuka. Hou et al. (2013) menunjukkan bahwa situs logam terbuka memainkan peran kunci dalam mekanisme penyerapan, dengan terjadinya interaksi asam–basa Lewis yang kuat antara ion logam dan atom oksigen dalam molekul CO_2 .

Secara mekanistik, proses penyerapan dimulai dengan pembentukan kompleks teradsorpsi secara fisik, yang kemudian harus melewati penghalang energi tertentu untuk membentuk kompleks teradsorpsi secara kimia (H. Zhang et al., 2020). Kekuatan

interaksi ini sangat dipengaruhi oleh jenis ion logam, tingkat porositas kerangka, dan modifikasi gugus fungsional pada ligan organik.

Penelitian lanjutan menunjukkan bahwa pada beberapa MOFs, molekul CO₂ dapat berinteraksi secara langsung dengan ikatan logam–nitrogen, membentuk rantai amonium karbamat yang teratur (Drisdell et al., 2015). Energi ikatan yang terlibat dalam mekanisme ini bervariasi antara 30 hingga 96 kJ/mol, mencerminkan variasi besar dalam kekuatan interaksi CO₂–MOF tergantung pada struktur material yang digunakan. Kompleksitas mekanisme ini menjadikan MOFs sebagai salah satu kandidat paling menjanjikan untuk aplikasi penyerapan CO₂ berkapasitas tinggi, meskipun tantangan stabilitas dan regenerasi masih perlu diperhatikan.

Mekanisme penyerapan CO₂ yang berbeda, baik melalui reaksi kimia maupun adsorpsi fisik, tidak hanya memengaruhi kapasitas adsorpsi, tetapi juga menentukan laju reaksi dan stabilitas penyerapan selama waktu operasi. Dengan demikian, karakteristik mekanistik ini memiliki implikasi langsung terhadap waktu jenuh masing-masing adsorben dalam aplikasi nyata.

3. Waktu Jenuh

Waktu jenuh merupakan parameter kunci dalam mengevaluasi kinerja praktis sorben karbon dioksida (CO₂), karena menggambarkan durasi efektif material sebelum kehilangan kemampuan sorpsinya secara signifikan. Secara operasional, waktu jenuh didefinisikan sebagai waktu hingga konsentrasi CO₂ pada keluaran sistem mencapai ambang tertentu, yang menandakan terjadinya breakthrough. Parameter ini sangat relevan untuk aplikasi lingkungan tertutup, karena berkaitan langsung dengan frekuensi penggantian sorben, efisiensi sistem, dan aspek keselamatan pengguna.

Dalam sistem aliran kontinu, fenomena breakthrough tidak terjadi secara instan, melainkan melalui pembentukan zona perpindahan massa (mass transfer zone, MTZ) di dalam kolom atau kanister. MTZ merupakan daerah transisi di mana proses sorpsi berlangsung secara aktif, memisahkan bagian sorben yang telah jenuh dari bagian yang belum terpakai. Seiring waktu, zona ini bergerak sepanjang kolom hingga mencapai

outlet, yang kemudian ditandai sebagai titik breakthrough (Yang, 2003). Panjang dan kecepatan pergerakan MTZ sangat dipengaruhi oleh kinetika sorpsi, difusi intrapartikel, serta kondisi operasional seperti laju alir dan kelembaban.

Perilaku ini umumnya direpresentasikan dalam kurva breakthrough, yaitu hubungan antara konsentrasi CO₂ pada outlet terhadap waktu. Bentuk kurva ini memberikan informasi penting mengenai kapasitas dinamis sorben, yang berbeda dari kapasitas kesetimbangan (Crittenden et al., 2012). Kapasitas dinamis menggambarkan jumlah CO₂ yang dapat diserap sebelum terjadi breakthrough pada kondisi operasional tertentu. Sorben dengan kurva breakthrough yang lebih tajam menunjukkan pemanfaatan material yang lebih efisien, sedangkan kurva yang lebih landai mengindikasikan adanya keterbatasan perpindahan massa dalam sistem (Samanta et al., 2012).

Oleh karena itu, waktu jenuh tidak hanya ditentukan oleh kapasitas sorpsi total, tetapi juga oleh karakteristik perpindahan massa dan kinetika reaksi dalam sistem.

Waktu Jenuh pada Soda Lime

Soda lime merupakan salah satu penyerap CO₂ yang paling banyak dikaji dari aspek waktu jenuh, khususnya dalam sistem pernapasan tertutup dan semi-tertutup. Berbagai penelitian melaporkan bahwa waktu jenuh soda lime dapat bervariasi secara signifikan, mulai dari sekitar 20 hingga 200 menit, tergantung pada kondisi eksperimental dan jenis adsorben yang digunakan. Dalam studi komprehensif menggunakan sistem rebreather, Harvey et al. (2016) melaporkan waktu jenuh sebesar 138 menit untuk Spherasorb dan 202 menit untuk Sofnolime di bawah kondisi kerja yang disimulasikan. Perbedaan ini menegaskan bahwa formulasi material dan struktur adsorben memiliki peran penting dalam menentukan durasi penyerapan efektif.

Selain komposisi material, laju alir gas segar (fresh gas flow rate) merupakan faktor kritis yang memengaruhi waktu jenuh soda lime. Ohm et al. (1991b) menunjukkan bahwa variasi laju alir gas dapat menyebabkan perbedaan waktu jenuh yang sangat besar, dengan nilai yang berkisar antara 20 hingga 60 jam. Studi ini menekankan bahwa peningkatan laju alir gas segar mempercepat kejenuhan adsorben akibat peningkatan

beban CO₂ yang harus diserap. Faktor lain yang turut memengaruhi waktu jenuh meliputi tingkat produksi CO₂ metabolik, desain kanister, serta distribusi aliran gas di dalam sistem adsorpsi.

Higuchi et al. (2001) melaporkan bahwa beberapa adsorben alternatif, seperti Amsorb, memiliki kapasitas penyerapan sekitar setengah dari soda lime konvensional, yang secara langsung berdampak pada waktu jenuh yang lebih pendek. Temuan ini menggarisbawahi pentingnya pemilihan adsorben yang tepat, terutama dalam aplikasi dengan durasi penggunaan yang panjang dan margin keselamatan yang terbatas.

Waktu Jenuh pada Lithium Hydroxide

Lithium hydroxide (LiOH) menunjukkan potensi yang signifikan sebagai penyerap CO₂ dengan karakteristik breakthrough yang sangat bergantung pada kondisi operasional. Ahmadi et al. (2023c) melaporkan bahwa kondisi optimal untuk penangkapan CO₂ oleh LiOH terjadi pada suhu 333 K dan tekanan 4,72 bar, dengan kapasitas adsorpsi maksimum mencapai 559,39 mg/g. Meskipun studi ini lebih menekankan kapasitas adsorpsi, parameter tersebut berkorelasi erat dengan waktu jenuh, karena kapasitas yang lebih tinggi umumnya memungkinkan durasi penyerapan yang lebih panjang sebelum breakthrough terjadi.

