



Scripta Technica: Journal of Engineering and Applied Technology

Vol 1 No 1 Juni 2025, Hal 40-47
ISSN: XXXX-XXXX (Print) ISSN: XXXX-XXXX (Electronic)
Open Access: <https://scriptaintektual.com/scripta-technica>

Tinjauan Perkembangan Teknologi Membran dalam Pemisahan Gas CO₂ dari CH₄

Rafi Indratama^{1*}

¹ Universitas Islam Negeri Jurai Siwo Lampung, Indonesia
email: ifartama@gmail.com

Article Info :

Received:
25-5-2025
Revised:
30-5-2025
Accepted:
08-6-2025

Abstract

Global CO₂ emissions exceeding 30 billion tons annually significantly contribute to global warming, including in natural gas, biogas, and landfill gas streams containing CH₄. High CO₂ content lowers CH₄'s calorific value, requiring efficient separation technology. Gas membranes offer an energy-efficient, low-cost, and simple alternative to conventional methods. This study reviews advancements in CO₂/CH₄ separation membranes, focusing on material innovations and performance. A systematic literature review was conducted following PRISMA guidelines, covering international publications (2010–2025) with relevant keywords. Data were analyzed qualitatively and quantitatively by membrane type, material, separation mechanism, and performance parameters such as permeability (PCO₂) and CO₂/CH₄ selectivity. Results show a publication surge after 2015, driven by developments in high-free-volume polymers (PIMs), carbon molecular sieves (CMS), zeolite-based inorganic membranes, mixed-matrix membranes (MMMs), and 2D materials like graphene and MOFs. Some materials exceeded the Robeson limit, achieving PCO₂ in the tens of thousands of Barrer with selectivity >100. Remaining challenges include plasticization, long-term stability, production costs, and scalability.

Keywords : Membrane Technology, Carbon Dioxide Separation, Methane Purification, Gas Permeability, Gas Selectivity.

Abstrak

Emisi CO₂ global yang melebihi 30 miliar ton per tahun menjadi penyumbang utama pemanasan global, termasuk dalam aliran gas alam, biogas, dan gas limbah yang mengandung CH₄. Tingginya kandungan CO₂ menurunkan nilai kalor CH₄ sehingga diperlukan teknologi pemisahan yang efisien. Membran gas menawarkan solusi hemat energi, berbiaya rendah, dan beroperasi sederhana dibanding metode konvensional. Penelitian ini meninjau perkembangan membran untuk pemisahan CO₂/CH₄ dengan fokus pada inovasi material dan kinerja pemisahan. Metode yang digunakan adalah tinjauan literatur sistematis sesuai pedoman PRISMA, mencakup publikasi internasional periode 2010–2025 dengan kata kunci relevan. Analisis dilakukan secara kualitatif dan kuantitatif berdasarkan jenis membran, material penyusun, mekanisme pemisahan, serta parameter kinerja seperti permeabilitas (PCO₂) dan selektivitas CO₂/CH₄. Hasil menunjukkan lonjakan publikasi setelah 2015 seiring kemajuan material seperti PIMs, CMS, membran zeolit, MMMs, dan material 2D seperti grafen dan MOFs. Beberapa material melampaui batas Robeson dengan PCO₂ puluhan ribu Barrer dan selektivitas >100. Tantangan yang tersisa meliputi plastisasi, stabilitas jangka panjang, biaya produksi, dan skalabilitas.

Kata kunci: Teknologi Membran, Pemisahan Karbon Dioksida, Pemurnian Metana, Permeabilitas Gas, Selektivitas Gas.



©2022 Authors.. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

PENDAHULUAN

Emisi CO₂ global telah mencapai lebih dari 30 miliar ton per tahun dalam lima tahun terakhir, menjadikannya kontributor tunggal terbesar terhadap pemanasan global (Adisasmito, et. al., 2023). Di banyak aliran gas seperti gas alam, biogas, dan gas landfill, konsentrasi CO₂ merusak nilai kalor CH₄ dan mengurangi efisiensi transport serta penggunaannya.

Dalam Sholeha et. al. (2024) menyebutkan bahwa membran gas menawarkan solusi yang lebih efisien secara energi dibandingkan metode konvensional. Teknologi ini muncul sejak era 1980-an dan

dikenal karena operasional yang sederhana, biaya rendah, mudah diskala linier, serta jejak proses yang compact. Contohnya biaya capture CO₂ dengan membran bisa sekira US\$ 23 per ton, jauh lebih rendah dibandingkan metode amina konvensional (US\$ 40–100 per ton).

