

## **ANALISIS TREN DAN RESEARCH GAP TEKNOLOGI CARBON CAPTURE: SYSTEMATIC REVIEW BERBASIS PRISMA DAN ANALISIS BIBLIOMETRIK**

<sup>1</sup>Syamsurizal\*

<sup>1</sup>Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta

\*Penulis korespondensi: syamsurizalmulyadin@gmail.com

**Abstrak.** Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi tren penelitian dan research gap dalam pengembangan teknologi carbon capture melalui pendekatan Systematic Literature Review (SLR) yang terintegrasi dengan analisis bibliometrik dan co-occurrence keyword. Proses seleksi literatur mengacu pada pedoman PRISMA 2020 dengan sumber data dari database ScienceDirect. Sebanyak 45 artikel yang memenuhi kriteria inklusi dianalisis menggunakan distribusi frekuensi, sintesis tematik, serta pemetaan jaringan kata kunci menggunakan VOSviewer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kajian carbon capture masih didominasi oleh pendekatan berbasis material dan pemodelan yang berfokus pada peningkatan adsorption capacity dan akurasi model. Sementara itu, pendekatan Techno-Economic Assessment (TEA) dan Life Cycle Assessment (LCA) masih terbatas dan belum terintegrasi secara komprehensif. Analisis co-occurrence mengungkap bahwa topik penelitian cenderung terfragmentasi, dengan kluster utama pada aspek teknis, sedangkan aspek ekonomi dan lingkungan berada pada kluster yang relatif terpisah. Selain itu, kategori CO<sub>2</sub> utilization menunjukkan kecenderungan integrasi dengan sistem energi dan produksi bahan kimia, sedangkan teknologi Direct Air Capture (DAC) masih terbatas akibat tingginya kebutuhan energi dan biaya. Penelitian ini berkontribusi dalam memberikan pemetaan tren penelitian yang komprehensif serta mengidentifikasi kesenjangan metodologis, khususnya terkait kurangnya integrasi antara aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan studi lanjutan yang lebih holistik dan mendukung implementasi teknologi carbon capture pada skala industri.

**Kata kunci:** carbon capture, SLR, bibliometrik, TEA, LCA, co-occurrence, research gap

**Abstract.** This study aims to identify research trends and gaps in carbon capture technology through a Systematic Literature Review (SLR) integrated with bibliometric and keyword co-occurrence analyses. The literature selection process follows the PRISMA 2020 guidelines, using data retrieved from ScienceDirect. A total of 45 eligible articles were analyzed using frequency distribution, thematic synthesis, and keyword network mapping with VOSviewer. The results indicate that carbon capture research is predominantly dominated by material-based and AI/modeling approaches focusing on adsorption capacity and model accuracy. In contrast, Techno-Economic Assessment (TEA) and Life Cycle Assessment (LCA) approaches remain limited and are generally not well integrated. The co-occurrence analysis reveals that research topics are still fragmented, with strong clustering in technical aspects, while economic and environmental aspects appear relatively disconnected. Furthermore, CO<sub>2</sub> utilization studies show a growing trend toward integration with energy systems and chemical production, whereas Direct Air Capture (DAC) research remains limited due to high energy demand and cost constraints. This study contributes by providing a comprehensive mapping of research trends and identifying key methodological gaps, particularly the lack of integration among technical, economic, and environmental aspects. The findings are expected to support the development of more holistic and integrative research frameworks for the large-scale implementation of carbon capture technologies.

**Keywords:** carbon capture, systematic literature review, bibliometric analysis, TEA, LCA, co-occurrence, research gap

## 1. Pendahuluan

Perubahan iklim global dan peningkatan konsentrasi CO<sub>2</sub> atmosfer mendorong percepatan pengembangan teknologi *carbon capture* sebagai bagian dari strategi dekarbonisasi sistem energi dan industri. Teknologi *carbon capture and storage (CCS)* serta *carbon capture, utilization, and storage (CCUS)* dipandang sebagai solusi transisi menuju target *net-zero emission*, khususnya pada sektor energi intensif karbon dan industri berat.

Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian *carbon capture* menunjukkan peningkatan signifikan, terutama pada pengembangan material adsorben dan sistem berbasis adsorpsi. Studi eksperimental mengenai karbon berpori termodifikasi, zeolit, serta komposit berbasis biomassa menunjukkan peningkatan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> dan stabilitas siklus (Kumar, Santhi dan Sangwai, 2025; Cho dkk., 2026; He dkk., 2026; Zhai dkk., 2026). Selain itu, pendekatan berbasis *direct air capture (DAC)* mulai berkembang sebagai alternatif penangkapan CO<sub>2</sub> langsung dari atmosfer (Nikkhah dkk., 2026).

Seiring dengan pengembangan material, integrasi kecerdasan buatan (AI) dan *machine learning* dalam pemodelan proses *carbon capture* semakin meningkat. Pendekatan *artificial neural network* dan *AI-driven modelling* digunakan untuk memprediksi kapasitas adsorpsi dan performa proses dengan tingkat akurasi yang tinggi (Ahmadi dan Keppo, 2026; Maleki dkk., 2026; Shao dkk., 2026; Si dkk., 2026). Tren ini menunjukkan pergeseran dari studi eksperimental murni menuju integrasi digitalisasi proses.

Di sisi lain, evaluasi kelayakan implementasi teknologi *carbon capture* tidak hanya ditentukan oleh performa teknis, tetapi juga oleh aspek ekonomi dan lingkungan. Pendekatan *techno-economic assessment (TEA)* digunakan untuk menilai CAPEX, OPEX, serta biaya penangkapan per ton CO<sub>2</sub> (Hussain dkk., 2026; Min dkk., 2026; Rasheed dan Materazzi, 2026; Soroodan dkk., 2026). Beberapa studi bahkan mengintegrasikan optimasi multi-objektif dalam sistem energi rendah karbon untuk meminimalkan biaya sekaligus emisi (Kumcu dkk., 2026; Li dkk., 2026; Wang dkk., 2026).

Sementara itu, pendekatan *life cycle assessment (LCA)* mulai digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari sistem *carbon capture* secara menyeluruh, termasuk *global warming potential (GWP)* dan dampak lingkungan lainnya (Zhou dkk., 2025; Shin dkk., 2026; Sun dkk., 2026; Zhao dkk., 2026). Namun, perbedaan batas sistem (*system boundary*), unit fungsional, serta asumsi harga karbon antar studi menyebabkan hasil yang sulit dibandingkan secara langsung.

