

# A Review: Utilization of Zeolite and Metal-Organic Frameworks (MOFs) Membrane in the Separation of Carbon Dioxide

Eka Miranda Silaban<sup>1</sup>, Ni Wayan Septia Sametri<sup>1</sup>, Riandy Putra<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Palangka Raya, Kampus UPR Tanjung Nyaho, Palangka Raya 73111, Indonesia

## Kata kunci

Teknologi Membran, Zeolit, Metal-Organic Frameworks (MOFs), Campuran Gas, Pemisahan gas CO<sub>2</sub>.

## Abstrak

Teknologi membran yang menggunakan zeolit dan MOFs telah terbukti memiliki selektivitas yang tinggi dalam pemisahan CO<sub>2</sub> dari campuran gas. Dalam review artikel ini, kami melakukan tinjauan literatur tentang penggunaan kedua teknologi tersebut dalam pemisahan gas CO<sub>2</sub>. Kami menyoroti penelitian terbaru yang menunjukkan kemampuan zeolit dalam meningkatkan selektivitas membran terhadap CO<sub>2</sub> dan integrasi MOFs dalam membran untuk meningkatkan kinerja pemisahan gas. Metodologi penelitian pada tinjauan literatur ini menggunakan data sekunder dari penelitian-penelitian terdahulu. Hasil tinjauan ini menunjukkan bahwa kedua teknologi tersebut memiliki potensi besar dalam pemisahan gas CO<sub>2</sub> dan menjadi solusi yang efektif untuk tantangan lingkungan yang terkait dengan gas CO<sub>2</sub>. Tinjauan ini memberikan wawasan yang komprehensif tentang potensi zeolit dan MOFs dalam pemisahan gas CO<sub>2</sub>, serta pentingnya pengembangan lebih lanjut dalam bidang ini untuk mengatasi perubahan iklim.

## Keywords

Membrane Technology, Zeolite, Metal-Organic Frameworks (MOFs), Gas Mixtures, CO<sub>2</sub> Gas Separation.

## Abstract

The membrane technology utilizing zeolite and MOFs has proven to possess high selectivity in separating CO<sub>2</sub> from gas mixtures. In this review article, we conducted a literature review on the utilization of both technologies in CO<sub>2</sub> gas separation. We highlighted recent research indicating zeolite's capacity to enhance membrane selectivity towards CO<sub>2</sub> and the integration of MOFs into membranes to improve gas separation performance. The research methodology for this literature review involved using secondary data from previous studies. The findings of this review indicate that both technologies hold significant potential in CO<sub>2</sub> gas separation and offer effective solutions to environmental challenges associated with CO<sub>2</sub>. This review provides comprehensive insights into the potential of zeolite and MOFs in CO<sub>2</sub> gas separation, as well as the importance of further development in this field to address climate change.

## Sejarah Artikel

Diterima : 22/04/2024  
Disetujui : 20/09/2024  
Dipublikasi : 30/09/2024

Email korespondensi: riandy@mipa.upr.ac.id

© 2022 Bohr: Jurnal Cendekia Kimia. This work is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

## PENDAHULUAN

Teknologi membran menggunakan zeolit dan MOFs telah muncul sebagai solusi menjanjikan untuk mengatasi masalah lingkungan yang disebabkan oleh gas CO<sub>2</sub> [1]. Zeolit tipe Chabazite (CHA) dan SAPO-34 telah terbukti memiliki selektivitas tinggi dalam pemisahan CO<sub>2</sub>, terutama membran zeolit jenis CHA yang menunjukkan efisiensi pemisahan CO<sub>2</sub> yang baik pada tekanan tinggi [2]. Selain itu, pemanfaatan membran MOFs telah menunjukkan selektivitas yang sangat baik dalam memisahkan campuran gas CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>.

### 1. Zeolit

Zeolit merupakan material aluminosilikat yang dikenal karena memiliki pori-pori yang terdefinisi dengan baik dan kemampuan filtrasi molekuler yang tinggi [3]. Sementara itu, MOFs adalah material dengan luas permukaan internal yang besar dan pori-pori yang dapat disesuaikan [4]. Untuk meningkatkan proses pemisahan CO<sub>2</sub>, para peneliti telah menyelidiki potensi membran zeolit. Zeolit 4A telah menunjukkan adsorpsi karbondioksida yang efektif dengan mencapai saturasi pada suhu tertentu [5]. Penelitian telah menunjukkan bahwa Mixed Matrix Membranes (MMMs) berbahan dasar zeolit termasuk dengan membran polisulfon menunjukkan peningkatan selektivitas terhadap CO<sub>2</sub> dibandingkan CH<sub>4</sub> [3]. Penggunaan zeolit kedalam membran ini telah meningkatkan selektivitas karbondioksida [3]. Selain itu, penggunaan membran zeolit SSZ-13 dengan kandungan silika tinggi telah menunjukkan kemampuan untuk pemisahan gas, dengan penurunan permeansi gas tunggal untuk CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> seiring dengan peningkatan rasio SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [6].