Studi kinetika oleh Zhuo et al. (2009) menunjukkan bahwa laju reaksi LiOH dengan CO₂ cenderung menurun sedikit dengan peningkatan suhu, namun tetap stabil selama periode reaksi isothermal awal sekitar 1–5 menit. Stabilitas kinetika ini menunjukkan bahwa LiOH mampu mempertahankan performa penyerapan yang konsisten pada fase awal operasi. Selain itu, Quinn et al. (2012) melaporkan kapasitas breakthrough sebesar 5–6 mmol/g pada suhu tinggi (550 °C), terutama ketika uap air присутств, yang menegaskan peran penting kelembaban dalam memperpanjang kinerja adsorben.

Meskipun hasil-hasil tersebut menunjukkan potensi besar LiOH sebagai penyerap CO₂, literatur juga menekankan bahwa waktu jenuh yang dilaporkan sangat bervariasi akibat perbedaan metodologi pengujian. Oleh karena itu, diperlukan upaya standarisasi

dalam pengukuran waktu jenuh untuk memungkinkan perbandingan yang lebih akurat antar studi.

Waktu Jenuh pada Calcium Hydroxide

Kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) menunjukkan karakteristik waktu jenuh yang menjanjikan, namun sangat sensitif terhadap kondisi operasional dan preparasi adsorben. Costagliola et al. (2022) melaporkan bahwa Ca(OH)_2 memiliki kemampuan penyerapan CO_2 yang baik pada rentang suhu rendah hingga menengah (20–150 °C), dengan peningkatan performa yang signifikan ketika ukuran partikel diperkecil dan kelembaban hadir dalam sistem. Temuan ini mengindikasikan bahwa kondisi fisik adsorben dan lingkungan reaksi memainkan peran penting dalam menentukan waktu jenuh.

Modifikasi material juga terbukti mampu memperpanjang waktu jenuh Ca(OH)_2 . Moreno et al. (2020) menunjukkan bahwa penambahan nanosilika, khususnya nanosilika bersifat hidrofilik, dapat meningkatkan kapasitas penangkapan CO_2 secara signifikan. Selain itu, Criado dan Abanades (2022) melaporkan bahwa pencapaian konversi karbonasi yang tinggi memerlukan kelembaban relatif di atas 50%, dengan kondisi optimal pada kisaran 80–100%. Kelembaban tinggi membantu mempertahankan reaktivitas permukaan Ca(OH)_2 dan memperlambat terjadinya kejenuhan.

Variasi waktu jenuh juga dilaporkan oleh Han et al. (2011b), yang menunjukkan bahwa larutan Ca(OH)_2 jenuh dalam fase cair memiliki laju penyerapan dan rasio penangkapan CO_2 tertinggi dibandingkan sistem lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa fase reaksi dan medium penyerapan merupakan faktor penentu penting dalam karakteristik breakthrough Ca(OH)_2 .

Waktu Jenuh pada Activated Carbon

Waktu jenuh adsorpsi CO_2 pada karbon aktif menunjukkan variabilitas yang tinggi, dengan nilai waktu jenuh yang dilaporkan berkisar antara sekitar 10 hingga 54 menit, tergantung pada modifikasi adsorben dan kondisi pengujian. Hussin et al. (2024) melaporkan waktu jenuh tertinggi, yaitu 54 menit, menggunakan karbon aktif yang

dimodifikasi dengan kalium asetat pada suhu 25 °C dan konsentrasi CO₂ sebesar 15%. Modifikasi ini meningkatkan interaksi antara CO₂ dan permukaan adsorben, sehingga memperpanjang durasi penyerapan efektif.

Sebaliknya, Shafeeyan et al. (2015) melaporkan waktu jenuh yang jauh lebih singkat, yaitu sekitar 10,9 menit, sementara Wan Ab Karim Ghani et al. (2018) mencatat waktu jenuh sebesar 19,33 menit untuk karbon aktif yang dimodifikasi dengan cerium oksida. Perbedaan ini mencerminkan sensitivitas karbon aktif terhadap parameter operasional, termasuk suhu, laju alir gas umpan, konsentrasi CO₂, serta jenis dan tingkat modifikasi permukaan.

Secara umum, suhu yang lebih rendah cenderung memperpanjang waktu jenuh akibat meningkatnya afinitas adsorpsi fisik, sedangkan peningkatan laju alir gas mempercepat terjadinya breakthrough. Variabilitas ini menegaskan bahwa desain adsorben karbon aktif harus disesuaikan secara spesifik dengan kondisi aplikasi untuk mencapai kinerja optimal.

Waktu Jenuh pada Zeolites

Zeolit, khususnya zeolit 13X, menunjukkan kinerja waktu jenuh yang unggul dalam penyerapan CO₂. H. Mhdi (2016) melaporkan bahwa waktu jenuh zeolit 13X berkisar antara 70 hingga 175 menit, bergantung pada kondisi regenerasi. Pemanasan adsorben hingga 350 °C selama 12 jam terbukti meningkatkan waktu jenuh dari 70 menjadi 175 menit, yang menunjukkan bahwa regenerasi termal yang efektif dapat memulihkan dan bahkan meningkatkan kapasitas penyerapan.

Temuan ini diperkuat oleh Nedoma et al. (2022), yang menunjukkan bahwa zeolit 13X mampu menyerap lebih dari 10% beratnya pada suhu rendah, dengan selektivitas CO₂ yang tinggi. Selain itu, Konduru et al. (2007) melaporkan bahwa zeolit 13X dapat mempertahankan kapasitas yang berguna hingga sebelas siklus adsorpsi–desorpsi, yang menegaskan potensi jangka panjangnya dalam aplikasi penangkapan CO₂.

Faktor-faktor seperti selektivitas CO₂ yang tinggi, efisiensi pemisahan yang signifikan, dan kemampuan regenerasi berulang menjadikan zeolit sebagai kandidat yang sangat menarik untuk aplikasi yang memerlukan waktu jenuh panjang dan stabilitas operasional.