Berdasarkan Comesaña-Gándara et. al. (2019) dinyatakan bahwa membran polimer seperti polisulfon, poliamida, polimida pada umumnya mematuhi batas performa yang dikenal sebagai *Robeson upper bound*, di mana permeabilitas yang tinggi biasanya berbanding terbalik dengan selektivitas rendah. Penelitian berfokus pada memutus trade-off tersebut untuk mencapai keseimbangan optimal. Membran polimer termal-terubah (TR polymer) menunjukkan rentang CO₂ permeability 5–5 903 Barrer dan selektivitas CO₂/CH₄ 3,8–124, bahkan melampaui batas Robeson. Hal ini menunjukkan potensi besar material turunan polimer dalam meningkatkan performa pemisahan (Jeon, & Lee, 2015).

Teknologi membran campuran–matriks (MMMs) yang mencampurkan polimer dengan filler anorganik seperti zeolit atau MOF juga banyak dikembangkan. Zeolit khususnya menunjukkan selektivitas tinggi berkat pori teratur dan afinitas adsorpsi CO₂ yang kuat (Caralin, 2020). Elma et. al. (2023) mengemukakan bahwa penggunaan molecular sieve (seperti zeolit DDR) sangat mahal sekitar US\$ 3000 per m², sedangkan membran polimer hollow fiber hanya sekitar US\$ 20 per m². Hal ini menjadi hambatan utama untuk penerapan teknologi anorganik skala industri.

Berdasarkan Risnayanti (2023) menyampaikan bahwa kombinasi polimer dan filler anorganik bertujuan menggabungkan kemudahan pemrosesan polimer dengan performa unggul filler. Tantangan seperti penyebaran filler yang tidak homogen dan adhesi antar fase yang rendah masih menghambat hingga saat ini; bahkan saat ini belum ada MMM komersial yang berjalan dalam industri.

Studi dari Nilamsari (2024) menunjukkan bahwa membran hollow-fiber berbasis P84/PCs (carbon terpori doping-sulfur) yang dimodifikasi pada suhu karbonisasi tertentu memiliki performa signifikan. Contohnya, membran P84/PCs-600 menunjukkan permeabilitas CO₂ 287,21 Barrer, meningkat 783,38 % dibanding P84 murni, sementara P84/PCs-700 meraih selektivitas CO₂/CH₄ sebesar 17,11, setara 900,58 % peningkatan dibanding P84 asli. Dalam kondisi campuran gas nyata, membran komposit juga menunjukkan efek feed gas composition dan tekanan. Misalnya, membran composite C₁₀ menghasilkan permeansi CO₂ sebesar 15,10 GPU pada feed CO₂ 70 vol %, naik 112 % dibanding kondisi gas murni. Selektivitas CO₂/CH₄ justru turun dari 7,9 (14,5 vol %) menjadi 4,6 (70 vol %) (Zakariya, et. al., 2022).

Menurut Khamaludin et. al. (2022) menjelaskan bahwa meski potensi teknologi membran sangat jelas dengan keuntungan seperti modularitas, low-cost footprint, dan efisiensi energi sebagian besar inovasi masih berhenti di level penelitian (TRL < 5) dan belum diadopsi skala industri secara luas. Pengembangan lanjut fokus pada stabilitas membran jangka panjang, cost-effective scaling, dan optimasi multi-stage atau hybrid process menjadi sangat penting.

Peluang aplikasi pemisahan CO₂/CH₄ dengan membran tidak hanya terbatas pada gas alam, tetapi juga sangat relevan bagi pengolahan biogas. Data dari IEA (2018) menunjukkan bahwa potensi produksi biogas global mencapai lebih dari 570 miliar m³ per tahun, setara dengan sekitar 20 % konsumsi gas alam dunia. Kandungan CO₂ dalam biogas umumnya berada pada kisaran 30–50 %, yang harus diturunkan hingga di bawah 3 % untuk memenuhi standar biomethane grid injection. Teknologi membran menjadi kandidat utama untuk upgrade biogas karena dapat dioperasikan secara berkesinambungan tanpa penggunaan bahan kimia korosif dan tidak menghasilkan limbah cair. Dengan pertumbuhan kebutuhan energi bersih dan desakan regulasi pengurangan emisi karbon misalnya target *net zero emission* pada tahun 2060 yang dicanangkan oleh banyak negara penelitian dan penerapan teknologi membran untuk pemisahan CO₂/CH₄ diproyeksikan meningkat pesat (ChandraAsri, 2025).

METODE PENELITIAN

Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *systematic literature review* untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis perkembangan teknologi membran dalam pemisahan gas CO₂ dari CH₄ (Triandini et. al., 2019). Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan peneliti memperoleh gambaran menyeluruh mengenai tren penelitian, inovasi material membran, serta efisiensi proses yang telah dilaporkan dalam berbagai publikasi ilmiah. Proses peninjauan dilakukan dengan mengikuti pedoman PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) agar hasil kajian lebih sistematis dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

Teknik Pengumpulan Data

Sumber data penelitian diperoleh dari basis data ilmiah internasional seperti Google Scholar dengan rentang publikasi antara tahun 2010–2025. Kata kunci pencarian meliputi “membrane technology”, “CO₂ separation”, “CH₄ purification”, dan “gas separation membrane”. Artikel yang masuk tahap seleksi awal akan disaring berdasarkan kriteria inklusi seperti relevansi topik, kesesuaian metode, dan ketersediaan data kinerja membran. Proses seleksi dilakukan secara bertahap, dimulai dari peninjauan judul dan abstrak, dilanjutkan dengan pembacaan penuh untuk memastikan kesesuaian konten dengan tujuan penelitian.