Penelitian dengan menggunakan membran zeolit silika tinggi untuk

pemisahan CO<sub>2</sub>, menunjukkan bahwa penyesuaian rasio SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> selama sintesis dapat meningkatkan selektivitas membran [6]. Temuan ini menunjukkan bahwa potensi membran zeolit dalam proses pemisahan CO<sub>2</sub> dapat memanfaatkan sifat adsorpsi yang unik dari zeolit dan mengintegrasikannya kedalam sistem membran, sehingga diperoleh metode yang lebih efektif dan efisien untuk memisahkan CO<sub>2</sub> dari campuran gas. Penelitian tersebut membuktikan bahwa efektivitas bahan berbasis zeolit dalam proses pemisahan gas dapat memberikan kemampuan adsorpsi yang kuat dalam memisahkan gas seperti CO<sub>2</sub> dari campuran gas [7].

### 2. Metal-Organic Frameworks (MOFs)

Membran MOFs merupakan salah satu teknologi yang menjanjikan dalam aplikasi pemisahan gas CO<sub>2</sub>. MOFs memiliki struktur nanopori yang memungkinkan penyerapan CO<sub>2</sub> dengan tingkat selektivitas yang tinggi terhadap gas-gas lain seperti CH<sub>4</sub> dan H<sub>2</sub> [8]. Misalnya, jenis MOFs seperti SIFSIX-3-M dimana (M = Zn, Cu, dan Ni) menunjukkan kapasitas penyerapan CO<sub>2</sub> yang luar biasa dibandingkan dengan gas-gas lain dalam campuran gas industri [8]. Selain itu, jenis MOF-74 yang termodifikasi dengan grafena oksida juga dapat digunakan dalam pembuatan membran untuk pemisahan gas CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> dengan meningkatkan selektivitas gas CO<sub>2</sub> karena memiliki saluran satu dimensi yang memungkinkan keterikatan yang kuat terhadap molekul CO<sub>2</sub> [9]. Penerapan MOFs termodifikasi dengan nikel dalam membran juga telah terbukti meningkatkan efisiensi pemisahan gas CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> [10].

Penerapan kedua material berpori tersebut (zeolit dan MOFs) mempunyai peranan yang signifikan dalam aplikasi pemisahan gas. Zeolit telah lama

digunakan dalam aplikasi pemisahan gas dan katalisis selektif berdasarkan ukuran pori yang dapat diatur [11]. Disisi lain, MOFs juga menunjukkan potensi yang besar dalam pemisahan gas dan aplikasi hidrokarbon [12]. Penggunaan zeolit telah dilaporkan dalam pemisahan  $\text{SO}_2/\text{NO}_2$ , dimana  $\text{NO}_2$  dimerisasi pada membran zeolit SSZ-13, Sementara itu, MOFs telah digunakan dalam pengembangan membran untuk pemisahan gas. Penelitian-penelitian tersebut telah menyelidiki efektivitas material dan kemampuan adsorpsi yang kuat yang berbasis zeolit dalam proses pemisahan gas  $\text{CO}_2$  dari campuran gas.

## METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi yang digunakan pada pembuatan *review* artikel ini berupa *literature review* dengan teknik pengumpulan data sekunder berdasarkan pada penelitian-penelitian terdahulu dan dari sumber yang terpercaya. Artikel ilmiah jurnal-jurnal pada *review* artikel ini dapat digunakan sebagai dasar untuk bahan penelitian selanjutnya. Sumber data yang digunakan berasal dari beberapa *search engine*, seperti *google scholar*, *Pubmed* atau *connected paper*, dengan kriteria pemilihan referensi yang digunakan yaitu jurnal artikel penelitian yang mengandung kata kunci *review* artikel ini.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Zeolit

Zeolit merupakan material kristal aluminosilikat mikropori yang tersusun dari struktur  $\text{TO}_4$  tetrahedra (dimana T = Si, Al, B, I, P, dll). Ukuran pori-pori yang seragam ditentukan oleh struktur kristal spesifiknya. Selain struktur kristal tersebut, material ini juga memiliki stabilitas kimia dan termal yang baik sehingga menawarkan potensi besar sebagai bahan membran untuk pemisahan yang sangat selektif dari banyak pemisahan yang diinginkan,

seperti contoh: isomer xilena, isomer butana [13], dan  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  [14].