Waktu Jenuh pada Metal–Organic Frameworks (MOFs)

Metal–organic frameworks (MOFs) menunjukkan karakteristik waktu jenuh yang menjanjikan, meskipun sangat bergantung pada sifat material dan kondisi pengujian. Krishna dan Long (2011) menekankan bahwa waktu jenuh merupakan metrik penting dalam mengevaluasi kinerja MOFs untuk penangkapan CO₂ secara dinamis. Sabouni et al. (2013) melaporkan bahwa MOF CPM-5 memiliki kapasitas adsorpsi dinamis sebesar 11,9 wt% pada kondisi tertentu, yang mencerminkan potensi waktu jenuh yang kompetitif dibandingkan adsorben konvensional.

Studi mendalam pada MOF fleksibel ELM-11 menunjukkan bahwa perilaku breakthrough sangat dipengaruhi oleh suhu, tekanan, dan kecepatan aliran gas. Fujiki et al. (2022, 2023) melaporkan bahwa kinetika adsorpsi yang kompleks pada MOF fleksibel dapat menyebabkan kurva breakthrough yang tidak linier, sehingga memerlukan pendekatan analitis yang cermat. Lebih lanjut, Al-Janabi et al. (2018) menunjukkan bahwa variasi kecepatan aliran gas dapat berdampak eksponensial terhadap estimasi kurva breakthrough, menegaskan pentingnya kontrol dan standarisasi parameter pengujian.

Variabilitas ini menunjukkan bahwa meskipun MOFs memiliki potensi besar sebagai penyerap CO₂ berperforma tinggi, evaluasi waktu jenuh yang akurat memerlukan metodologi pengujian yang ketat dan terstandarisasi agar hasil antar studi dapat dibandingkan secara andal.

Variasi waktu jenuh yang dilaporkan pada berbagai sediaan penyerap CO₂ menunjukkan bahwa durasi kinerja tidak selalu sejalan dengan kapasitas adsorpsi maksimum. Hal ini menyoroti perlunya analisis komparatif yang mengaitkan kapasitas

adsorpsi dengan dinamika kejenuhan untuk memahami trade-off kinerja antar adsorben secara lebih menyeluruh.

4. Hubungan Kapasitas Adsorpsi dan Waktu Jenuh

Literatur menunjukkan bahwa hubungan antara kapasitas adsorpsi dan waktu jenuh pada penyerap karbon dioksida tidak bersifat linier, sehingga kapasitas adsorpsi yang tinggi tidak selalu menghasilkan waktu jenuh yang lebih panjang. Penyerap berbasis reaksi kimia, seperti soda lime dan lithium hidroksida, umumnya memiliki kapasitas adsorpsi tinggi akibat mekanisme chemisorption yang cepat dan ireversibel (Gall et al., 2015; Ahmadi et al., 2023a). Namun, kinetika reaksi yang cepat tersebut dapat menyebabkan kejenuhan lebih dini ketika beban CO₂ atau laju alir gas meningkat, sebagaimana ditunjukkan pada sistem soda lime dengan variasi fresh gas flow rate (Ohm et al., 1991b). Sebaliknya, penyerap berbasis adsorpsi fisik, termasuk karbon aktif dan zeolit, sering menunjukkan kapasitas adsorpsi yang lebih moderat tetapi mampu mempertahankan penyerapan yang lebih stabil dalam jangka waktu lebih lama karena mekanisme physisorption yang dikendalikan oleh difusi dan interaksi permukaan (Wei et al., 2012b; H. Mhdi, 2016). Temuan ini menegaskan bahwa evaluasi efektivitas penyerap CO₂ harus mempertimbangkan dinamika kinetika adsorpsi dan durasi kinerja, bukan hanya kapasitas maksimum, sehingga pendekatan berbasis performance trade-off menjadi krusial dalam pemilihan penyerap untuk aplikasi operasional.

Selain memengaruhi efektivitas operasional, hubungan antara kapasitas adsorpsi dan waktu jenuh juga memiliki implikasi penting terhadap aspek keselamatan, khususnya pada penyerap dengan kinetika reaksi cepat dan sifat eksotermik. Oleh karena itu, evaluasi kinerja adsorben perlu dilengkapi dengan analisis risiko keselamatan untuk memastikan keandalan penggunaan dalam lingkungan tertutup.

5. Aspek Keamanan Adsorben

Aspek keamanan merupakan parameter krusial dalam evaluasi efektivitas penyerap karbon dioksida (CO₂), khususnya untuk aplikasi pada lingkungan tertutup

seperti sistem anestesi, kapal selam, ruang angkasa, dan instalasi industri dengan ventilasi terbatas. Selain kemampuan menyerap CO₂, adsorben harus memenuhi standar keselamatan yang ketat, mencakup minimisasi pembentukan produk sampingan beracun, stabilitas termal dan kimia, serta risiko kesehatan bagi pengguna. Literatur menunjukkan bahwa setiap jenis adsorben memiliki profil keamanan yang berbeda, yang sangat dipengaruhi oleh mekanisme penyerapan, kondisi operasional, dan desain material.

Aspek Keamanan Soda Lime

Soda lime telah digunakan secara luas sebagai penyerap CO₂, khususnya dalam aplikasi anestesi, namun penggunaannya tidak terlepas dari isu keselamatan. Interaksi antara soda lime dan anestesi halogenat dapat menghasilkan produk sampingan beracun, seperti Compound A dan karbon monoksida, terutama pada kondisi dehidrasi adsorben dan suhu tinggi (Saraiva, 2004). Produk sampingan ini berpotensi menimbulkan efek nefrotoksik dan gangguan pernapasan, sehingga menimbulkan perhatian khusus dalam praktik klinis.

Namun, risiko tersebut dapat diminimalkan melalui pengelolaan operasional yang tepat. Saraiva (2004) menekankan bahwa hidrasi yang memadai pada soda lime serta penggunaan formulasi berbasis kalsium hidroksida dengan kandungan basa kuat yang lebih rendah dapat secara signifikan menurunkan pembentukan senyawa beracun. Dengan demikian, meskipun soda lime memiliki potensi risiko keselamatan, penerapan prosedur yang sesuai dan pemilihan formulasi modern memungkinkan penggunaannya tetap aman dalam praktik klinis dan lingkungan tertutup lainnya.

Aspek Keamanan Lithium Hydroxide

Lithium hydroxide (LiOH) dikenal sebagai penyerap CO₂ yang sangat efektif sekaligus relatif aman, dengan pembentukan produk sampingan beracun yang minimal. Dalam konteks medis, LiOH dilaporkan menghasilkan Compound A dalam jumlah yang jauh lebih rendah dibandingkan adsorben lain selama prosedur anestesi, sehingga mengurangi risiko toksisitas (Stabernack et al., 2000). Studi yang sama juga

menunjukkan bahwa LiOH menghasilkan konsentrasi karbon monoksida yang jauh lebih rendah, menegaskan profil keamanannya yang unggul.