Selain aspek teknis dan ekonomi, dimensi kebijakan dan skema pembiayaan juga memengaruhi adopsi teknologi *carbon capture* (Gulden dan Harvey, 2025). Studi pada sektor industri seperti semen, maritim, dan energi terintegrasi menunjukkan bahwa keberhasilan implementasi sangat bergantung pada harmonisasi kebijakan, harga karbon, dan kesiapan teknologi (Adami, Rocchi dan Figari, 2025; Ahmadi dan Keppo, 2026; Sopha dkk., 2026).

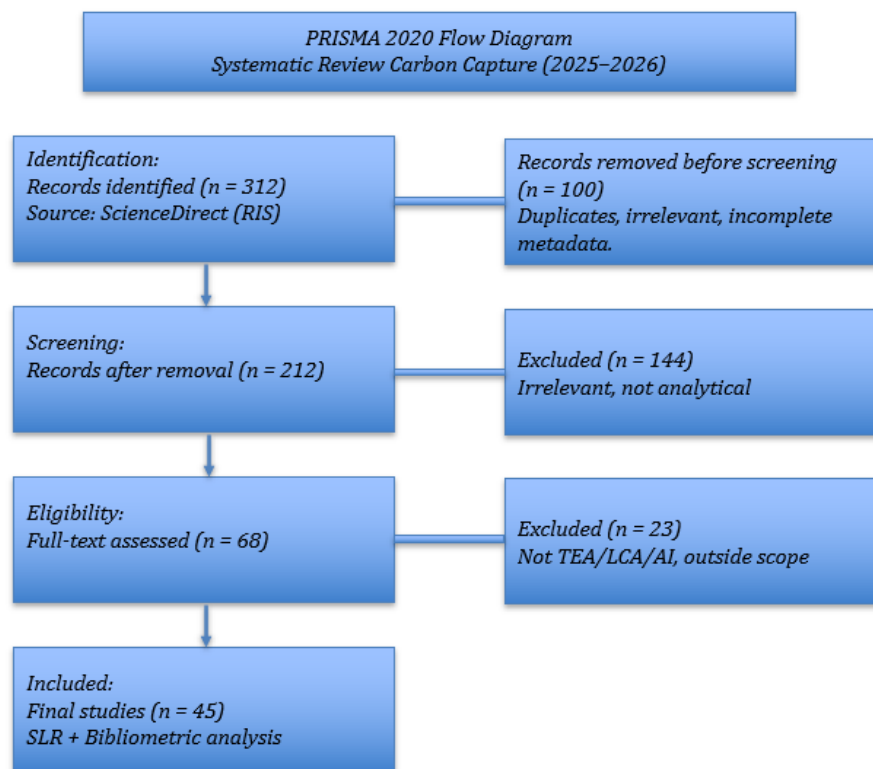
Meskipun penelitian berkembang pesat, sebagian besar studi masih terfragmentasi. Studi berbasis material sering kali tidak disertai evaluasi ekonomi dan lingkungan secara sistemik (Li dkk., 2025; Mariaca dkk., 2026; Thenuwara dkk., 2026). Sebaliknya, studi TEA atau LCA umumnya tidak mengintegrasikan analisis performa material secara detail (Zhou dkk., 2025; Min dkk., 2026). Di sisi lain, kajian *review* dan

sintesis konseptual menunjukkan pentingnya integrasi multi-aspek dalam pengembangan CCUS generasi berikutnya (Duan dkk., 2026; Kan dkk., 2026; Mazhar dkk., 2026).

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan kajian sistematis yang tidak hanya memetakan tren penelitian, tetapi juga mengidentifikasi kesenjangan metodologis dalam integrasi *techno-economic assessment* dan *life cycle assessment* pada teknologi *carbon capture*. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perkembangan publikasi, pendekatan metodologis dominan, variabel yang dianalisis, serta *research gap* dalam literatur *carbon capture* periode 2025–2026 melalui pendekatan *systematic literature review* dan analisis bibliometrik.

## 2. Metodologi Penelitian

Penelitian ini menerapkan pendekatan *Systematic Literature Review (SLR)* yang terintegrasi dengan analisis bibliometrik untuk mengkaji tren serta mengidentifikasi *research gap* dalam pengembangan teknologi *carbon capture*, dengan fokus pada aspek tekno-ekonomi dan lingkungan. Pendekatan ini dipilih karena mampu menghasilkan sintesis literatur yang komprehensif melalui proses penelaahan sistematis, sekaligus menyediakan pemetaan kuantitatif terhadap perkembangan penelitian, pola publikasi, dan hubungan antar topik secara lebih terstruktur. Proses kajian literatur dilakukan dengan mengacu pada pedoman PRISMA 2020 guna memastikan bahwa tahapan identifikasi, seleksi, dan evaluasi artikel berlangsung secara sistematis, transparan, dan dapat direplikasi, sehingga meningkatkan validitas dan reliabilitas hasil penelitian.



**Gambar 1.** Diagram alir PRISMA 2020

Data literatur dalam penelitian ini diambil dari *database ScienceDirect* dengan proses pengambilan data dilakukan pada tanggal 12 Januari 2026 untuk memastikan

konsistensi dan keterulangan hasil pencarian. Data diperoleh dari file referensi berekstensi RIS yang diekspor dari database *ScienceDirect*. Pemilihan *database* ini didasarkan pada pertimbangan kualitas dan relevansi, mengingat *ScienceDirect* merupakan salah satu basis data ilmiah utama yang menyediakan akses ke jurnal-jurnal bereputasi tinggi di bidang teknik, energi, dan lingkungan, yang menjadi domain utama penelitian teknologi *carbon capture*. Selain itu, database ini dikelola oleh penerbit internasional Elsevier yang dikenal memiliki standar *peer-review* yang ketat serta cakupan publikasi yang luas dan terindeks dalam basis data global seperti Scopus. Keunggulan lain dari *ScienceDirect* adalah kelengkapan metadata (seperti DOI, kata kunci, dan afiliasi penulis) serta konsistensi format ekspor (RIS) yang mendukung proses analisis bibliometrik secara akurat dan efisien. Strategi pencarian awal menggunakan kombinasi kata kunci "*carbon capture*", "*CCS/CCUS*", "*techno-economic analysis*", "*life cycle assessment*", "*optimization*", serta "*artificial intelligence/ma-2026*", relevan dengan *carbon capture*, serta memuat analisis teknis, ekonomi, lingkungan, atau optimasi sistem dengan metadata lengkap. Artikel yang tidak relevan atau bersifat duplikat dikeluarkan dari analisis.