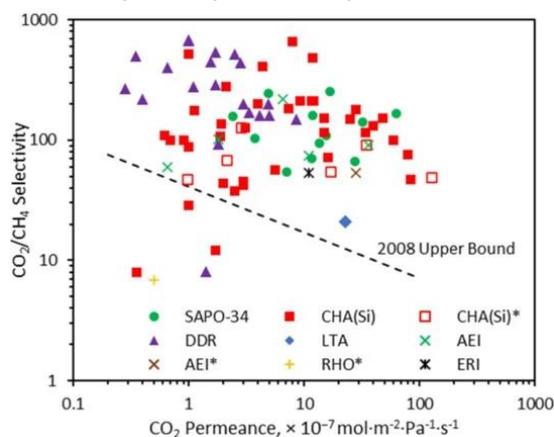
Zeolit menunjukkan potensi yang signifikan dalam pemisahan gas dikarenakan pori-pori mikro yang dimiliki serta karakteristik penyaringan molekulernya. Kemampuan selektif zeolit dalam hal ukuran memungkinkannya untuk memisahkan molekul gas yang lebih kecil hingga molekul yang lebih besar. Selain itu, zeolit berguna dalam meningkatkan permeabilitas dan selektivitas gas ketika diaplikasikan dalam membran polimer.

Jenis zeolit RHO telah menarik perhatian karena memiliki pori dengan ukuran 0,36 nm, sehingga cocok untuk molekul gas seperti  $\text{CO}_2$  (0,33 nm) dan  $\text{CH}_4$  (0,38 nm) [15]. Penelitian yang dilakukan oleh Atalay-Oral dkk. [15] menunjukkan bahwa zeolit RHO memiliki kapasitas adsorpsi  $\text{CO}_2$  yang tinggi sebesar 0,30 g/g, dengan rasio kapasitas adsorpsi  $\text{CO}_2$  terhadap  $\text{CH}_4$  mencapai 74,9. Potensi zeolit RHO dalam pemisahan  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  menjadi sangat penting dari temuan tersebut.

Telah diketahui bahwa gas  $\text{CO}_2$  sering ditemukan dalam berbagai aliran gas industri, seperti gas alam dan gas limbah. Oleh karena itu, pemisahan campuran gas  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  dan  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  menjadi proses penting dalam industri karena keberadaan  $\text{CO}_2$  dapat mengurangi nilai kalor aliran gas dan menyebabkan korosi dalam sistem perpipaan. Teknologi membran menjadi penting dalam pemisahan gas karena keunggulannya, termasuk konsumsi energi yang rendah, desain yang mudah, kemudahan pengoperasian, fleksibilitas dalam peningkatan skala, dan kemungkinan penggunaan untuk operasi berkelanjutan, serta tidak memerlukan perubahan bentuk/fase [16].

Pemisahan campuran gas  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  merupakan aplikasi yang paling banyak dieksplorasi untuk membran zeolit berpori.

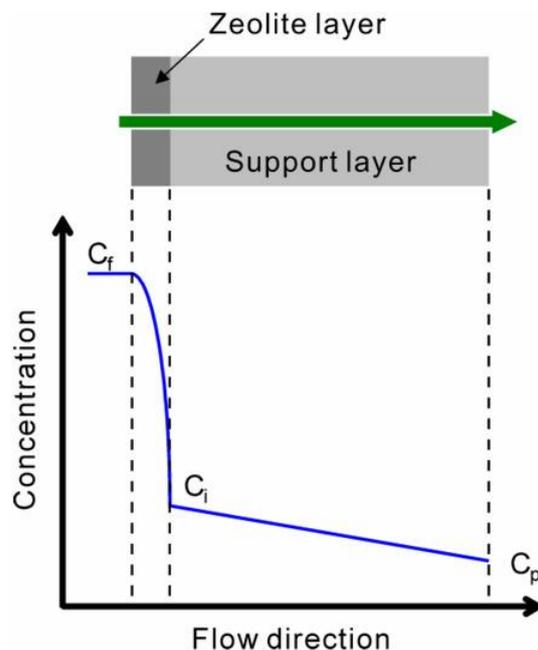
Gas alam harus memenuhi persyaratan konsentrasi CO<sub>2</sub> maksimum yang diizinkan untuk mengurangi masalah korosi dalam pipa sebagai alat transportasi. Beberapa sumber gas alam, kelebihan CO<sub>2</sub> harus dihilangkan. Ukuran molekul CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> memiliki ukuran kinetik masing-masing 0,33 dan 0,38 nm. Membran zeolit berpori, seperti jenis CHA, DDR dan AEI memiliki ukuran pori sekitar 0,38 nm yang mendekati ukuran CH<sub>4</sub> dan berpotensi mencapai selektivitas yang tinggi melalui efek penyaringan molekuler. Kinerja pemisahan dari berbagai jenis membran zeolit berpori dapat dilihat pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Kinerja pemisahan CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> untuk berbagai jenis membran zeolit berpori [17]