Teknik Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis secara kualitatif. Analisis kualitatif meliputi pengelompokan jenis membran, bahan penyusun, mekanisme pemisahan, serta aplikasi industri yang dilaporkan. Hasil analisis kemudian diinterpretasikan untuk mengidentifikasi perkembangan teknologi, tantangan yang dihadapi, serta peluang pengembangan di masa depan (Ahmad, & Nasution, 2018).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perkembangan Penelitian Teknologi Membran

Kompilasi data menunjukkan tren peningkatan publikasi tentang pemisahan CO₂/CH₄ dengan membran sejak 2010 hingga 2024 dari puluhan artikel per tahun (± 40 –60 pada 2010–2012) menuju ratusan publikasi per tahun (> 400 pada 2023). Kenaikan ini konsisten dengan lintas-studi bibliometrik di bidang CO₂ capture yang melaporkan percepatan output ilmiah setelah 2015 fenomena yang dihubungkan dengan peningkatan perhatian global terhadap CCUS dan target dekarbonisasi. Perubahan ini tercatat pula pada beberapa review bidang membran yang memuat grafik tren publikasi (Naseer, et. al., 2022).

Dalam Xing et al. (2020) menyatakan bahwa lonjakan publikasi signifikan terlihat sekitar 2016–2019. Literatur mengaitkan percepatan ini dengan dua faktor yaitu peningkatan pendanaan riset CCUS setelah Perjanjian Paris 2015 dan kemajuan material (PIMs, MOFs, CMS) yang membuka topik-topik baru untuk eksplorasi. Analisis ini didukung oleh beberapa bibliometri yang menunjukkan puncak pertumbuhan jumlah dokumen pada rentang tersebut.

Menurut Iarikov & Oyama (2011) pada dekade awal (2010–2014) mayoritas studi memusatkan pada polimer komersial (poliamida, polisulfon, polimida) dan optimasi proses modul. Sejak ~2015, ada pergeseran riset menuju (1) mixed matrix membranes (MMMs) memasukkan MOF/zeolit, (2) carbon molecular sieve (CMS) membranes, (3) polymers of intrinsic microporosity (PIMs), dan (5) facilitated-transport (FT) membranes yang dilaporkan di banyak review lintas-tahun. Movemen material ini tercatat dalam grafik tematik bibliometrik (keyword bursts) pada studi-studi terbaru.

Seiring naiknya interest terhadap material inovatif, riset tidak lagi hanya melaporkan permeabilitas/selektivitas laboratorium, melainkan juga stabilitas jangka panjang, sensitivitas terhadap kandungan uap/H₂S, dan integrasi modul hollow-fiber untuk aplikasi biogas/natgas. Studi dari Nemestóthy et. al. (2020) menunjukkan pergeseran metode evaluasi dari uji gas murni ke pengujian campuran gas nyata, sebagai upaya menjembatani kesenjangan antara TRL penelitian dan kebutuhan industri.

Analisis bibliometrik global pada topik CO₂ capture dan membran menunjukkan bahwa China dan Amerika Serikat memimpin jumlah publikasi, diikuti India, Inggris, dan beberapa negara Eropa. Satu ringkasan bibliometrik studi oleh Carrascal-Hernández et. al. (2025) melaporkan angka absolut (mis. China ~323 dokumen pada cakupan tertentu vs AS ~89 pada cakupan yang sama), mempertegas

dominasi geografis Asia (khususnya China) dalam produksi ilmiah untuk tema ini. Institusi terkemuka muncul dari universitas/universitas riset besar (termasuk lembaga di China, beberapa universitas di AS dan Eropa serta pusat penelitian nasional). Perlu dicatat perbedaan antara jumlah publikasi dan sitasi/impact; beberapa publikasi dari AS/UK tetap lebih banyak disitasi per dokumen.