Keamanan LiOH juga tercermin dari penggunaannya yang luas dalam lingkungan kritis, termasuk eksplorasi luar angkasa, kapal selam, dan operasi penyelaman, di mana margin keselamatan sangat terbatas (Zilberman, 2015). Kombinasi kapasitas penyerapan CO₂ yang tinggi, stabilitas reaksi, dan toksisitas rendah menjadikan LiOH sebagai salah satu adsorben paling andal untuk aplikasi lingkungan tertutup ekstrem, meskipun aspek pengelolaan panas akibat reaksi eksotermik tetap perlu diperhatikan.

Aspek Keamanan Calcium Hydroxide

Adsorben berbasis kalsium hidroksida memiliki pertimbangan keselamatan tersendiri, terutama terkait potensi iritasi kimia dan pembentukan produk sampingan tertentu. Pada formulasi awal, keberadaan basa kuat dalam konsentrasi tinggi dilaporkan meningkatkan risiko toksisitas dan iritasi pada saluran pernapasan (Feldman et al., 2021). Risiko ini menjadi perhatian utama dalam aplikasi medis dan sistem pernapasan tertutup.

Namun, perkembangan formulasi modern telah secara signifikan meningkatkan profil keselamatan adsorben berbasis Ca(OH)₂. Feldman et al. (2021) mencatat bahwa desain adsorben generasi terbaru telah mengurangi kandungan basa kuat dan memodifikasi struktur material untuk meminimalkan pembentukan senyawa berbahaya. Dengan penerapan prosedur keselamatan yang tepat, adsorben berbasis kalsium hidroksida dapat digunakan secara aman, sekaligus mempertahankan efektivitas penyerapan CO₂ yang memadai.

Aspek Keamanan Activated Carbon

Karbon aktif secara umum dianggap aman sebagai adsorben CO₂, namun penggunaannya memerlukan perhatian khusus terhadap risiko tertentu, terutama dalam ruang tertutup. Akell (2018a) menyoroti bahwa karbon aktif basah dapat menyerap oksigen dari udara, sehingga berpotensi menyebabkan penurunan kadar oksigen dan meningkatkan risiko asfiksia bagi pekerja yang memasuki ruang atau bejana tanpa

perlindungan yang memadai. Risiko ini bukan berasal dari toksisitas material itu sendiri, melainkan dari efek fisik terhadap komposisi atmosfer sekitar.

Oleh karena itu, penggunaan karbon aktif sebagai penyerap CO₂ harus disertai dengan prosedur keselamatan yang ketat, termasuk ventilasi yang memadai, pemantauan kadar oksigen, dan penggunaan alat pelindung diri. Dengan mitigasi yang tepat, karbon aktif tetap menjadi adsorben yang aman dan fleksibel untuk berbagai aplikasi penangkapan CO₂.

Aspek Keamanan Zeolite

Zeolit umumnya dianggap sebagai adsorben yang aman dan stabil, namun tetap memerlukan pengelolaan keselamatan yang serupa dengan karbon aktif, khususnya dalam lingkungan tertutup. Akell (2018b) mencatat bahwa risiko utama terkait penggunaan zeolit bukanlah toksisitas intrinsik, melainkan potensi penurunan kadar oksigen akibat adsorpsi gas tertentu dalam kondisi lembab. Kondisi ini dapat menciptakan bahaya asfiksia jika tidak disertai pemantauan atmosfer yang memadai.

Meskipun demikian, zeolit memiliki keunggulan dalam stabilitas kimia dan termal, serta tidak menghasilkan produk sampingan beracun selama proses penyerapan CO₂. Dengan penerapan prosedur keselamatan standar dan desain sistem yang tepat, zeolit dapat digunakan secara aman dalam aplikasi penangkapan CO₂ jangka panjang.

Aspek Keamanan Metal–Organic Frameworks (MOFs)

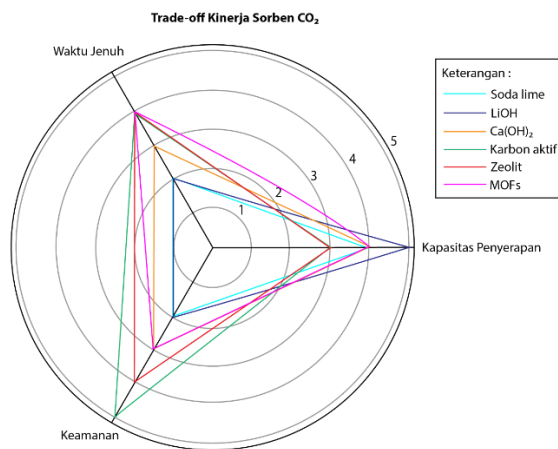
Metal–organic frameworks (MOFs) menawarkan potensi besar dalam penangkapan CO₂, namun menghadirkan tantangan keselamatan yang lebih kompleks dibandingkan adsorben konvensional. Salah satu isu utama adalah risiko yang terkait dengan proses sintesis MOFs, khususnya ketika skala produksi ditingkatkan dari laboratorium ke tingkat industri. Escobar-Hernandez et al. (2021) menyoroti bahwa pengetahuan mengenai aspek keselamatan sintesis MOFs masih terbatas, sehingga berpotensi menimbulkan bahaya jika tidak dikelola dengan baik.

Selain itu, stabilitas MOFs menjadi perhatian penting. Younas et al. (2020) melaporkan bahwa MOFs menunjukkan variasi yang luas dalam stabilitas kimia, termal, mekanik, dan hidrotermal, yang secara langsung memengaruhi keandalan dan keamanan selama penggunaan. Dari perspektif rekayasa, Hu et al. (2019) menekankan perlunya evaluasi teknik yang komprehensif untuk mengidentifikasi dan memitigasi risiko potensial sebelum MOFs diterapkan secara luas dalam sistem industri. Dengan demikian, meskipun MOFs memiliki kapasitas penyerapan CO₂ yang sangat menjanjikan, penerapan praktisnya harus disertai dengan penilaian keselamatan yang sistematis dan pengembangan protokol mitigasi risiko yang ketat (Fadia Haya et al., 2025; Wardah & Pratama, 2025).

Secara praktis, temuan ini menunjukkan bahwa pemilihan penyerap CO₂ untuk lingkungan tertutup harus mempertimbangkan tidak hanya kapasitas penyerapan, tetapi juga stabilitas operasional, potensi pembentukan produk sampingan berbahaya, dan risiko keselamatan manusia, sehingga sistem yang dipilih dapat dioperasikan secara andal dalam jangka panjang dengan margin keselamatan yang memadai.