Penelitian yang dilakukan oleh Yুদ্ধ, [14] menunjukkan bahwa membran ini memiliki permeabilitas CO<sub>2</sub> tertinggi dan selektivitas CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> yang sedang hingga baik. Secara keseluruhan, sulit untuk pori-pori membran zeolit untuk bersaing dengan membran polimer dalam pemisahan CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> kecuali selektivitasnya yang dapat ditingkatkan secara signifikan tanpa menghilangkan permeasi membran. Membran zeolit sering kali dibuat pada penyangga berpori, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Pada gambar 2 terlihat bahwa molekul-molekul yang ditransfer oleh gradien konsentrasi melintasi membran. Dimana C<sub>f</sub> adalah konsentrasi dalam umpan, C<sub>p</sub> adalah

konsentrasi dalam permeat, dan C<sub>i</sub> adalah konsentrasi pada antarmuka antara zeolit dan lapisan penyangga [18].



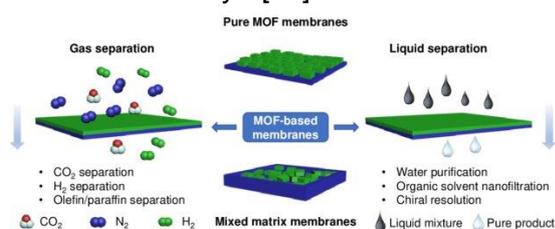
**Gambar 2.** Ilustrasi skema gradien konsentrasi melintasi membran zeolit yang disangga oleh substrat berpori [18]

## 2. Metal-Organic Frameworks (MOFs)

Komposit berbasis MOFs mencakup membran MOFs murni dan MMMs berbasis MOFs, keduanya dianggap sebagai bahan MOFs generasi berikutnya [4]. Sejauh ini, sudah banyak komposit membran MOFs dan MMMs murni berkinerja tinggi yang telah digunakan untuk pemisahan gas (CO<sub>2</sub>, hidrogen, olefin/parafin, dll.) serta pemisahan cairan (pemurnian air, pemisahan pelarut organik, pelarutan senyawa kiral, dll.) (Gambar 3) [19]. Model sorpsi-difusi digunakan untuk menjelaskan perbedaan ukuran molekul dan afinitas kimia dalam menjelaskan fenomena permeasi.

Dalam hal ini, lapis tipis MOFs murni merupakan jenis bahan polikristalin yang terdiri dari substrat berpori (seperti  $\alpha$ -alumina atau silikon dioksida). Kinerja pemisahan MOFs bergantung pada

fleksibilitas kerangka dan strukturnya [20], [21], [22]. Sebagai jenis membran penting lainnya, MMMs terdiri dari MOFs dan matriks polimer lebih selektif yaitu menggabungkan sifat transfer MOFs yang sangat baik dengan keunggulan proses yang mudah dan biaya polimer yang rendah. Kinerja dari MMMs sebagai pemisahan terutama dipengaruhi oleh dispersi MOFs, plastisasi dan matriks polimer, dan kompatibilitas antarmuka diantara keduanya [14].



**Gambar 3.** Ilustrasi skema aplikasi ekstensif membran MOFs murni dan MMMs untuk pemisahan gas dan cairan [19]

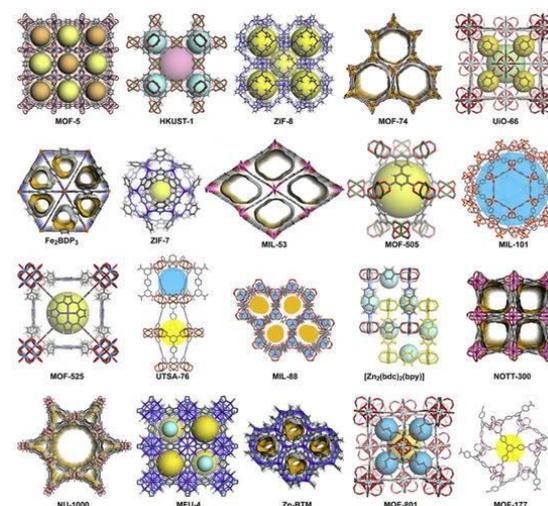
Dalam ulasan ini, kami meninjau faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja pemisahan membran berbasis MOFs (yaitu membran MOFs murni dan MMMs) serta penerapannya dalam pemisahan gas-cair. Pertama kami menguraikan faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja pemisahan membran MOFs murni dan MMMs. Faktor yang mempengaruhi antara lain fleksibilitas kerangka, cacat (*defect*), orientasi partikel dalam lapis tipis MOFs murni, aglomerasi MOFs, plastisasi dan matriks polimer, serta kompatibilitas antarmuka MMMs. Selain itu, kami juga membahas penerapan membran berbasis MOFs dalam pemisahan gas seperti pemisahan CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, dan olefin/alkana.