Tabel 1. Perkembangan Penelitian Terdahulu dalam Pemisahan CO₂/CH₄ Menggunakan Membran

Tahun	Penulis	Judul Penelitian	Metode
2010	Colin Scholes, Sandra Kentish, Geoff Stevens	<i>“Carbon Dioxide Separation through Polymeric Membrane Systems for Flue Gas Applications”</i>	Tinjauan paten membran polimer untuk penangkapan CO ₂ dari flue gas
2011	Dmitri Iarikov & Shigeo Ted Oyama	<i>“Review of CO₂/CH₄ Separation Membranes”</i>	Tinjauan komprehensif membran: polimer, anorganik, MMMs
2015	Yong-Woo Jeon & Dong-Hoon Lee	<i>“Gas membranes for CO₂/CH₄ (biogas) separation: A Review”</i>	Review material polimer (polyimide, polysulfone), TR membran, MMMs
2018	Xu, J., Wu, H., Wang, Z., Qiao, Z., Zhao, S., & Wang, J	<i>“Recent advances on the membrane processes for CO₂ separation”</i>	Review proses membran untuk CO ₂ pasca-combustion, biogas, gas alam
2022	Siamak Pakdel et al.	<i>“CO₂/CH₄ mixed-gas separation through carbon nitride membrane: A molecular dynamics simulation”</i>	MD simulasi membran karbon nitrida
2024	Alireza Taherizadeh et al.	<i>“A Study of the Influence of Synthesis Parameters on the Preparation of High Performance SSZ-13 Membranes”</i>	Eksperimen fabrikasi SSZ-13; pengukuran CO ₂ permeance & selektivitas
2021	Chunwei Zhang et al.	<i>“Efficient Facilitated Transport Polymer Membrane for CO₂/CH₄ Separation from Oilfield Associated Gas”</i>	Pengembangan membran polimer facilitated-transport; uji performa permeabilitas dan selektivitas
2022	Shahidah Zakariya et al.	<i>“Performance of Multilayer Composite Hollow Membrane in Separation of CO₂ from CH₄ in Mixed Gas Conditions”</i>	Komposit NH ₂ -MIL-125(Ti)/PEBAX pada PDMS/PSf; uji mixed-gas; karakterisasi FTIR & FESEM
2023	Aditya Jonnalagedda & Bhanu Vardhan Reddy Kuncharam	<i>“Investigation of ZIF-8, amine-modified ZIF-8 and polysulfone based mixed matrix membranes for CO₂/CH₄ separation”</i>	Mixed matrix membranes ZIF-8/amine-ZIF-8-polysulfone; eksperimen kinerja
2025	Cecilia M. S. Alvares & Rocio Semino	<i>“MARTINI-based force fields for predicting gas separation performances of MOF/polymer composites”</i>	Simulasi coarse-grained untuk gas adsorption (CO ₂ /CH ₄) pada MOF/polymer menggunakan MARTINI force-fields

Beberapa penelitian pada Tabel 1 menggambarkan perkembangan penelitian pemisahan CO₂/CH₄ menggunakan teknologi membran dalam rentang waktu 2010 hingga 2025, yang mencakup pendekatan eksperimental, tinjauan literatur, serta simulasi komputasi. Studi awal pada 2010–2015, seperti yang dilakukan oleh Scholes et al. (2010), Iarikov & Oyama (2011), dan Jeon & Lee (2015), didominasi oleh penelitian berbasis tinjauan literatur yang memfokuskan pada identifikasi dan klasifikasi jenis membran polimer, anorganik, serta *mixed matrix membranes* (MMMs).

Pada fase tersebut fokus riset diarahkan pada pemetaan lanskap teknologi, analisis paten, dan evaluasi performa material konvensional seperti poliimida, polisulfon, serta membran termal reaktif. Memasuki 2018, Xu et al. memperluas perspektif dengan meninjau penerapan membran tidak hanya untuk biogas, tetapi juga pemisahan CO₂ pasca-pembakaran dan pemrosesan gas alam, menandai pergeseran menuju pendekatan lintas-aplikasi.

Periode 2021–2025 menunjukkan dominasi penelitian eksperimental lanjutan dan pendekatan simulasi berpresisi tinggi, yang mengindikasikan pergeseran paradigma dari kajian konseptual menuju pengembangan material spesifik dengan optimasi kinerja. Zhang et al. (2021) dan Zakariya et al. (2022) berkontribusi melalui pengembangan membran polimer *facilitated transport* dan membran komposit berlapis dengan material pengisi berbasis *metal-organic frameworks* (MOFs), menghasilkan peningkatan signifikan dalam selektivitas dan permeabilitas pada kondisi *mixed gas*. Penelitian Taherizadeh et al. (2024) menitikberatkan pada pengaruh parameter sintesis dalam pembuatan membran zeolit SSZ-13 berperforma tinggi, sementara Jonnalagedda & Kuncharam (2023) mengeksplorasi integrasi ZIF-8 termodifikasi amina dalam matriks polimer untuk peningkatan kinerja pemisahan.

Pada 2025 Alvares & Semino mengadopsi pendekatan simulasi *coarse-grained* berbasis *MARTINI force fields*, yang memfasilitasi prediksi perilaku gas pada komposit MOF/polimer, menunjukkan bahwa metode komputasi kini menjadi komplementer penting bagi riset eksperimental dalam merancang membran generasi baru.