Selain itu, dilakukan analisis hubungan secara konseptual antara kapasitas sorpsi dan waktu jenuh, serta pengaruh kondisi operasional terhadap kinerja sorben. Analisis ini menunjukkan bahwa kapasitas sorpsi yang tinggi tidak selalu menghasilkan waktu jenuh yang lebih panjang, karena dipengaruhi oleh faktor kinetika reaksi, difusi, dan perpindahan massa dalam sistem. Pendekatan ini memberikan interpretasi yang lebih mendalam terhadap variasi data yang dilaporkan dalam literatur.

Untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai hubungan antar parameter kinerja, disajikan diagram trade-off pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram trade-off kinerja sorben CO₂ berdasarkan kapasitas sorpsi, waktu jenuh, dan aspek keamanan, disajikan secara semi-kuantitatif untuk menunjukkan perbandingan relatif antar material.

Gambar 2 menunjukkan adanya trade-off antara kapasitas sorpsi, waktu jenuh, dan keamanan, di mana sorben berbasis reaksi kimia cenderung unggul dalam kapasitas tetapi memiliki keterbatasan pada aspek durasi dan keamanan dibandingkan adsorben fisik.

Temuan dalam tinjauan ini memiliki implikasi praktis dalam pemilihan dan pengembangan sorben CO₂ untuk berbagai aplikasi, khususnya pada lingkungan tertutup seperti sistem anestesi, penyelaman, dan ruang terbatas. Pemahaman mengenai trade-off antara kapasitas sorpsi, waktu jenuh, dan aspek keamanan dapat membantu praktisi dalam menentukan jenis sorben yang paling sesuai dengan kebutuhan operasional dan batasan sistem.

Selain itu, hasil kajian ini juga relevan dalam konteks pendidikan kimia, terutama dalam pembelajaran topik adsorpsi, kinetika reaksi, dan perpindahan massa. Integrasi contoh nyata dari sistem sorben CO₂ dapat membantu dosen dalam mengaitkan konsep teoritis dengan aplikasi industri, sehingga meningkatkan pemahaman konseptual mahasiswa. Dalam pengembangan kurikulum, pendekatan kontekstual berbasis studi kasus seperti ini berpotensi memperkuat keterkaitan antara teori dan praktik, meskipun

tidak secara langsung berfokus pada pendekatan pembelajaran tertentu seperti CLIL atau bilingual.

Kesimpulan

Tinjauan naratif ini menunjukkan bahwa efektivitas sorben karbon dioksida (CO₂) ditentukan oleh keseimbangan antara kapasitas sorpsi, waktu jenuh, dan aspek keamanan. Sorben berbasis reaksi kimia, seperti soda lime, litium hidroksida, dan kalsium hidroksida, umumnya memiliki kapasitas sorpsi tinggi akibat mekanisme chemisorption yang cepat, tetapi sering disertai waktu jenuh yang lebih singkat serta potensi risiko keselamatan. Sebaliknya, sorben berbasis adsorpsi fisik, termasuk karbon aktif, zeolit, dan metal-organic frameworks (MOFs), cenderung menunjukkan kapasitas yang lebih moderat namun memberikan kinerja yang lebih stabil dan berkelanjutan. Analisis komparatif menegaskan bahwa kapasitas sorpsi yang telah dinormalisasi ke satuan seragam (mmol CO₂/g) dan dievaluasi pada kondisi operasional yang berbeda tidak selalu berbanding lurus dengan durasi kinerja, karena dipengaruhi oleh faktor kinetika, perpindahan massa, serta kondisi sistem seperti suhu, tekanan, dan laju alir gas. Oleh karena itu, pemilihan sorben CO₂ yang optimal memerlukan pendekatan multidimensional yang mempertimbangkan kondisi operasional, durasi penggunaan, dan margin keselamatan yang dapat diterima..

Daftar Referensi

Abreu, N. J., Jaramillo, A. F., Becker-Garcés, D. F. A., Antileo, C., Martínez-Retureta, R., Martínez-Ruano, J. A., Ñanculeo, J., Pérez, M. M., & Cea, M. (2025). Modification of natural and synthetic zeolites for CO₂ capture: Unrevealing the role of the compensation cations. *Materials*, 18(10), 2403. <https://doi.org/10.3390/ma18102403>

Ahmadi, M., Ghaemi, A., & Qasemnazhand, M. (2023). Lithium hydroxide as a high-capacity adsorbent for CO₂ capture: Experimental, modeling, and DFT simulation. *Scientific Reports*, 13, 7150. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34360-z>

Ahmed, A. S., Alsultan, M., Sabah, A. A., & Swiegers, G. F. (2023). Carbon dioxide adsorption by a high-surface-area activated charcoal. *Journal of Composites Science*, 7(5), 179. <https://doi.org/10.3390/jcs7050179>

Akell, R. B. (2018). Safety aspects of activated carbon technology. In *Activated carbon adsorption for wastewater treatment* (pp. 223–241). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351069465-12>

Al-Janabi, N., Vakili, R., Kalumpasut, P., Gorgojo, P., Siperstein, F. R., Fan, X., & McCloskey, P. (2018). Velocity variation effect in fixed-bed columns: A case study of CO₂ capture using porous solid adsorbents. *AIChE Journal*, 64(6), 2189–2197. <https://doi.org/10.1002/aic.16135>

Cho, J.-S., Kim, Y.-J., Kwon, S.-J., Seo, J.-H., Kim, Y.-S., & Cho, K.-H. (2023). Preparation and characteristics of soda lime for carbon dioxide absorption. *Resources Recycling*, 32(2), 52–58. <https://doi.org/10.7844/KIRR.2023.32.2.52>

Bonenfant, D., Kharoune, M., Niquette, P., Mimeault, M., & Hausler, R. (2008). Advances in principal factors influencing carbon dioxide adsorption on zeolites. *Science and Technology of Advanced Materials*, 9(1), 013007. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/9/1/013007>

Chang, L. L., Hu, C., Huang, C. C., Lin, C. Y., Chung, P. W., & Tung, K. L. (2023). Potassium citrate-activated porous carbon nanostructures for CO₂ adsorption and electroreduction. *ACS Applied Nano Materials*, 6(10), 8839–8848. <https://doi.org/10.1021/acsanm.3c01231>

Costagliola, M. A., Prati, M. V., & Perretta, G. (2022). Post-combustion CO₂ capture with calcium and lithium hydroxide. *Scientific Reports*, 12(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14235-5>

Criado, Y. A., & Abanades, J. C. (2022). Carbonation rates of dry Ca(OH)₂ mortars for CO₂ capture applications at ambient temperatures. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(40), 14804–14812. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c01675>

Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). *MWH's water treatment: Principles and design* (3rd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118131473>

Doolette, D. J., & Mitchell, S. J. (2011). Hyperbaric conditions. *Comprehensive Physiology*, 1(1), 163–201. <https://doi.org/10.1002/j.2040-4603.2011.tb00321.x>

Drisdell, W. S., Poloni, R., McDonald, T. M., Pascal, T. A., Wan, L. F., Pemmaraju, C. D., Vlaisavljevich, B., Odoh, S. O., Neaton, J. B., Long, J. R., Prendergast, D., & Kortright, J. B. (2015). Probing the mechanism of CO₂ capture in diamine-appended metal–organic frameworks using measured and simulated X-ray spectroscopy. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17(33), 21448–21457. <https://doi.org/10.1039/c5cp02951a>

Dziak, R. P., Baker, E. T., Shaw, A. M., Bohnenstiehl, D. R., Chadwick, W. W., Haxel, J. H., Matsumoto, H., & Walker, S. L. (2012). Flux measurements of explosive degassing using a yearlong hydroacoustic record at an erupting submarine volcano. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(11), Q0AF07. <https://doi.org/10.1029/2012gc004211>

Gall, E. T., Chang, V. W.-C., & Nazaroff, W. W. (2015). Controlling indoor CO₂ with a solid sorbent: Kinetics and capacity. *Environmental Science & Technology*, 49(7), 4394–4402. <https://doi.org/10.1021/es505120j>

Elsayed, M. A., Zhou, S., Zhao, X., Manggada, G. W., Chen, Z., Wang, F., & Tang, Z. (2025). Insights into the adsorption of carbon dioxide in zeolites ITQ-29 and 5A based on kinetic measurements and molecular simulations. *Nanomaterials*, 15(14), 1077. <https://doi.org/10.3390/nano15141077>

Escobar-Hernandez, H. U., Shen, R., Papadaki, M. I., Powell, J. A., Zhou, H. C., & Wang, Q. (2021). Hazard evaluation of metal–organic framework synthesis and scale-up: A laboratory safety perspective. *ACS Chemical Health & Safety*, 28(5), 358–368. <https://doi.org/10.1021/acs.chas.1c00044>

Essaki, K., Nakagawa, K., Kato, M., & Uemoto, H. (2004). CO₂ absorption by lithium silicate at room temperature. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 37(6), 772–777. <https://doi.org/10.1252/jcej.37.772>

Fadia Haya, A., Arifin, Z., & Pranata, J. T. (2025). Pengaruh waktu dan suhu pada sintesis aluminium format metal–organic framework menggunakan metode solvotermal. *Journal of Research and Education Chemistry*, 7(2), 284–295. [https://doi.org/10.25299/jrec.2025.vol7\(2\).21550](https://doi.org/10.25299/jrec.2025.vol7(2).21550)

Feldman, J. M., Hendrickx, J., & Kennedy, R. R. (2021). Carbon dioxide absorption during inhalation anesthesia: A modern practice. *Anesthesia & Analgesia*, 132(4), 993–1002. <https://doi.org/10.1213/ane.0000000000005137>

Freiberger, J. J., Derrick, B. J., Natoli, M. J., Akushevich, I., Schinazi, E. A., Parker, C., Stolp, B. W., Bennett, P. B., Vann, R. D., Dunworth, S. A. S., & Moon, R. E. (2016). Assessment of the interaction of hyperbaric N₂, CO₂, and O₂ on psychomotor performance in divers. *Journal of Applied Physiology*, 121(4), 953–964. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00534.2016>

Freys, G. (1999). Soda lime: A review. *Annales Françaises d'Anesthésie et de Réanimation*, 18(3), 299–302. [https://doi.org/10.1016/s0750-7658\(99\)80054-9](https://doi.org/10.1016/s0750-7658(99)80054-9)

Fu, D., Park, Y., & Davis, M. E. (2022). Zinc-containing small-pore zeolites for capture of low-concentration carbon dioxide. *Angewandte Chemie International Edition*, 61(5), e202112916. <https://doi.org/10.1002/anie.202112916>

Fujiki, J., Kajiro, H., Takakura, Y., Yajima, T., & Kawajiri, Y. (2023). Breakthrough analysis for parameter estimation of CO₂ adsorption on pelletized flexible metal–organic frameworks. *Chemical Engineering Journal*, 460, 141781. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141781>

Fujiki, J., Takakura, Y., Sugimoto, S., Kajiro, H., Yajima, T., & Kawajiri, Y. (2022). Breakthrough analysis for CO₂ adsorption kinetics on flexible metal–organic frameworks. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4277079>

Ghughe, N. S., & Mandal, D. (2023). Room-temperature absorption of carbon dioxide on an improved soda lime-based absorber. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(19), 7592–7598. <https://doi.org/10.1021/ACS.IECR.3C00121>

Guo, T., Zhang, Y., Chen, J., Liu, W., Geng, Y., Bedane, A. H., & Du, Y. (2024). Investigation of CO₂ adsorption on nitrogen-doped activated carbon based on porous structure and surface acid-base sites. *Case Studies in Thermal Engineering*, 53, 103925. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2023.103925>

Han, S. J., Yoo, M., Kim, D. W., & Wee, J. H. (2011). Carbon dioxide capture using calcium hydroxide aqueous solution as the absorbent. *Energy & Fuels*, 25(8), 3825–3834. <https://doi.org/10.1021/EF200415P>

Harvey, D., Pollock, N., Gant, N., Hart, J., Mesley, P., & Mitchell, S. (2016). The duration of two carbon dioxide absorbents in a closed-circuit rebreather diving system. *Diving and Hyperbaric Medicine*.

Higuchi, H., Adachi, Y., Arimura, S., Kanno, M., & Satoh, T. (2001). The carbon dioxide absorption capacity of Amsorb® is half that of soda lime. *Anesthesia & Analgesia*, 93(1), 221–225. <https://doi.org/10.1097/00000539-200107000-00044>

Hou, X. J., He, P., Li, H., & Wang, X. (2013). Understanding the adsorption mechanism of C₂H₂, CO₂, and CH₄ in isostructural metal–organic frameworks with coordinatively unsaturated metal sites. *Journal of Physical Chemistry C*, 117(6), 2824–2834. <https://doi.org/10.1021/JP310517R>

Hu, Z., Wang, Y., Shah, B. B., & Zhao, D. (2019). CO₂ capture in metal–organic framework adsorbents: An engineering perspective. *Advanced Sustainable Systems*, 3(1), 1800080. <https://doi.org/10.1002/ADSU.201800080>