Selanjutnya, kami membahas secara komprehensif penerapan membran berbasis MOFs dalam pemisahan fase cair seperti pemurnian air, pemisahan pelarut organik, dan pelarutan kiral. Secara keseluruhan, kami memberikan wawasan komprehensif mengenai topik yang sangat penting ini dan memberikan pandangan

bahwa membran berbasis MOFs dapat digunakan sebagai bahan fungsional yang menjanjikan di masa depan.

### 3. Sifat-Sifat MOFs

Material MOFs biasanya terdiri dari logam dan *linker* organik. Dibandingkan dengan material konvensional seperti silika gel dan zeolit, MOFs memiliki kapasitas penyerapan air yang unggul, kemampuan daur ulang, kemudahan rekonstruksi, dan sifat perpindahan panas yang unik [4], [23]. Struktur khas dari MOFs yang digunakan untuk fabrikasi membran ditunjukkan pada Gambar 4.



**Gambar 4.** Ilustrasi skema struktur material umum MOFs [20]

Pada gambar 4, dapat terlihat bahwa MOFs jenis kerangka *Zeolitic Imidazolate Frameworks* (ZIFs), UiO-66 atau  $[Zr_6O_4(OH)_4(\text{benzene-1,4-dicarboxylato})_6]_n$ , HKUST-1 atau  $Cu_3(1,3,5\text{-benzene-tri-carboxylate})_n$ , MIL-53, dan MIL-101 memiliki keragaman simpul logam dan *linker* organik sekitar 70.000 yang telah berhasil disintesis dalam dekade terakhir dengan pembentukan ukuran pori, struktur (celah, tabung, bola, silinder, dll.) serta metode yang berbeda. Oleh karena itu, molekul gas atau cairan dapat dipisahkan menurut perbedaan ukuran molekulnya dan afinitas adsorpsinya [24].

Selain itu, ukuran MOFs dapat disesuaikan secara tepat melalui pendekatan *isoreticular*, inter-penetrasi, partisi ruang pori, dan metode lainnya. Misalnya, menggunakan *linker* organik dengan panjang yang berbeda untuk menggantikan *linker* MOFs asli. *Linker* organik tersubstitusi tersebut memiliki geometri yang sama namun dengan konektivitas yang lebih baik. Pada awalnya MOFs tersebut memiliki ukuran yang rendah dan mengalami peningkatan setelah perlakuan substitusi dari 3,8 Å hingga menjadi 23,8 Å. Selain modifikasi *linker* organik, ion logam juga dapat digantikan oleh ikatan *isoreticular*. Misalnya, mengubah ion logam dalam MOFs jenis SIFSIX-3-M dari Zn menjadi Cu dan mengubah ukuran pori dari 3,84 Å menjadi 3,50 Å. Namun, interaksi antara permukaan pori dan molekul dapat ditingkatkan dengan mengurangi ukuran pori. Sehingga, molekul kecil dapat melewati rongga pori dan molekul tersaring.

Upaya dalam meningkatkan kinerja pemisahan oleh MOFs dapat dicapai tidak hanya dengan kontrol rongga pori yang presisi namun juga dengan fungsionalisasi MOFs. Fungsionalisasi tersebut memungkinkan MOFs untuk secara selektif dapat mengenali molekul gas atau cairan dengan secara khusus meningkatkan afinitas pengikatannya. Situs fungsionalisasi mencakup situs *linker* organik dan situs logam tak jenuh yaitu, *Open Metal Sites* (OMS), dimana situs *linker* organik selanjutnya dapat berikatan dengan gugus polar (misalnya, -NH, -NO<sub>2</sub>, -OH, -Br, dll.). Penyaringan selektif oleh MOFs dapat dicapai melalui interaksi antarmolekul seperti pengikatan hidrogen.

#### 4. Lapis Tipis MOFs Murni

Lapis tipis MOFs murni dapat dibuat pada substrat berpori dengan berbagai metode fabrikasi yang umum digunakan, antara lain seperti

pertumbuhan *in situ*, pertumbuhan benih, teknik *Layer-by-layer* (LbL), dan deposisi fase uap [25]. Faktor-faktor utama yang mempengaruhi kinerja pemisahan oleh membran MOFs murni terutama dari fleksibilitas kerangka dan strukturnya [26]. Fleksibilitas kerangka tersebut memungkinkan lewatnya molekul yang lebih besar. Sementara itu, struktur yang tidak mencukupi dapat menyebabkan cacat. Dengan demikian dapat bertindak sebagai pori-pori non-selektif dan mempengaruhi kinerja pemisahan membran [20]. Beberapa laporan terbaru menunjukkan bahwa cacat/defect dapat membantu meningkatkan kinerja pemisahan membran MOFs murni, daripada menyebabkan efek samping dari rekayasa cacat karena peningkatan porositas dan OMS [27]. Selain itu, dikarenakan membran MOFs murni adalah bahan polikristalin, sehingga orientasi partikel juga dapat mempengaruhi kinerja pemisahan membran.