Jenis dan Material Membran yang Dikembangkan

Analisis ini mengelompokkan material membran yang banyak dilaporkan dalam literatur CO₂/CH₄ menjadi empat kelompok besar (1) membran polimerik (glassy & high-free-volume), (2) membran anorganik (zeolit/keramik/logam), (3) membran komposit/mixed-matrix membranes (MMMs), dan (4) inovasi material baru (grafena/graphene oxide, MOF, MXene, CMS). Untuk setiap kelompok saya membandingkan parameter kinerja yang dilaporkan terutama permeabilitas CO₂ (PCO₂) dan selektivitas CO₂/CH₄ serta stabilitas dan isu skala semua klaim diverifikasi terhadap publikasi primer dan review terpilih (Comesaña-Gándara, 2019).

Menurut Madzarevic et. al. (2022) menyatakan bahwa membran polimerik tradisional (polyimide, polysulfone, polyethersulfone) tetap dominan pada aplikasi industri awal karena kemudahan fabrikasi dan mekanika yang baik; PCO₂ yang dilaporkan untuk polyimide komersial umumnya berada dalam rentang puluhan Barrer (mis. ≈ 4 –120 Barrer pada banyak komersial/varian 6FDA), dengan CO₂/CH₄ selektivitas tipikal berkisar dari angka satuan hingga puluhan tergantung struktur polimer dan kondisi uji. Keterbatasan utama adalah trade-off permeabilitas–selektivitas serta plasticization oleh CO₂ pada tekanan tinggi.

Comesaña-Gándara et. al. (2019) menjelaskan polimer ber-free-volume tinggi seperti *Polymers of Intrinsic Microporosity* (PIMs) menunjukkan lonjakan PCO₂ yang dramatis dibanding polimer konvensional; contoh seri benzotriptycene-PIMs melaporkan PCO₂ methanol-treated hingga yaitu $\approx 21 \times 10^3$ – 53×10^3 Barrer, sekaligus menempatkan beberapa sampel di atas *Robeson upper bound* 2008 untuk CO₂/CH₄. Nilai tinggi ini sering bersifat sensitif terhadap perlakuan film dan ageing permeabilitas menurun pada waktu tetapi selektivitas dapat meningkat.

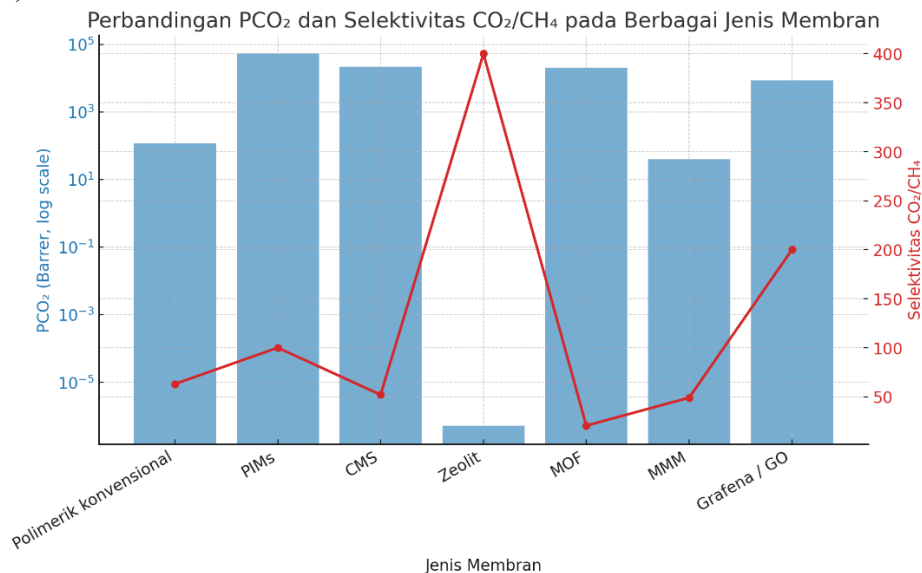
Carbon molecular sieve (hasil karbonisasi prekursor polimerik) menempati posisi khusus: beberapa CMS menunjukkan PCO₂ sangat tinggi (contoh: 14.7×10^3 – 21.7×10^3 Barrer dilaporkan untuk CMS dari polyimide tertentu) dengan selektivitas CO₂/CH₄ menengah-tinggi (~ 50 pada laporan tertentu) (Wang, et. al., 2021). CMS menawarkan kombinasi permeabilitas tinggi dan kemampuan ukuran-molekular (molecular sieving), tetapi proses fabrikasi (pirolisis terkontrol) dan isu kerapuhan mempengaruhi skalabilitas.

Dalam Peng et. al. (2024) disebutkan bahwa membran anorganik seperti zeolit CHA (SSZ-13) menunjukkan selektivitas eksperimental yang sangat tinggi untuk CO₂/CH₄ (laporan rentang ideal dan campuran: ≈ 56 –400 tergantung kondisi uji, suhu, tekanan, dan pengeboran/defek film), dengan permeans/flux yang bervariasi menurut ketebalan lapisan. Kekuatan anorganik adalah selektivitas molekular yang unggul dan ketahanan termal; kelemahannya adalah biaya fabrikasi, rapuh secara mekanis, dan tantangan untuk produksi area besar.