Proses seleksi dilakukan melalui tahap identifikasi, penyaringan berdasarkan judul dan kata kunci, evaluasi kelayakan berdasarkan pendekatan metodologis, dan inklusi akhir. Berdasarkan proses tersebut, diperoleh 45 artikel yang memenuhi kriteria dan dianalisis lebih lanjut.

Data diekstraksi menggunakan matriks sintesis yang mencakup penulis dan tahun, jenis teknologi, pendekatan metodologis, variabel kunci yang dianalisis, *research gap* teridentifikasi, serta jurnal publikasi. Klasifikasi pendekatan (material/proses, TEA, LCA, optimasi, AI, atau review) dilakukan melalui analisis konten judul dan verifikasi abstrak.

Analisis bibliometrik dilakukan untuk memetakan distribusi artikel berdasarkan tahun, jenis teknologi, pendekatan metodologis, variabel yang dianalisis, *research gap*, dan jurnal publikasi. Selanjutnya, analisis sintesis deskriptif-komparatif digunakan untuk mengidentifikasi dominasi pendekatan, tingkat integrasi antara aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan, serta kesenjangan metodologis dalam literatur. Validitas data dijaga melalui verifikasi metadata dan DOI masing-masing artikel. Pendekatan kombinasi SLR dan bibliometrik ini memberikan gambaran terstruktur mengenai arah penelitian *carbon capture* serta peluang pengembangan studi integratif di masa mendatang.

**Tabel 1.** Pemetaan Literatur Penilaian Tekno-Ekonomi dan Lingkungan Teknologi *Carbon Capture* serta *Research Gap* Teridentifikasi (2025–2026)

Penulis	Tahun	Jenis Teknologi	Pendekatan Metodologis	Variabel Kunci yang Dianalisis	Research Gap Teridentifikasi	Jurnal Publikasi
<b>Cho dkk.</b>	2026	General Capture / Adsorption	AI / Modeling	Adsorption Capacity, Model Accuracy	Needs Real-Scale Validation & TEA/LCA Integration	Separation and Purification Technology
<b>Mazhar dkk.</b>	2026	CCS / CCUS	AI / Modeling	Adsorption Capacity	Needs Real-Scale Validation & TEA/LCA Integration	RSC Advances
<b>Min dkk.</b>	2026	CO <sub>2</sub> Utilization	Techno-Economic Assessment (TEA)	CAPEX/OPEX, Multi-objective Optimization, Adsorption Capacity	Limited Integration with Other Assessment Methods	Energy
<b>Gulden dkk.</b>	2025	General Capture / Adsorption	Material / Process Study	Adsorption Capacity	Lacks System-Level Economic & Environmental Evaluation	Environmental Science & Policy
<b>Nikkhah dkk.</b>	2026	Direct Air Capture (DAC)	AI / Modeling	Adsorption Capacity, Model Accuracy	Needs Real-Scale Validation & TEA/LCA Integration	Fuel
<b>Niron dkk.</b>	2025	General Capture / Adsorption	Material / Process Study	Adsorption Capacity	Lacks System-Level Economic & Environmental Evaluation	Chemical Engineering Journal Advances
<b>Sun dkk.</b>	2026	General Capture / Adsorption	Life Cycle Assessment (LCA)	GWP / LCA Indicators, Adsorption Capacity	Limited Integration with Other Assessment Methods	Construction and Building Materials
<b>Si dkk.</b>	2026	General Capture / Adsorption	AI / Modeling	Adsorption Capacity, Model Accuracy	Needs Real-Scale Validation & TEA/LCA Integration	Gas Science and Engineering
<b>He dkk.</b>	2026	General Capture / Adsorption	Material / Process Study	Adsorption Capacity	Lacks System-Level Economic & Environmental Evaluation	International Communications in Heat and Mass Transfer
<b>Won dkk.</b>	2025	General	Material /	Adsorption Capacity	Lacks System-Level Economic	Journal of CO <sub>2</sub> Utilization

		Capture / Adsorption	Process Study		& Environmental Evaluation	
<b>Shin dkk.</b>	2026	General Capture / Adsorption	Techno-Economic Assessment (TEA)	CAPEX/OPEX, GWP / LCA Indicators, Adsorption Capacity	Limited Integration with Other Assessment Methods	Carbon Capture Science & Technology
<b>Zhou dkk.</b>	2025	Post-Combustion Capture	Life Cycle Assessment (LCA)	GWP / LCA Indicators, Adsorption Capacity	Limited Integration with Other Assessment Methods	Energy
<b>Li dkk.</b>	2026	General Capture / Adsorption	System Optimization	Multi-objective Optimization, Adsorption Capacity, Model Accuracy	Assumption Sensitivity Not Standardized	Journal of Energy Storage
<b>Kumar dkk.</b>	2025	Post-Combustion Capture	Material / Process Study	Adsorption Capacity	Lacks System-Level Economic & Environmental Evaluation	Chemical Engineering Journal
<b>Gu dkk.</b>	2025	General Capture / Adsorption	AI / Modeling	Adsorption Capacity, Model Accuracy	Needs Real-Scale Validation & TEA/LCA Integration	Chemical Engineering Journal
<b>Thenuwara dkk.</b>	2026	General Capture / Adsorption	Material / Process Study	Adsorption Capacity	Lacks System-Level Economic & Environmental Evaluation	Chemical Engineering Journal
<b>Ahmadi dkk.</b>	2026	General Capture / Adsorption	AI / Modeling	Adsorption Capacity, Model Accuracy	Needs Real-Scale Validation & TEA/LCA Integration	Energy Conversion and Management
<b>Shao dkk.</b>	2026	General Capture / Adsorption	AI / Modeling	Adsorption Capacity, Model Accuracy	Needs Real-Scale Validation & TEA/LCA Integration	Journal of Cleaner Production
<b>Sopha dkk.</b>	2026	General Capture / Adsorption	Material / Process Study	Adsorption Capacity	Lacks System-Level Economic & Environmental Evaluation	Cleaner Energy Systems
<b>Sahu dkk.</b>	2026	CO <sub>2</sub> Utilization	AI / Modeling	Adsorption Capacity, Model Accuracy	Needs Real-Scale Validation & TEA/LCA Integration	Journal of Environmental Management
<b>Adami dkk.</b>	2025	General Capture /	Material / Process Study	Adsorption Capacity	Lacks System-Level Economic & Environmental Evaluation	Applied Ocean Research