Hussin, F., Kiat, L. B., Yusoff, R., & Aroua, M. K. (2024). A breakthrough adsorption study of modified activated carbon using environmentally-friendly activating agents. *Environmental Engineering Research*, 29(1). <https://doi.org/10.4491/EER.2023.005>

Ibrahim, H. G., & Al-Meshragi, M. A. (2019). Experimental study of adsorption on activated carbon for CO₂ capture. In CO₂ Sequestration. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.85834>

Jia, Y. X., Liu, Y. S., Liu, W. H., & Li, Z. Y. (2014). Study on purification characteristic of CO₂ and CO within closed environment of coal mine refuge chamber. Separation and Purification Technology, 130, 65–73. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2014.04.014>

Jiang, Y., Liu, C., Zhou, X., Li, P., Song, X., & Yu, J. (2021). Toward CO₂ utilization: Gas–liquid reactive crystallization of lithium carbonate in concentrated KOH solution. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, 43(24), 3332–3344. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1587068>

Joshi, N., & Sivachandiran, L. (2024). CO₂ adsorption and storage over FAU-zeolites for environmental remediation: Understanding the role of oxygen vacancy and promotor loading. Journal of Environmental Chemical Engineering, 12(5), 112828. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2024.112828>

Juvekar, V. A., & Sharma, M. M. (1973). Absorption of CO₂ in a suspension of lime. Chemical Engineering Science, 28(3), 825–837. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(77\)80017-1](https://doi.org/10.1016/0009-2509(77)80017-1)

Kazemi, A., Karbalaee Hosseini, A., Ashourzadeh Pordsari, M., Tamtaji, M., Keshavarz, S., Manteghi, F., Tadjarodi, A., Ghaemi, A., Rohani, S., & Goddard, W. A. (2025). Enhancing CO₂ selectivity in MOFs through a dual-ligand strategy: Experimental and theoretical insights. Journal of CO₂ Utilization, 93, 103035. <https://doi.org/10.1016/J.JCOU.2025.103035>

Konduru, N., Lindner, P., & Assaf-Anid, N. M. (2007). Curbing the greenhouse effect by carbon dioxide adsorption with zeolite 13X. AIChE Journal, 53(12), 3137–3143. <https://doi.org/10.1002/AIC.11318>

Krishna, R., & Long, J. R. (2011). Screening metal–organic frameworks by analysis of transient breakthrough of gas mixtures in a fixed bed adsorber. *Journal of Physical Chemistry C*, 115(26), 12941–12950. <https://doi.org/10.1021/JP202203C>

Ma, X., Yang, Y., Wu, Q., Liu, B., Li, D., Chen, R., Wang, C., Li, H., Zeng, Z., & Li, L. (2020). Underlying mechanism of CO₂ uptake onto biomass-based porous carbons: Do adsorbents capture CO₂ chiefly through narrow micropores? *Fuel*, 282, 118727. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2020.118727>

Millward, A. R., & Yaghi, O. M. (2005). Metal–organic frameworks with exceptionally high capacity for storage of carbon dioxide at room temperature. *Journal of the American Chemical Society*, 127(51), 17998–17999. <https://doi.org/10.1021/JA0570032>

Moreno, H., Pontiga, F., & Valverde, J. M. (2020). Carbon dioxide capture in fluidized beds of nanosilica/Ca(OH)₂. In *Proceedings of [book/conference source]*, 415–421. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5444-5_52

Murray, J. M., Renfrew, C. W., Bedi, A., McCrystal, C. B., Jones, D. S., & Fee, J. P. H. (1999). Amsorb: A new carbon dioxide absorbent for use in anesthetic breathing systems. *Anesthesiology*, 91(5), 1342–1348. <https://doi.org/10.1097/00000542-199911000-00026>

Nandi, S., Dev Singh, H., Chakraborty, D., Maity, R., & Vaidhyanathan, R. (2021). Deciphering the weak CO₂···framework interactions in microporous MOFs functionalized with strong adsorption sites—A ubiquitous observation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(21), 24976–24983. <https://doi.org/10.1021/ACSAMI.1C05845>

Nandi, S., Maity, R., Chakraborty, D., Ballav, H., & Vaidhyanathan, R. (2018). Preferential adsorption of CO₂ in an ultramicroporous MOF with cavities lined by basic groups and open-metal sites. *Inorganic Chemistry*, 57(9), 5267–5272. <https://doi.org/10.1021/ACS.INORGCHEM.8B00304>

Nedoma, M., Staf, M., & Hrdlička, J. (2022). Experimental and simulation study of CO₂ breakthrough curves in a fixed-bed adsorption process. *Acta Polytechnica*, 62(3), 370–385. <https://doi.org/10.14311/AP.2022.62.0370>

Ohm, M., Gravenstein, N., & Good, M. L. (1991). Duration of carbon dioxide absorption by soda lime at low rates of fresh gas flow. *Journal of Clinical Anesthesia*, 3(2), 104–107. [https://doi.org/10.1016/0952-8180\(91\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0952-8180(91)90005-8)

Okello, F. O., Tizhe Fidelis, T., Agumba, J., Manda, T., Ochilo, L., Mahmood, A., & Pembere, A. (2023). Towards estimation and mechanism of CO₂ adsorption on zeolite adsorbents using molecular simulations and machine learning. *Materials Today Communications*, 36, 106594. <https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2023.106594>

Perdanawati, U., & Dewi, K. (2010). Pemakaian reaktor adsorpsi menggunakan adsorben limbah las karbid untuk mengolah CO₂. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 16(2), 210–221. <https://doi.org/10.5614/TL.2010.16.2.10>

Quinn, R., Kitzhoffer, R. J., Hufton, J. R., & Golden, T. C. (2012). A high-temperature lithium orthosilicate-based solid absorbent for post-combustion CO₂ capture. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(27), 9320–9327. <https://doi.org/10.1021/IE300157M>

Ren, S., Sullivan, K., Zhang, J., Stappers, L., Fransaer, J., Kanzaki, Y., Tokuda, K., Bruckenstein, S., Kusumastuti, R., Putra, G. E., & Tjahjono, H. (2019). Study on the mechanism of CO₂ adsorption process on zeolite 5A as a molecular sieve in RDE system: An infrared investigation. *Journal of Physics: Conference Series*, 1198(3), 032009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1198/3/032009>

Sabouni, R., Kazemian, H., & Rohani, S. (2013). Mathematical modeling and experimental breakthrough curves of carbon dioxide adsorption on metal organic framework CPM-5. *Environmental Science & Technology*, 47(16), 9372–9380. <https://doi.org/10.1021/ES401276R>

Samanta, A., Zhao, A., Shimizu, G. K. H., Sarkar, P., & Gupta, R. (2012). Post-combustion CO₂ capture using solid sorbents: A review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(4), 1438–1463. <https://doi.org/10.1021/ie300686g>