Metal-organic frameworks (MOF) baik sebagai lapisan murni maupun sebagai filler menunjukkan performa yang mengesankan: contoh membran MOF/glass melaporkan PCO₂ $\approx 20,324$ Barrer dengan selektivitas CO₂/CH₄ ≈ 20.5 pada kondisi tertentu; blending MOF dengan polimer high-

free-volume (mis. PIM-1 + Cu-CAT-1) dilaporkan menaikkan PCO_2 menjadi beberapa ribu Barrer (mis. $\text{PCO}_2 \approx 8,339$ Barrer pada komposit tertentu) meskipun selektivitas relatif moderat. MOF unggul dalam penyesuaian pori dan fungsionalisasi permukaan, tetapi integrasi mekanik dan kebocoran antar-fase (interfacial defects) sering menurunkan performa pada uji campuran gas (Liu, et. al., 2025).

Menurut Li et. al. (2021) mixed-matrix membranes (polimer + filler seperti ZIF-8, $\text{NH}_2\text{-MIL-125}$, MOF lainnya) menawarkan pendekatan praktis untuk memecahkan trade-off Robeson; publikasi menunjukkan hasil yang sangat bervariasi: contoh ZIF-8/MMM melaporkan PCO_2 di kisaran puluhan Barrer (≈ 40 Barrer pada beberapa konfigurasi) dengan CO_2/CH_4 selektivitas 10–30, sementara kombinasi PIM+MOF dapat menaikkan permeabilitas secara dramatis pada kasus tertentu. Variasi besar ini mencerminkan faktor kritis: loading filler, dispersibilitas, compatibilizer, dan uji gas (murni vs campuran).



Gambar 1. Perbandingan PCO_2 dan Selektivitas CO_2/CH_4 pada Berbagai Jenis Membran

Sumber: Madzarevic et. al. (2022); Carrascal-Hernández et. al. (2025); Wang et. al. (2021); Peng et. al. (2024); Liu et. al. (2025)

Gambar 1 di atas menampilkan perbandingan kinerja berbagai jenis membran dalam pemisahan gas CO_2 dari CH_4 , dengan parameter utama berupa permeabilitas CO_2 (PCO_2) dan selektivitas CO_2/CH_4 . Permeabilitas CO_2 , yang disajikan dalam skala logaritmik melalui batang berwarna biru, menunjukkan rentang nilai yang bervariasi signifikan, mencerminkan perbedaan sifat intrinsik material dan desain struktural membran.

Membran berbasis material inovatif seperti metal–organic frameworks (MOF) atau zeolit sintetis (misalnya SSZ-13) cenderung menunjukkan nilai PCO_2 yang tinggi akibat adanya porositas terkontrol dan ukuran pori yang sesuai dengan diameter molekul CO_2 . Sementara itu, membran polimer konvensional umumnya menampilkan PCO_2 yang lebih rendah, tetapi dapat mencapai selektivitas yang cukup tinggi melalui optimasi interaksi kimia antara matriks polimer dan molekul CO_2 .

Selektivitas CO_2/CH_4 , yang divisualisasikan melalui garis merah, memperlihatkan tren bahwa peningkatan permeabilitas tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan selektivitas. Beberapa membran dengan PCO_2 tinggi menunjukkan selektivitas moderat akibat efek *trade-off* yang dikenal dalam fenomena transport membran, di mana peningkatan fluks sering diikuti oleh penurunan kemampuan diskriminasi molekul.

Membran komposit atau *mixed matrix membrane* (MMM) yang menggabungkan polimer dengan pengisi anorganik terpilih mampu mempertahankan keseimbangan antara PCO_2 dan selektivitas melalui sinergi sifat mekanis polimer dan sifat adsorptif atau penyaring molekuler dari pengisi. Temuan ini mengindikasikan bahwa pengembangan membran masa depan perlu berfokus pada rekayasa material yang dapat mengatasi batasan *Robeson upper bound*, sehingga menghasilkan kombinasi kinerja tinggi pada kedua parameter secara simultan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil tinjauan literatur sistematis yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa perkembangan teknologi membran untuk pemisahan CO₂/CH₄ dalam rentang 2010–2025 menunjukkan kemajuan signifikan baik dari segi material maupun pendekatan desain. Tren publikasi yang terus meningkat pasca-2015 mengindikasikan peningkatan perhatian global terhadap teknologi ini, didorong oleh tuntutan pengurangan emisi karbon dan kebutuhan akan solusi pemurnian gas yang efisien. Inovasi material mulai dari polimer konvensional, polimer ber-*free volume* tinggi (PIMs), membran *carbon molecular sieve* (CMS), membran anorganik berbasis zeolit, hingga *metal–organic frameworks* (MOFs) dan material 2D telah memperluas batas kinerja yang selama ini dibatasi oleh *Robeson upper bound*. Meskipun demikian, setiap kategori material memiliki keunggulan dan keterbatasan spesifik, yang memerlukan strategi optimasi dan integrasi teknologi agar layak untuk skala industri.