Adsorption						
<b>Chang dkk.</b>	2026	General Capture / Adsorption	Material / Process Study	Adsorption Capacity	Lacks System-Level Economic & Environmental Evaluation	Alexandria Engineering Journal
<b>Ma dkk.</b>	2025	General Capture / Adsorption	AI / Modeling	Adsorption Capacity, Model Accuracy	Needs Real-Scale Validation & TEA/LCA Integration	Construction and Building Materials
<b>Patel dkk.</b>	2026	General Capture / Adsorption	System Optimization	Multi-objective Optimization, Adsorption Capacity	Assumption Sensitivity Not Standardized	Journal of Cleaner Production
<b>Huang dkk.</b>	2026	General Capture / Adsorption	AI / Modeling	Adsorption Capacity, Model Accuracy	Needs Real-Scale Validation & TEA/LCA Integration	Chemical Engineering Science
<b>Rasheed dkk.</b>	2026	General Capture / Adsorption	Techno-Economic Assessment (TEA)	CAPEX/OPEX, Adsorption Capacity	Limited Integration with Other Assessment Methods	Fuel Processing Technology
<b>Raheem dkk.</b>	2026	CCS / CCUS	AI / Modeling	Adsorption Capacity, Model Accuracy	Needs Real-Scale Validation & TEA/LCA Integration	Carbon Capture Science & Technology
<b>Soroodan dkk.</b>	2026	General Capture / Adsorption	Techno-Economic Assessment (TEA)	CAPEX/OPEX, Adsorption Capacity	Limited Integration with Other Assessment Methods	International Journal of Greenhouse Gas Control
<b>Mariaca dkk.</b>	2026	General Capture / Adsorption	Material / Process Study	Adsorption Capacity	Lacks System-Level Economic & Environmental Evaluation	Energy Conversion and Management: X
<b>Zhai dkk.</b>	2026	General Capture / Adsorption	Material / Process Study	Adsorption Capacity	Lacks System-Level Economic & Environmental Evaluation	Carbohydrate Polymers

<b>Lu dkk.</b>	2026	General Capture / Adsorption	Techno-Economic Assessment (TEA)	CAPEX/OPEX, Multi-objective Optimization, Adsorption Capacity	Limited Integration with Other Assessment Methods	Journal of CO <sub>2</sub> Utilization
<b>Wu dkk.</b>	2026	CO <sub>2</sub> Utilization	Material / Process Study	Adsorption Capacity	Lacks System-Level Economic & Environmental Evaluation	Cell Reports Physical Science
<b>Singh dkk.</b>	2026	General Capture / Adsorption	Techno-Economic Assessment (TEA)	CAPEX/OPEX, Adsorption Capacity, Model Accuracy	Limited Integration with Other Assessment Methods	Energy Conversion and Management
<b>Zamfirescu dkk.</b>	2026	General Capture / Adsorption	Material / Process Study	Adsorption Capacity	Lacks System-Level Economic & Environmental Evaluation	Fuel
<b>Zhao dkk.</b>	2026	General Capture / Adsorption	Techno-Economic Assessment (TEA)	CAPEX/OPEX, GWP / LCA Indicators, Adsorption Capacity	Limited Integration with Other Assessment Methods	Journal of Cleaner Production
<b>Kumar dkk.</b>	2025	General Capture / Adsorption	Material / Process Study	Adsorption Capacity	Lacks System-Level Economic & Environmental Evaluation	Chemical Engineering and Processing - Process Intensification
<b>Li dkk.</b>	2025	General Capture / Adsorption	Material / Process Study	Adsorption Capacity	Lacks System-Level Economic & Environmental Evaluation	Bioresource Technology
<b>ZOU dkk.</b>	2025	CO <sub>2</sub> Utilization	Material / Process Study	Adsorption Capacity	Lacks System-Level Economic & Environmental Evaluation	Petroleum Exploration and Development
<b>Wang dkk.</b>	2026	General Capture / Adsorption	System Optimization	Multi-objective Optimization, Adsorption Capacity	Assumption Sensitivity Not Standardized	Energy Reports
<b>Kumcu dkk.</b>	2026	CO <sub>2</sub> Utilization	System Optimization	Multi-objective Optimization, Adsorption Capacity, Model Accuracy	Assumption Sensitivity Not Standardized	International Journal of Greenhouse Gas Control
<b>Duan dkk.</b>	2026	General Capture /	Review Study	Adsorption Capacity	General Research Expansion Needed	Fuel

Adsorption						
<b>Kan dkk.</b>	2026	CO <sub>2</sub> Utilization	Review Study	Adsorption Capacity	General Research Expansion Needed	Marine Pollution Bulletin
<b>Shuhaili dkk.</b>	2025	General Capture / Adsorption	AI / Modeling	Adsorption Capacity, Model Accuracy	Needs Real-Scale Validation & TEA/LCA Integration	Journal of Environmental Chemical Engineering
<b>Maleki dkk.</b>	2026	General Capture / Adsorption	AI / Modeling	Adsorption Capacity, Model Accuracy	Needs Real-Scale Validation & TEA/LCA Integration	Journal of CO <sub>2</sub> Utilization
<b>Hussain dkk.</b>	2026	CO <sub>2</sub> Utilization	Techno-Economic Assessment (TEA)	CAPEX/OPEX, Adsorption Capacity	Limited Integration with Other Assessment Methods	International Journal of Hydrogen Energy

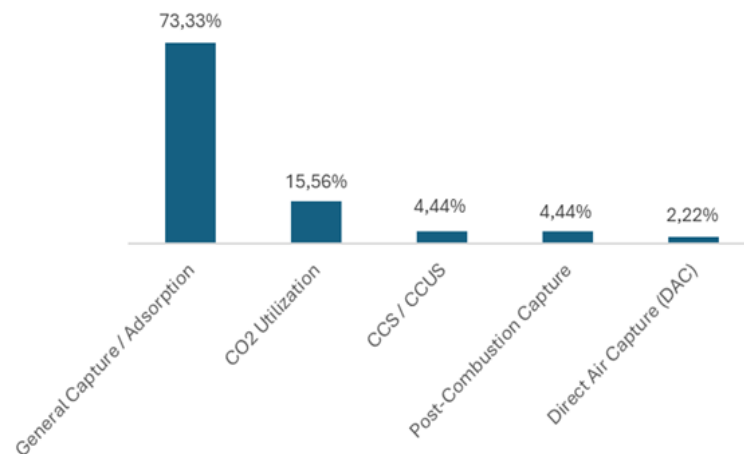
### 3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan hasil *Systematic Literature Review (SLR)*, diperoleh 45 artikel yang dianalisis untuk mengidentifikasi tren, integrasi metodologis, dan *research gap* dalam teknologi *carbon capture*. Hasil menunjukkan dominasi pendekatan berbasis material dan AI/modelling yang berfokus pada peningkatan *adsorption capacity* dan akurasi model (Cho dkk., 2026; Mazhar dkk., 2026; Shao dkk., 2026). Sebaliknya, pendekatan *Techno-Economic Assessment (TEA)* dan *Life Cycle Assessment (LCA)* masih terbatas dan umumnya belum terintegrasi secara komprehensif (Min dkk., 2026; Zhou dkk., 2025; Shin dkk., 2026). Sebagian besar studi material/proses hanya berfokus pada kinerja teknis tanpa evaluasi ekonomi dan lingkungan (Gulden dkk., 2025; Kumar dkk., 2025; Thenuwara dkk., 2026), sementara pendekatan berbasis *Artificial Intelligence* menunjukkan tren meningkat namun masih terbatas pada skala laboratorium dan belum terintegrasi dengan TEA/LCA (Ahmadi dkk., 2026; Huang dkk., 2026; Maleki dkk., 2026). Studi optimasi sistem juga belum memi