Membran zeolit dan MOFs memiliki kelebihan dan kekurangan dalam aplikasi pemisahan gas CO<sub>2</sub>. Membran zeolit memiliki kelebihan dalam kesederhanaan, kemudahan pengendalian kerangka, keseragaman, biaya yang lebih rendah, dan konsumsi energi yang minim [28]. Selain itu, zeolit juga dapat digunakan sebagai katalis, adsorben, dan membran untuk pemisahan gas karena stabilitas termal dan hidrotermal yang baik serta kapasitas penukar ion yang tinggi [29]. Disisi lain, membran zeolit dapat memiliki kekurangan dalam selektivitas dan permeabilitas gas CO<sub>2</sub> yang rendah [30].

Fakta lainnya bahwa MOFs menawarkan keunggulan dalam adsorpsi CO<sub>2</sub> yang selektif dan cepat dengan rongga untuk transportasi molekul CO<sub>2</sub> yang lebih baik daripada N<sub>2</sub>, sehingga meningkatkan selektivitas campuran gas

CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> dan permeabilitas CO<sub>2</sub> [31]. Material MOFs juga telah digunakan dalam pemisahan gas seperti H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atau C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, meskipun masih sedikit yang memungkinkan pemisahan CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>, atau N<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> secara efisien [32]. Namun demikian, MOFs juga memiliki kelemahan, seperti keterbatasan dalam pemisahan gas tertentu dan kinerja kurang optimal dalam beberapa kasus [33].

### KESIMPULAN

Dalam *review* artikel ini, tinjauan literatur mengenai penggunaan teknologi membran zeolit dan MOFs dalam pemisahan gas CO<sub>2</sub> telah diuraikan secara komprehensif. *Review* artikel ini menguraikan bahwa kedua teknologi tersebut menawarkan solusi yang menjanjikan untuk mengatasi masalah lingkungan yang disebabkan oleh gas CO<sub>2</sub>. Pada material zeolit, penelitian telah menunjukkan bahwa zeolit memiliki selektivitas yang tinggi dalam pemisahan CO<sub>2</sub>, terutama zeolit jenis CHA. Integrasi zeolit ke dalam sistem membran telah meningkatkan selektivitas membran terhadap CO<sub>2</sub>, dengan penyesuaian rasio SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> selama sintesis yang terbukti meningkatkan selektivitas tersebut. Penelitian lain juga menyoroti penggunaan zeolit dalam pemisahan campuran gas CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> yang merupakan aplikasi yang paling banyak dieksplorasi untuk membran zeolit berpori.

Sementara itu, dalam material MOFs, membran MOFs dan MMMs menawarkan kinerja yang tinggi dalam pemisahan gas CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, dan pemisahan fase cair seperti pemurnian air dan pemisahan pelarut organik. Penelitian lain juga menyoroti sifat-sifat unik MOFs, seperti fleksibilitas kerangka dan fungsionalisasi yang memungkinkannya untuk pemisahan yang sangat selektif. Secara keseluruhan, *review* artikel ini memberikan wawasan yang komprehensif

tentang potensi zeolit dan MOFs dalam pemisahan gas CO<sub>2</sub>, serta menyoroti pentingnya pengembangan lebih lanjut dalam bidang ini untuk mengatasi tantangan lingkungan global yang berkaitan dengan gas CO<sub>2</sub>.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengapresiasi dan mengucapkan terima kasih kepada FMIPA Universitas Palangka Raya atas dukungan yang diberikan.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Zhang *et al.*, "Pebax Mixed-Matrix Membrane with Highly Dispersed ZIF-8@CNTs to Enhance CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> Separation," *ACS Omega*, vol. 6, no. 29, pp. 18566–18575, Jul. 2021, doi: 10.1021/acsomega.1c00493.
- [2] F. Hirose, M. Miyagawa, and H. Takaba, "High Efficient CO<sub>2</sub> Separation at High Pressure by Grain-Boundary-Controlled CHA Zeolite Membrane Investigated by Non-Equilibrium Molecular Dynamics," *Membranes (Basel)*, vol. 13, no. 3, p. 278, Feb. 2023, doi: 10.3390/membranes13030278.
- [3] L. D. Anbealagan *et al.*, "Modified Zeolite/Polysulfone Mixed Matrix Membrane for Enhanced CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> Separation," *Membranes (Basel)*, vol. 11, no. 8, p. 630, Aug. 2021, doi: 10.3390/membranes11080630.
- [4] Q. Qian *et al.*, "MOF-Based Membranes for Gas Separations," *Chem. Rev.*, vol. 120, no. 16, pp. 8161–8266, Aug. 2020, doi: 10.1021/acs.chemrev.0c00119.
- [5] P. Wang, Q. Sun, Y. Zhang, and J. Cao, "Synthesis of Zeolite 4A from Kaolin and Its Adsorption Equilibrium of Carbon Dioxide," *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 9, p. 1536, May 2019, doi: 10.3390/ma12091536.
- [6] L. Liang *et al.*, "Single Gas Permeance Performance of High