Pendekatan riset juga mengalami pergeseran dari uji gas murni ke pengujian *mixed gas* dan kondisi operasi nyata, disertai peningkatan penggunaan simulasi komputasi untuk mempercepat desain membran generasi baru. Sebagian besar inovasi masih berada pada tingkat kesiapan teknologi (TRL) rendah hingga menengah, sehingga tantangan seperti stabilitas jangka panjang, resistensi terhadap *plasticization*, biaya produksi, dan kemampuan *scale-up* tetap menjadi fokus utama.

DAFTAR PUSTAKA

- Adisasmito, S., Dharmastuti, S. A., Syauqi, A., Ashshiddiq, J. A., & Santoso, L. L. (2023). *Transisi Energi dan Pengurangan Emisi Gas Karbon Dioksida*. Surabaya: Pustaka Saga Jawadwipa.
- Ahmad, M., & Nasution, D. P. (2018). Analisis Kualitatif Kemampuan Komunikasi Matematis Siswa Yang Diberi Pembelajaran Matematika Realistik. *Jurnal Gantang*, 3(2), 83-95.
- Alvares, C., & Semino, R. (2025). MARTINI-based force fields for predicting gas separation performances of MOF/polymer composites. *arXiv preprint arXiv:2508.04672*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.04672>.
- Caralin, I. S. (2020). Peningkatan Selektivitas Membran Polisulfon-Karbon Tertemplat Zeolit dengan Pelapisan TMOS untuk Pemisahan CO₂/CH₄ dan H₂/CH₄. *Skripsi*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Carrascal-Hernández, D. C., Grande-Tovar, C. D., Mendez-Lopez, M., Insuasty, D., García-Freites, S., Sanjuan, M., & Márquez, E. (2025). CO₂ Capture: A Comprehensive Review And Bibliometric Analysis Of Scalable Materials And Sustainable Solutions. *Molecules*, 30(3), 563. <https://doi.org/10.3390/molecules30030563>.
- ChandraAsri. (2025). “Net Zero Emissions: Solusi Global untuk Lestarian Bumi”, tersedia di <https://chandra-asri.com/id/blog/net-zero-emissions-adalah>, diakses pada 12 Agustus 2025.
- Comesaña-Gándara, B., Chen, J., Bezzu, C. G., Carta, M., Rose, I., Ferrari, M. C., ... & McKeown, N. B. (2019). Redefining the Robeson upper bounds for CO₂/CH₄ and CO₂/N₂ separations using a series of ultrapermeable benzotriptycene-based polymers of intrinsic microporosity. *Energy & Environmental Science*, 12(9), 2733-2740.
- Elma, Muthia. (2023). *Fundamental dan Aplikasi Membran Hollow Fiber untuk Pengolahan Air*. Banjarmasin: Lambung Mangkurat University Press.
- Iarikov, D. D., & Oyama, S. T. (2011). Review of CO₂/CH₄ Separation Membranes. *Membrane science and technology* (Vol. 14, pp. 91-115). Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-53728-7.00005-7>.
- Iarikov, D. D., & Oyama, S. T. (2011). Review of CO₂/CH₄ separation membranes. In *Membrane science and technology* (Vol. 14, pp. 91-115). Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-53728-7.00005-7>.
- IEA. (2018). “An Introduction to Biogas and Biomethane”, tersedia di <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth/an-introduction-to-biogas-and-biomethane>, diakses pada 12 Agustus 2025.
- Jeon, Y. W., & Lee, D. H. (2015). Gas membranes for CO₂/CH₄ (biogas) separation: A review. *Environmental Engineering Science*, 32(2), 71-85. <http://dx.doi.org/10.1089/ees.2014.0413>.
- Jonnalagedda, A., & Kuncharam, B. V. R. (2023). Investigation of ZIF-8, amine-modified ZIF-8 and polysulfone based mixed matrix membranes for CO₂/CH₄ separation. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(45), e54650. <https://doi.org/10.1002/app.54650>.