Temuan tersebut diperkuat melalui analisis *co-occurrence keyword* menggunakan VOSviewer, yang menunjukkan bahwa kata kunci seperti *carbon capture*, *adsorption*, dan *CO<sub>2</sub> utilization* membentuk kluster utama dengan keterkaitan yang kuat, mencerminkan dominasi fokus pada aspek teknis dan material. Sebaliknya, kata kunci yang berkaitan dengan evaluasi sistem seperti *techno-economic analysis* dan *life cycle assessment* cenderung berada pada kluster yang lebih terpisah, mengindikasikan rendahnya integrasi antara aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan. Selain itu, kemunculan kata kunci *artificial intelligence* dan *machine learning* menunjukkan keterhubungan dengan optimasi proses, namun belum terintegrasi secara signifikan dengan pendekatan TEA dan LCA.

#### 3.1 Distribusi Jenis Teknologi Carbon Capture

Berdasarkan analisis terhadap 45 artikel, distribusi jenis teknologi menunjukkan bahwa penelitian didominasi oleh kategori *General Capture/Adsorption* (73,33%), diikuti oleh *CO<sub>2</sub> Utilization* (15,56%), *CCS/CCUS* (4,44%), *Post-Combustion Capture* (4,44%), dan *Direct Air Capture (DAC)* (2,22%).



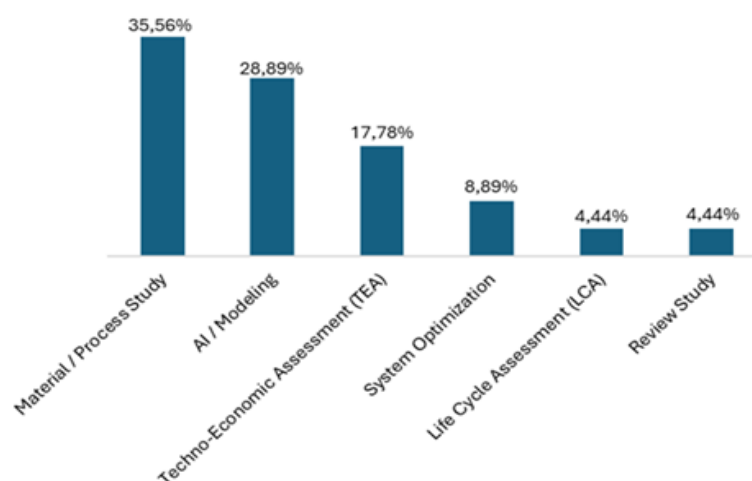
**Gambar 2.** Distribusi jenis teknologi *carbon capture*.

Kategori *CO<sub>2</sub> utilization* menunjukkan kecenderungan integrasi antara proses penangkapan karbon dengan sistem energi dan produksi bahan kimia bernilai tambah, seperti konversi *CO<sub>2</sub>* menjadi bahan bakar sintesis atau produk kimia industri. Hal ini tercermin dalam beberapa studi yang mengkaji pemanfaatan *CO<sub>2</sub>* dalam konteks optimasi sistem dan evaluasi kinerja proses, baik melalui pendekatan *Techno-Economic Assessment* (Min dkk., 2026) maupun pemodelan berbasis kecerdasan buatan untuk meningkatkan efisiensi konversi (Sahu dkk., 2026; Hussain dkk., 2026). Temuan ini menunjukkan bahwa arah penelitian mulai bergeser dari sekadar penangkapan menuju pemanfaatan *CO<sub>2</sub>* sebagai sumber daya dalam sistem energi terintegrasi.

Di sisi lain, penelitian terkait *Direct Air Capture (DAC)* masih relatif terbatas, yang tercermin dari jumlah publikasi yang lebih sedikit dibandingkan kategori teknologi lainnya (Nikkhah dkk., 2026). Keterbatasan ini disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain tingginya kebutuhan energi dalam proses penangkapan *CO<sub>2</sub>* dari udara ambien yang memiliki konsentrasi sangat rendah, kompleksitas desain sistem, serta biaya investasi dan operasional yang masih relatif tinggi. Selain itu, sebagian besar studi DAC masih berfokus pada tahap pemodelan dan optimasi skala laboratorium, sehingga belum banyak tersedia kajian yang mengintegrasikan aspek teknis dengan evaluasi tekno-ekonomi dan lingkungan secara komprehensif. Kondisi ini menunjukkan bahwa teknologi DAC masih berada pada tahap pengembangan awal dan memerlukan penelitian lanjutan yang lebih aplikatif dan terintegrasi.

### 3.2 Distribusi Pendekatan Metodologis

Pendekatan metodologis menunjukkan bahwa *Material/Process Study* (35,56%) merupakan kategori dominan, diikuti oleh *AI/Modelling* (28,89%), *Techno-Economic Assessment* (17,78%), *System Optimization* (8,89%), dan *Life Cycle Assessment* (4,44%) serta *Review Study* (4,44%).