Saraiva, R. Â. (2004). Preventing toxic substances production during carbon dioxide absorption by soda lime with halogenated anesthetics. *Revista Brasileira de Anestesiologia*, 54(3), 431–437. <https://doi.org/10.1590/S0034-70942004000300015>

Shafeeyan, M. S., Daud, W. M. A. W., Shamiri, A., & Aghamohammadi, N. (2015). Modeling of carbon dioxide adsorption onto ammonia-modified activated carbon: Kinetic analysis and breakthrough behavior. *Energy & Fuels*, 29(10), 6565–6577. <https://doi.org/10.1021/ACS.ENERGYFUELS.5B00653>

Shahkarami, S., Azargohar, R., Dalai, A. K., & Soltan, J. (2015). Breakthrough CO₂ adsorption in bio-based activated carbons. *Journal of Environmental Sciences*, 34, 68–76. <https://doi.org/10.1016/J.JES.2015.03.008>

Srenscek-Nazzal, J., Narkiewicz, U., Morawski, A. W., Wróbel, R., Gęsiękiewicz-Puchalska, A., & Michalkiewicz, B. (2016). Modification of commercial activated carbons for CO₂ adsorption. *Acta Physica Polonica A*, 129(3), 394–401. <https://doi.org/10.12693/APHYSPOLA.129.394>

Stabernack, C. R., Brown, R., Laster, M. J., Dudziak, R., & Eger, E. I. (2000). Absorbents differ enormously in their capacity to produce compound A and carbon monoxide. *Anesthesia & Analgesia*, 90(6), 1428–1435. <https://doi.org/10.1097/00000539-200006000-00033>

Subedi, A., Adhikari, B., Bhusal, A., & Adhikari, K. (2024). Molecular insights into CO₂ sequestration in MOF-74. *Journal of Institute of Science and Technology*, 29(2), 65–73. <https://doi.org/10.3126/JIST.V29I2.66020>

Tipton, M., Newton, P., & Reilly, T. (2006). Metabolic production of carbon dioxide in simulated sea states: Relevance for hyperbaric escape systems. *Undersea & Hyperbaric Medicine*, 33(4), 291–297. <https://europepmc.org/article/med/17004416>

Vadász, I., Hubmayr, R. D., Nin, N., Sporn, P. H. S., & Sznajder, J. I. (2012). Hypercapnia: A nonpermissive environment for the lung. *Respiratory Cell and Molecular Biology*, 46(4), 417–421. <https://doi.org/10.1165/RCMB.2011-0395PS>

Verma, V., Sharma, A., & Anand, N. (2021). Effect of submarine microclimate on respiratory physiology of submariners. *Journal of Marine Medical Society*, 23(1), 52–54. https://doi.org/10.4103/JMMS.JMMS_13_19

Wan Ab Karim Ghani, W. A., Madzaki, H., Yaw, T. C. S., Rashid, U., & Muda, N. (2018). Carbon dioxide adsorption on activated carbon hydrothermally treated and impregnated with metal oxides. *Jurnal Kejuruteraan*, 30(1), 31–38. [https://doi.org/10.17576/JKUKM-2018-30\(1\)-05](https://doi.org/10.17576/JKUKM-2018-30(1)-05)

Wang, Y., Zhang, C., & Zhang, J. (2012). Research on zero release closed cycle diesel engine system. *Advanced Materials Research*, 354–355, 429–432. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.354-355.429>

Wardah, S. A., & Pratama, I. (2025). Pengaruh demineralisasi batubara dengan penambahan adsorben sekam padi terhadap potensi pembentukan slagging dan fouling. *Journal of Research and Education Chemistry*, 7(2), 421–441. [https://doi.org/10.25299/jrec.2025.vol7\(2\).24360](https://doi.org/10.25299/jrec.2025.vol7(2).24360)

Wehrung, Q., Pastero, L., Bernasconi, D., Cotellucci, A., Bruno, M., Cavagna, S., Destefanis, E., Caviglia, C., & Pavese, A. (2024). Impact of operational parameters on the CO₂ absorption rate in Ca(OH)₂ aqueous carbonation—Implications for process efficiency. *Energy & Fuels*, 38(17), 16678–16691. <https://doi.org/10.1021/ACS.ENERGYFUELS.4C02455>

Wei, H., Deng, S., Hu, B., Chen, Z., Wang, B., Huang, J., & Yu, G. (2012). Granular bamboo-derived activated carbon for high CO₂ adsorption: The dominant role of narrow micropores. *ChemSusChem*, 5(12), 2354–2360. <https://doi.org/10.1002/CSSC.201200570>

Xia, Y., Mokaya, R., Walker, G. S., & Zhu, Y. (2011). Superior CO₂ adsorption capacity on N-doped, high-surface-area, microporous carbons templated from zeolite. *Advanced Energy Materials*, 1(4), 678–683. <https://doi.org/10.1002/AENM.201100061>

Yang, R. T. (2003). *Adsorbents: Fundamentals and applications*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/047144409X>

Younas, M., Rezakazemi, M., Daud, M., Wazir, M. B., Ahmad, S., Ullah, N., Inamuddin, & Ramakrishna, S. (2020). Recent progress and remaining challenges in post-combustion CO₂ capture using metal–organic frameworks (MOFs). *Progress in Energy and Combustion Science*, 80, 100849. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2020.100849>

Yu, J., Zeng, X., Zhang, G., Zhang, J., Wang, Y., & Xu, G. (2013). Kinetics and mechanism of direct reaction between CO₂ and Ca(OH)₂ in micro fluidized bed. *Environmental Science & Technology*, 47(13), 7514–7520. <https://doi.org/10.1021/ES4001196>

Zhai, Q. G., Bu, X., Mao, C., Zhao, X., & Feng, P. (2016). Systematic and dramatic tuning on gas sorption performance in heterometallic metal–organic frameworks. *Journal of the American Chemical Society*, 138(8), 2524–2527. <https://doi.org/10.1021/JACS.5B13491>

Zhang, W., Li, J., Wang, Q., & Qiu, X. (2020). Desorption and mineralization of CO₂ in amine-based solution by Ca(OH)₂. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 97, 103056. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2020.103056>

Zhuo, Z., Pingfeng, F., & Boyuan, Z. (2009). Studies on reaction kinetics of LiOH for absorbing CO₂. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2009.4918790>

Zilberman, P. (2015). The CO₂ absorber based on LiOH. *Acta Marisiensis – Seria Medica*, 61(1), 4–6. <https://doi.org/10.1515/AMMA-2015-0023>