- Kentish, S. E., Scholes, C. A., & Stevens, G. W. (2008). Carbon dioxide separation through polymeric membrane systems for flue gas applications. *Recent Patents on Chemical Engineering*, 1(1), 52-66. <http://dx.doi.org/10.2174/1874478810801010052>.
- Khamaludin, et. al., (2022). *Green Technology*. Padang: Get Press Indonesia.
- Li, S., Liu, Y., Wong, D. A., & Yang, J. (2021). Recent advances in polymer-inorganic mixed matrix membranes for CO₂ separation. *Polymers*, 13(15), 2539. doi: 10.3390/polym13152539.
- Liu, X., Ao, D., Ye, M., Wang, Z., Qiao, Z., & Zhao, S. (2025). Efficient CO₂/CH₄ separation achieved by metal-organic framework crystal-glass composite membranes. *AIChE Journal*, <https://doi.org/10.1002/aic.18883>.
- Madzarevic, Z. P., Seoane, B., Gascon, J., Hegde, M., & Dingemans, T. J. (2022). Non-linear high T_g polyimide-based membranes for separating CO₂/CH₄ gas mixtures. *Polymer*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.125520>.
- Naseer, M. N., Zaidi, A. A., Dutta, K., Wahab, Y. A., Jaafar, J., Nusrat, R., ... & Kim, B. (2022). Past, Present And Future Of Materials' Applications For CO₂ Capture: A Bibliometric Analysis. *Energy Reports*, 8, 4252-4264. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.301>.
- Nemestóthy, N., Bakonyi, P., Lajtai-Szabó, P., & Bélafi-Bakó, K. (2020). The Impact Of Various Natural Gas Contaminant Exposures On CO₂/CH₄ Separation By A Polyimide Membrane. *Membranes*, 10(11), 324. <https://doi.org/10.3390/membranes10110324>.
- Nilamsari, D. N. (2024). *Fabrikasi Membran Serat Berongga P84/PCs untuk Pemisahan Gas CO₂/CH₄* (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).
- Pakdel, S., Erfan-Niya, H., & Azamat, J. (2022). CO₂/CH₄ mixed-gas separation through carbon nitride membrane: a molecular dynamics simulation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 650, 129643. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129643>.
- Peng, X., Chen, L., You, L., Jin, Y., Zhang, C., Ren, S., ... & Gu, X. (2024). Improved Synthesis of Hollow Fiber SSZ-13 Zeolite Membranes for High-Pressure CO₂/CH₄ Separation. *Angewandte Chemie International Edition*, 63(31), <https://doi.org/10.1002/anie.202405969>.
- Risnayanti, R. (2023). Pemanfaatan Hidroksiapatit Tulang Sapi Sebagai Biomaterial Tumpatan Komposit= Utilization of Ox Bone Hydroxyapatite as Composite Filling Biomaterial. *Tesis*, Universitas Hasanuddin.
- Sholeha, N. A., Edi Wiraguna, S. P., Farobie, E. O., Melbi Mahardika, S. T., Jannah, D. M., Si, S. T., ... & Atmaja, R. N (2024). *Nanoteknologi Dalam Perspektif Pertanian Berkelanjutan: Inovasi Terkini Untuk Pertumbuhan Dan Proteksi Tanaman*. Indramayu: Adab Indonesia.
- Taherizadeh, A., Simon, A., Richter, H., Stelter, M., & Voigt, I. (2024). A Study of the Influence of Synthesis Parameters on the Preparation of High Performance SSZ-13 Membranes. *Applied Sciences*, 14(17), 7836. <https://doi.org/10.3390/app14177836>.
- Triandini, E., Jayanatha, S., Indrawan, A., Putra, G. W., & Iswara, B. (2019). Metode systematic literature review untuk identifikasi platform dan metode pengembangan sistem informasi di Indonesia. *Indonesian Journal of Information Systems*, 1(2), 63-77.
- Wang, Q., Huang, F., Cornelius, C. J., & Fan, Y. (2021). Carbon molecular sieve membranes derived from crosslinkable polyimides for CO₂/CH₄ and C₂H₄/C₂H₆ separations. *Journal of Membrane Science*, 621, <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118785>.
- Xing, Y., Ma, Z., Su, W., Wang, Q., Wang, X., & Zhang, H. (2020). Analysis Of Research Status Of CO₂ Conversion Technology Based On Bibliometrics. *Catalysts*, 10(4), 370. <https://doi.org/10.3390/catal10040370>.
- Xu, J., Wu, H., Wang, Z., Qiao, Z., Zhao, S., & Wang, J. (2018). Recent advances on the membrane processes for CO₂ separation. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 26(11), 2280-2291. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.08.020>.
- Zakariya, S., Yeong, Y. F., Jusoh, N., & Tan, L. S. (2022). Performance of Multilayer Composite Hollow Membrane in Separation of CO₂ From CH₄ in Mixed Gas Conditions. *Polymers*, 14(7), 1480. <https://doi.org/10.3390/polym14071480>.
- Zhang, C., Sheng, M., Hu, Y., Yuan, Y., Kang, Y., Sun, X., ... & Wang, Z. (2021). Efficient facilitated transport polymer membrane for CO₂/CH₄ separation from oilfield associated gas. *Membranes*, 11(2), 118. <https://doi.org/10.3390/membranes11020118>.