**Gambar 3.** Distribusi pendekatan metodologis

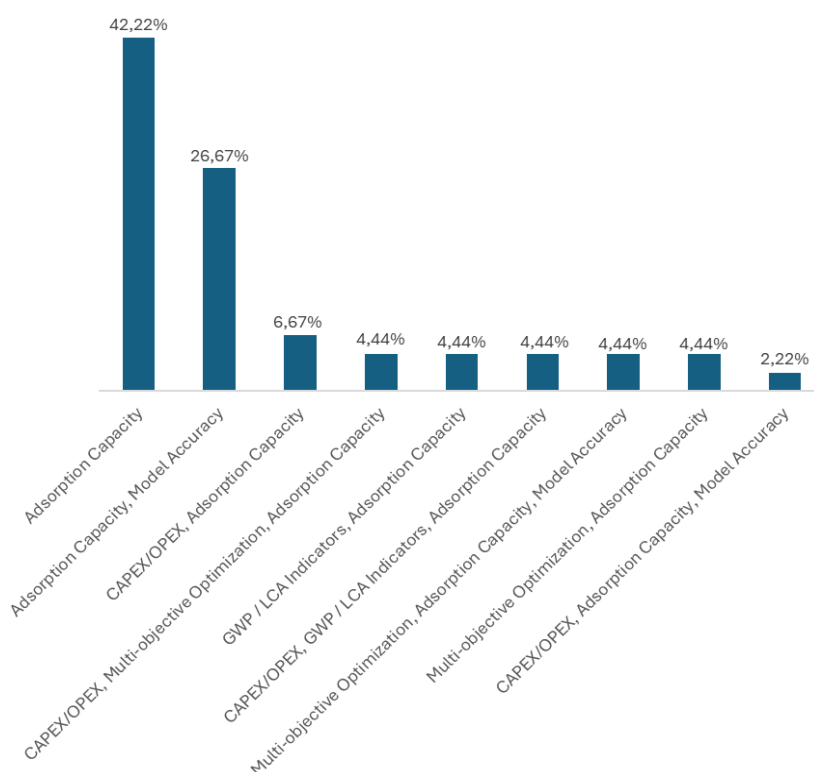
Dominasi studi material menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian masih berorientasi pada eksperimen laboratorium dan karakterisasi performa teknis (Gu dkk., 2025; Mariaca dkk., 2026; Thenuwara dkk., 2026). Namun, peningkatan signifikan pada pendekatan *AI/Modelling* menandakan adanya pergeseran menuju digitalisasi

dan prediksi performa berbasis data (Ahmadi dan Keppo, 2026; Maleki dkk., 2026; Shao dkk., 2026; Si dkk., 2026).

Pendekatan *techno-economic assessment* mulai berkembang dalam mengevaluasi kelayakan implementasi sistem *carbon capture* melalui analisis CAPEX, OPEX, dan biaya penangkapan per ton CO<sub>2</sub> (Lu dkk., 2026; Min dkk., 2026; Rasheed dan Materazzi, 2026; Soroodan dkk., 2026). Meskipun demikian, proporsi studi LCA masih rendah, padahal evaluasi dampak lingkungan sangat penting dalam konteks transisi energi dan dekarbonisasi jangka panjang (Zhou dkk., 2025; Shin dkk., 2026; Sun dkk., 2026). Hal ini menunjukkan adanya ketidakseimbangan antara pengembangan teknis dan evaluasi keberlanjutan sistem secara komprehensif.

### 3.3 Variabel Kunci yang Dianalisis

Variabel yang paling dominan dianalisis adalah *Adsorption Capacity* (42,22%), diikuti oleh kombinasi *Adsorption Capacity & Model Accuracy* (26,67%), serta kombinasi dengan CAPEX/OPEX dan optimasi multi-objektif.



**Gambar 4.** Variabel penelitian

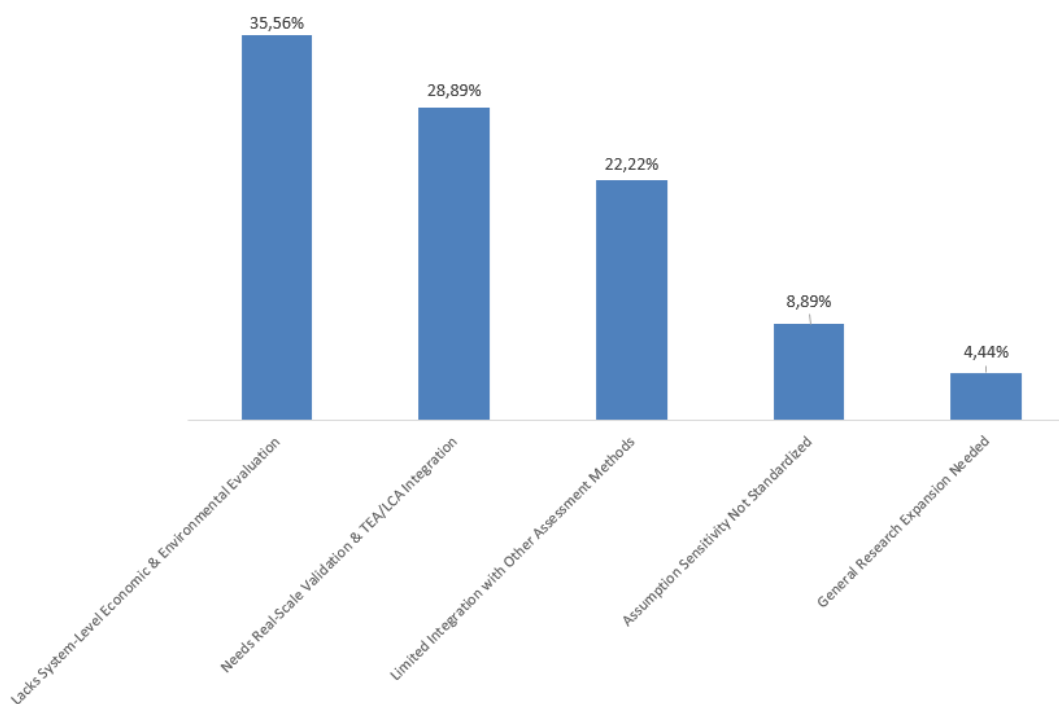
Dominasi variabel kapasitas adsorpsi menunjukkan bahwa fokus utama penelitian masih pada peningkatan performa teknis material (Cho dkk., 2026; He dkk., 2026; Zhai dkk., 2026). Variabel ekonomi seperti CAPEX dan OPEX muncul dalam sebagian studi, terutama pada pendekatan TEA (Hussain dkk., 2026; Lu dkk., 2026; Min dkk., 2026). Variabel lingkungan seperti *Global Warming Potential* (GWP) relatif lebih sedikit dianalisis (Zhou dkk., 2025; Sun dkk., 2026). Pendekatan optimasi multi-objektif mulai digunakan untuk menyeimbangkan biaya dan performa *system* (Kumcu dkk.,

2026; Li dkk., 2026; Wang dkk., 2026), namun integrasi simultan antara aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan masih belum menjadi praktik umum.