- Silica SSZ-13 Zeolite Membranes,” *Membranes (Basel)*, vol. 8, no. 3, p. 43, Jul. 2018, doi: 10.3390/membranes8030043.
- [7] Z. Abidin, H. Rizal, Trivadila, and N. Hiedayati, “Sintesis Komposit Zeolit X/Oksida Perak dan Tembaga Melalui Reaksi Tollens Serta Aplikasinya Sebagai Adsorben,” *J. Ilmu Tanah dan Lingkung.*, vol. 24, no. 2, pp. 87–95, Jan. 2023, doi: 10.29244/jitl.24.2.87-95.
- [8] V. Chernikova, O. Shekhah, Y. Belmabkhout, and M. Eddaoudi, “Nanoporous Fluorinated Metal–Organic Framework-Based Membranes for CO<sub>2</sub> Capture,” *ACS Appl. Nano Mater.*, vol. 3, no. 7, pp. 6432–6439, Jul. 2020, doi: 10.1021/acsanm.0c00909.
- [9] L. Feng *et al.*, “Graphene-Oxide-Modified Metal–Organic Frameworks Embedded in Mixed-Matrix Membranes for Highly Efficient CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> Separation,” *Nanomaterials*, vol. 14, no. 1, p. 24, Dec. 2023, doi: 10.3390/nano14010024.
- [10] A. Mousavinejad, A. Rahimpour, M. R. Shirzad Kebria, S. Khoshhal Salestan, M. Sadrzadeh, and N. Tavajohi Hassan Kiadeh, “Nickel-Based Metal–Organic Frameworks to Improve the CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> Separation Capability of Thin-Film Pebax Membranes,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 59, no. 28, pp. 12834–12844, Jul. 2020, doi: 10.1021/acs.iecr.0c01017.
- [11] H. S. Lee *et al.*, “Post-Synthesis Functionalization Enables Fine-Tuning the Molecular-Sieving Properties of Zeolites for Light Olefin/Paraffin Separations,” *Adv. Mater.*, vol. 33, no. 48, Dec. 2021, doi: 10.1002/adma.202105398.
- [12] S. Yang, B. Min, Q. Fu, C. W. Jones, and S. Nair, “High-Performance Zeolitic Hollow-Fiber Membranes by a Viscosity-Confined Dry Gel Conversion Process for Gas Separation,” *Angew. Chemie Int. Ed.*, vol. 61, no. 29, Jul. 2022, doi: 10.1002/anie.202204265.
- [13] B. Min, S. Yang, A. Korde, Y. H. Kwon, C. W. Jones, and S. Nair, “Continuous Zeolite MFI Membranes Fabricated from 2D MFI Nanosheets on Ceramic Hollow Fibers,” *Angew. Chemie Int. Ed.*, vol. 58, no. 24, pp. 8201–8205, Jun. 2019, doi: 10.1002/anie.201903554.
- [14] L. Yu, M. S. Nobandegani, and J. Hedlund, “Industrially relevant CHA membranes for CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> separation,” *J. Memb. Sci.*, vol. 641, p. 119888, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.memsci.2021.119888.
- [15] C. Atalay-Oral and M. Tatlier, “Characterization of mixed matrix membranes by adsorption and fractal analysis,” *Sep. Sci. Technol.*, vol. 54, no. 14, pp. 2323–2333, Sep. 2019, doi: 10.1080/01496395.2018.1540638.
- [16] L. Forster *et al.*, “Tailoring pore structure and surface chemistry of microporous Alumina-Carbon Molecular Sieve Membranes (Al-CMSMs) by altering carbonization temperature for optimal gas separation performance: An investigation using low-field NMR relaxation measurements,” *Chem. Eng. J.*, vol. 424, p. 129313, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.cej.2021.129313.
- [17] Z. Cao, N. D. Anjekar, and S. Yang, “Small-Pore Zeolite Membranes: A Review of Gas Separation Applications and Membrane Preparation,” *Separations*, vol. 9, no. 2, p. 47, 2022, doi: 10.3390/separations9020047.
- [18] Y. Hasegawa, M. Natsui, C. Abe, A. Ikeda, and S. B. Lundin, “Estimation of CO<sub>2</sub> Separation Performances through CHA-Type Zeolite Membranes Using Molecular Simulation,” *Membranes (Basel)*,