### 3.4 Research Gap

Tiga *research gap* utama yang teridentifikasi adalah:

- (1) kurangnya evaluasi *system-level* yang mengintegrasikan aspek ekonomi dan lingkungan (35,56%);
- (2) kebutuhan validasi skala industri dan integrasi TEA-LCA (28,89%);
- (3) keterbatasan integrasi antar metode evaluasi (22,22%).



Gambar 5. Research gap

Sebagian besar studi material belum memasukkan analisis biaya maupun dampak siklus hidup secara komprehensif (Li dkk., 2025; Mariaca dkk., 2026; Thenuwara dkk., 2026). Studi berbasis AI juga masih memerlukan validasi pada skala industri untuk memastikan aplikabilitasnya (Maleki dkk., 2026; Shao dkk., 2026). Sementara itu, studi TEA dan LCA cenderung dilakukan secara terpisah, sehingga membatasi kemampuan analisis komparatif lintas pendekatan (He dkk., 2026; Shin dkk., 2026). Temuan ini menunjukkan bahwa literatur *carbon capture* masih terfragmentasi dan belum sepenuhnya terintegrasi dalam kerangka evaluasi keberlanjutan yang menyeluruh.

### 3.5 Distribusi Jurnal Publikasi

Artikel yang dianalisis dipublikasikan pada jurnal bereputasi tinggi seperti *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, *Journal of Cleaner Production*, *Fuel*, *Chemical Engineering Journal*, dan *Energy*. Hal ini menunjukkan bahwa penelitian *carbon capture* memiliki relevansi tinggi dalam bidang teknik kimia, energi, dan keberlanjutan.



Pendekatan ini sejalan dengan perkembangan optimasi multi-objektif dan integrasi sistem energi rendah karbon (Kumcu dkk., 2026; Min dkk., 2026).

Secara praktis, hasil ini menunjukkan bahwa pengembangan teknologi *carbon capture* perlu mempertimbangkan evaluasi ekonomi dan lingkungan sejak tahap desain awal. Tanpa integrasi tersebut, teknologi yang unggul secara teknis belum tentu layak secara ekonomi atau berkelanjutan secara lingkungan. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu mengembangkan kerangka evaluasi terpadu yang menggabungkan kapasitas adsorpsi, CAPEX/OPEX, serta indikator LCA dalam satu model analisis sistemik.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis *Systematic Literature Review (SLR)* yang terintegrasi dengan analisis bibliometrik dan *co-occurrence keyword*, dapat disimpulkan bahwa penelitian dalam bidang *carbon capture* masih didominasi oleh pendekatan berbasis material dan pemodelan yang berfokus pada peningkatan kinerja teknis, khususnya *adsorption capacity* dan akurasi model. Namun, integrasi dengan pendekatan evaluasi sistem seperti *Techno-Economic Assessment (TEA)* dan *Life Cycle Assessment (LCA)* masih terbatas dan belum dilakukan secara komprehensif.

Analisis *co-occurrence* menunjukkan bahwa struktur penelitian masih bersifat terfragmentasi, dengan keterkaitan yang kuat pada aspek teknis, sementara aspek ekonomi dan lingkungan belum terintegrasi secara signifikan. Selain itu, tren penelitian mulai mengarah pada pemanfaatan CO<sub>2</sub> (*CO<sub>2</sub> utilization*) dalam sistem energi dan produksi bahan kimia, namun teknologi *Direct Air Capture (DAC)* masih terbatas akibat tantangan teknis, kebutuhan energi yang tinggi, serta biaya yang belum kompetitif.

Dengan demikian, *research gap* utama yang teridentifikasi adalah kurangnya pendekatan integratif yang menggabungkan aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan dalam satu kerangka analisis. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu mengembangkan model yang lebih holistik dan terstandarisasi, termasuk integrasi TEA-LCA-AI serta validasi pada skala industri. Pendekatan ini diharapkan dapat meningkatkan kesiapan implementasi teknologi *carbon capture* secara berkelanjutan dan aplikatif.

#### References

- Adami, G., Rocchi, R. dan Figari, M., 2025. Exploring carbon capture for maritime decarbonization: A case study on a military vessel. *Applied Ocean Research*, 165, p.104868. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2025.104868>.
- Ahmadi, F. dan Keppo, I., 2026. Role of the cement industry in climate neutrality considering uncertainties in deployment of carbon capture technologies: A site-specific modeling approach. *Energy Conversion and Management*, 348, p.120792. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120792>.
- Cho, A.R., Won, Y., Nam, H., Park, J., Jo, S.-H., Kim, J.-Y., Park, Y.C., Bae, Y.-S. dan Lee, Y.-R., 2026. Shaping spherical porous carbon beads impregnated with K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> for CO<sub>2</sub> capture in humid flue gases and indoor air with low pressure drop. *Separation and Purification Technology*, 389, p.136930. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2026.136930>.

- Duan, Y., Li, L., Lu, D., Zhang, S., Sun, G., Sun, Z. dan Duan, L., 2026. Innovative approaches to carbon capture using fluidized bed reactors: A brief review. *Fuel*, 414, p.138295. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2026.138295>.
- Gu, R., Li, D., Zhu, Y., Yu, Y., Qin, W., Li, W., Chu, X., He, W. dan Feng, Y., 2025. From energy drain to resource gain: A high-rate system for synergistic carbon capture and ammonia retention. *Chemical Engineering Journal*, 526, p.171227. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.171227>.
- Gulden, L.E. dan Harvey, C., 2025. Tracing sources of funds used to lobby the US government about carbon capture, use, and storage. *Environmental Science & Policy*, 171, p.104171. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2025.104171>.
- He, X., Zhao, T., Sun, Z., Islam, Md.A., Eljamal, O. dan Saha, B.B., 2026. Pinecone-derived activated carbon with tuned micro/mesoporosity for superior CO<sub>2</sub> capture and durable supercapacitors. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 172, p.110300. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.110300>.
- Hussain, M.S., Yu, B., Xu, Y., Pasha, M.K., Wang, Y., Bie, X., Li, Q., Zhang, Y. dan Zhou, H., 2026. Techno-economic analysis and life-cycle assessment of integrated carbon capture and utilization process for coal-fired power plant. *International Journal of Hydrogen Energy*, 214, p.153832. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2026.153832>.
- Kan, A., Yang, J., Wang, Q., Zhang, Z. dan Wu, H., 2026. Advancements and challenges of Onboard Carbon Capture, Utilization and Storage technologies for marine industry: A state-of-the-art review. *Marine Pollution Bulletin*, 222, p.118848. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118848>.
- Kumar, Y., Santhi, V.M. dan Sangwai, J., 2025. Experimental and COSMO-RS modelling into CO<sub>2</sub> absorption performance using MEA/DEA-based nanoformulations for post-combustion carbon capture. *Chemical Engineering Journal*, 525, p.170273. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.170273>.
- Kumcu, S., Özyörük, B., Bezzo, F. dan d'Amore, F., 2026. Optimization of carbon capture, utilization, and storage supply chains for the hard-to-abate industry in Türkiye. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 150, p.104568. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2026.104568>.
- Li, D., Gu, R., Liu, T., Peng, F., Liang, D., He, W. dan Feng, Y., 2025. Contact time and dissolved oxygen concentration modulate carbon capture via shifting microbial metabolism preference in high-rate contact stabilization process. *Bioresour Technol*, 438, p.133253. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.133253>.
- Li, P., Yang, P., Jiang, B., Cao, Z., Wang, Z. dan Han, Z., 2026. Multi-objective optimization and performance analysis of a novel integrated system combined coal-fired power plant with compressed air energy storage and carbon capture. *Journal of Energy Storage*, 151, p.120597. <https://doi.org/10.1016/j.est.2026.120597>.
- Lu, W., Ding, Y., Dong, Z., Peng, X., Chai, Y., Xiao, D., Liu, Y., Qian, F. dan Mujtaba, I.M., 2026. Techno-economic analysis of carbon-based additives and process optimization for enhanced hydrogen production in integrated pyrolysis/gasification and carbon capture systems. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 103, p.103296. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2025.103296>.

- Maleki, A., Mehdizad, A., Hassani, E., Naveshki, M., Zalakinezhad, A., Rashidi, A., Farhadian, A., Somarin, D.H. dan Aghazadeh, F., 2026. Machine learning-driven design of high-performance activated carbons for enhanced CO<sub>2</sub> capture. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 105, p.103336. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2026.103336>.
- Mariaca, A.G., Sastresa, E.L., Moreno, F. dan Carreno Sayago, U.F., 2026. Experimental evaluation of zeolite 13X and activated carbon as adsorbents in a carbon capture system for ICE exhaust gases. *Energy Conversion and Management: X*, 29, p.101563. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2026.101563>.
- Mazhar, S., Mumtaz, M.W., El Oirdi, M., Mukhtar, H., Raza, M.A., Farhan, M., Aatif, M. dan Muteeb, G., 2026. Synergizing advanced materials and artificial intelligence for next-generation carbon capture, utilization, and storage (CCUS): a review. *RSC Advances*, 16(3), pp.2621–2651. <https://doi.org/10.1039/d5ra07338c>.
- Min, C.-H., Kou, X.-S., Wang, K., Fan, Y.-H., Li, X.-L., Hu, J.-Q. dan Rao, Z.-H., 2026. Low-carbon economic optimization of integrated energy system with calcium-based carbon capture coupled with hydrogen utilization at multiple time scales. *Energy*, 345, p.140186. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2026.140186>.
- Nikkhah, S., Zendejboudi, S., Rezaei, N. dan Saady, N.M.C., 2026. A comprehensive review of metal–organic frameworks (MOFs) applications as sorbents and membranes for carbon capture through direct air capture (DAC) technology. *Fuel*, 416, p.137999. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.137999>.
- Rasheed, M.A. dan Materazzi, M., 2026. Techno-economic analysis of waste-to-SAF pathways with carbon capture and storage and green hydrogen integrations. *Fuel Processing Technology*, 283, p.108416. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2026.108416>.
- Shao, S., Li, Q., Li, X. dan Wu, S., 2026. Sustainable valorization of crustacean wastes into N-doped porous carbon via synergistic bio-template and green activation for efficient CO<sub>2</sub> capture. *Journal of Cleaner Production*, 543, p.147567. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2026.147567>.
- Shin, H., Oh, J., Jeon, Y., Lim, Y. dan Adams, T.A., 2026. Comparative environmental techno-economic assessments (eTEAs) of onboard amine-based carbon capture and boil-off gas handling systems on LCO<sub>2</sub> carriers. *Carbon Capture Science & Technology*, 18, p.100569. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2026.100569>.
- Si, H., Wu, J.K., Chen, S., Yong, J.Y., Lin, X.J., Fang, M.X. dan Jiang, L., 2026. Artificial neural network modeling for adsorption processes in carbon capture from wet flue gas. *Gas Science and Engineering*, 146, p.205829. <https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2025.205829>.
- Sopha, B.M., Ma'mun, S., Wibisono, M.A. dan Kim, I., 2026. Exploring Carbon Scheme Scenarios for Retrofitted Coal-Fired Power Plants with Carbon Capture System in Indonesia. *Cleaner Energy Systems*, p.100240. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2026.100240>.
- Soroodan, E., Puxty, G., Huang, S. dan Feron, P., 2026. Energy and economic performance of three amine technologies for carbon capture in integrated iron and steel production plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 149, p.104561. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2025.104561>

- Sun, H., Xu, J., Guo, K., Rong, H., Zuo, J. dan Chen, J., 2026. Concrete surface protection based on carbon-capturing biomineralization: Performances and environmental impacts. *Construction and Building Materials*, 507, p.145090. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.145090>
- Thenuwara, H.N., Wu, S., Bella, Wong, S.Y., Li, X. dan Wu, P., 2026. Glucose-assisted carbon-MgO nanocomposites overcome carbonate blocking for flue-gas CO<sub>2</sub> capture. *Chemical Engineering Journal*, 529, p.172945. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2026.172945>
- Wang, P.-T., Liang, X.-Y., Wang, F.-Y. dan Xu, M., 2026. Optimized deployment of carbon capture, utilization, and storage (CCUS) in China's cement industry: A scenario-based analysis. *Energy for Sustainable Development*, 92, p.101948. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2026.101948>
- Zhai, J., Liu, C., Sun, L., Xue, B., Wu, Y. dan Xiao, R., 2026. 5-HMF-driven microporous N, O-dual doped carbon materials based on chitosan for syngas purification and CO<sub>2</sub> capture. *Carbohydrate Polymers*, 380, p.125072. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2026.125072>
- Zhao, Y., Ma, R., Xu, W., Cui, P. dan Wang, Y., 2026. Techno-economic and environmental assessment of an efficient green methanol production system based on biomass gasification and carbon capture. *Journal of Cleaner Production*, 541, p.147546. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2026.147546>
- Zhou, Y., Guo, D., Qi, G. dan Wang, S., 2025. Multi-scenario life cycle assessment of post-combustion carbon capture in China's coal-fired power plant. *Energy*, 340, p.139322. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139322>