- vol. 13, no. 1, p. 60, 2023, doi: 10.3390/membranes13010060.
- [19] Y. Duan, L. Li, Z. Shen, J. Cheng, and K. He, "Engineering Metal-Organic-Framework (MOF)-Based Membranes for Gas and Liquid Separation," *Membranes (Basel)*, vol. 13, no. 5, p. 480, 2023, doi: 10.3390/membranes13050480.
- [20] R. Lin, S. Xiang, W. Zhou, and B. Chen, "Microporous Metal-Organic Framework Materials for Gas Separation," *Chem*, vol. 6, no. 2, pp. 337–363, 2020, doi: 10.1016/j.chempr.2019.10.012.
- [21] W. Wu, Z. Li, Y. Chen, and W. Li, "Polydopamine-Modified Metal-Organic Framework Membrane with Enhanced Selectivity for Carbon Capture," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 53, no. 7, pp. 3764–3772, Apr. 2019, doi: 10.1021/acs.est.9b00408.
- [22] Y. Cheng, S. J. Datta, S. Zhou, J. Jia, O. Shekhah, and M. Eddaoudi, "Advances in metal-organic framework-based membranes," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 51, no. 19, pp. 8300–8350, 2022, doi: 10.1039/D2CS00031H.
- [23] D.-Y. Kang and J. S. Lee, "Challenges in Developing MOF-Based Membranes for Gas Separation," *Langmuir*, vol. 39, no. 8, pp. 2871–2880, Feb. 2023, doi: 10.1021/acs.langmuir.2c03458.
- [24] M. Moayed Mohseni *et al.*, "Metal-organic frameworks (MOFs) based heat transfer: A comprehensive review," *Chem. Eng. J.*, vol. 449, p. 137700, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.cej.2022.137700.
- [25] S. Yu *et al.*, "Recent advances in metal-organic framework membranes for water treatment: A review," *Sci. Total Environ.*, vol. 800, p. 149662, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149662.
- [26] Y. Deng, Y. Wu, G. Chen, X. Zheng, M. Dai, and C. Peng, "Metal-organic framework membranes: Recent development in the synthesis strategies and their application in oil-water separation," *Chem. Eng. J.*, vol. 405, p. 127004, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.cej.2020.127004.
- [27] H. Li *et al.*, "Porous metal-organic frameworks for gas storage and separation: Status and challenges," *EnergyChem*, vol. 1, no. 1, p. 100006, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.enchem.2019.100006.
- [28] S. Setiadji, A. S. Wahyuni, D. Suhendar, C. D. D. Sundari, and A. L. Ivansyah, "Pemanfaatan Rumput Gajah sebagai Sumber Silika untuk Sintesis Zeolit T," *al-Kimiya*, vol. 4, no. 2, pp. 51–60, Jun. 2019, doi: 10.15575/ak.v4i2.5085.
- [29] X. Wang *et al.*, "Xenon Recovery by DD3R Zeolite Membranes: Application in Anaesthetics," *Angew. Chemie Int. Ed.*, vol. 58, no. 43, pp. 15518–15525, Oct. 2019, doi: 10.1002/anie.201909544.
- [30] S. E. M. Elhenawy, M. Khraisheh, F. AlMomani, and G. Walker, "Metal-Organic Frameworks as a Platform for CO<sub>2</sub> Capture and Chemical Processes: Adsorption, Membrane Separation, Catalytic-Conversion, and Electrochemical Reduction of CO<sub>2</sub>," *Catalysts*, vol. 10, no. 11, p. 1293, Nov. 2020, doi: 10.3390/catal10111293.
- [31] D.-Y. Kang, J. S. Lee, and L.-C. Lin, "X-ray Diffraction and Molecular Simulations in the Study of Metal-Organic Frameworks for Membrane Gas Separation," *Langmuir*, vol. 38, no. 31, pp. 9441–9453, Aug. 2022, doi: 10.1021/acs.langmuir.2c01317.
- [32] C. Chen, A. Ozcan, A. O. Yazaydin, and B. P. Ladewig, "Gas permeation through single-crystal ZIF-8 membranes," *J. Memb. Sci.*, vol. 575, pp. 209–216, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.memsci.2019.01.027.

- [33] Y. Suprianti, K. Kurniawan, P. Iriani, and A. F. Nugraha, "Uji Kinerja Campuran Adsorben Karbon Aktif dan Zeolit untuk Pemisahan Karbon Dioksida dari Biogas dengan Metode Adsorpsi," *J. Miner. Energi, dan Lingkung.*, vol. 5, no. 1, p. 18, Jan. 2022, doi: 10.31315/jmel.v5i1.3872.