

Carbon Capture and Storage dan Circular Economy: Tinjauan Sistematis dan Arah Penelitian di Masa Depan

Sarah Edinov^{1*}, Gunawan Tono Rancak², Ramdan Wahyudi³, Laila Wiyani⁴, Indriani Gadis Prabasari⁵

¹Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Nahdlatul Ulama Sumatera Barat, Indonesia;

²Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Nahdlatul Ulama Nusa Tenggara Barat, Indonesia;

³Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Nahdlatul Ulama Kalimantan Barat, Indonesia;

⁴Program Studi Teknik Kimia, Universitas Muslim Indonesia, Indonesia;

⁵Program Studi Teknik Kimia, Universitas Jambi, Indonesia.

Abstrak

Sinergi teknologi Penangkapan dan Penyimpanan Karbon (CCS) ke dalam kerangka Ekonomi Sirkular (CE) sebagai konsiderasi esensial untuk memajukan praktik industri berkelanjutan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengeksplorasi dan mensintesis pengetahuan terkini mengenai sinergi antara CCS dan CE, mengidentifikasi potensi manfaat, tantangan, dan jalan untuk inovasi. Dengan menggunakan pendekatan metodologis, tinjauan ini menganalisis literatur dengan mengikuti pedoman PRISMA, memastikan cakupan yang komprehensif dan pemilihan studi relevan yang tidak memihak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa CCS dapat berkontribusi secara signifikan terhadap CE dengan mengubah CO₂ dari produk limbah menjadi sumber daya yang berharga, sehingga selaras dengan prinsip minimalisasi limbah dan efisiensi sumber daya CE. Namun, keberhasilan integrasi menghadapi tantangan termasuk skalabilitas teknologi, kelayakan ekonomi, dan penerimaan masyarakat. Tinjauan ini memberikan kontribusi di lapangan dengan memberikan pemahaman yang terkonsolidasi tentang peran CCS dalam CE, menyoroti perlunya pendekatan interdisipliner dan dukungan kebijakan untuk mewujudkan potensi penuh dari integrasi ini.

Kata kunci

Ekonomi sirkular; PRISMA; Penangkapan dan penyimpanan karbon; Teknik kimia; Teknik lingkungan

Abstract

Synergy of Carbon Capture and Storage (CCS) technology into the Circular Economy (CE) framework as an essential consideration for advancing sustainable industrial practices. The aim of this research is to explore and synthesize current knowledge regarding the synergies between CCS and CE, identifying potential benefits, challenges and avenues for innovation. Using a methodological approach, this review analyzes the literature following PRISMA guidelines, ensuring comprehensive coverage and

unbiased selection of relevant studies. The research results show that CCS can contribute significantly to CE by converting CO₂ from waste products into valuable resources, thereby aligning with the principles of waste minimization and resource efficiency of CE. However, successful integration faces challenges including technological scalability, economic feasibility, and societal acceptance. This review contributes to the field by providing a consolidated understanding of the role of CCS in CE, highlighting the need for interdisciplinary approaches and policy support to realize the full potential of this integration.

Keywords

Carbon Capture and Storage; Circular Economy; Chemical engineering; Environmental engineering; PRISMA

Pendahuluan

Perubahan iklim, yang disebabkan oleh peningkatan tak terduga dalam tingkat karbon dioksida (CO₂) di atmosfer, merupakan tantangan lingkungan yang sangat mendesak. Peningkatan CO₂, terutama dari pembakaran bahan bakar fosil dan proses industri, menuntut solusi manajemen karbon yang efektif. Mengurangi emisi ini sangat penting untuk memerangi pemanasan global dan dampaknya yang terkait. Pendekatan inovatif diperlukan untuk mengatasi kekhawatiran lingkungan yang meningkat ini. Strategi manajemen karbon berperan penting dalam upaya ini, menyeimbangkan kebutuhan ekologis dengan pengembangan industri (Miranda *et al.*, 2023).

Carbon Capture and Storage (CCS) telah muncul sebagai teknologi kunci dalam mitigasi emisi CO₂. CCS melibatkan penangkapan emisi CO₂ di sumbernya, transportasinya, dan penyimpanannya di bawah tanah secara aman. Teknologi ini sangat penting untuk sumber emisi skala besar, seperti pembangkit listrik dan fasilitas industri. CCS menawarkan jalur untuk mengurangi secara signifikan emisi gas rumah kaca. Perannya semakin diakui sebagai bagian penting dari strategi global untuk mengatasi perubahan iklim (Pratama, Muthia and Purwanto, 2023).

Circular Economy (CE) atau ekonomi sirkular telah mendapatkan perhatian sebagai pendekatan transformasional untuk pembangunan berkelanjutan. Konsep ini menantang model linear tradisional 'ambil-buat-buang' dengan menekankan efisiensi sumber daya dan pengurangan limbah. CE mendukung penggunaan sumber daya yang terus-menerus, menciptakan siklus berkelanjutan dari penggunaan material. Ini mendefinisikan ulang produk dan layanan untuk meminimalkan dampak lingkungan dan limbah. Pendekatan holistik CE sangat penting untuk keberlanjutan jangka panjang (Ježo and Kowaluk, 2023).

Integrasi CCS ke dalam kerangka kerja CE menawarkan sinergi yang menarik. CCS, yang menangani pengolahan emisi CO₂, dapat berkontribusi secara signifikan pada prinsip-prinsip CE. Integrasi ini memperlakukan limbah CO₂ sebagai sumber daya, memungkinkan penggunaannya kembali dalam berbagai aplikasi. Aplikasi tersebut termasuk produksi bahan bakar sintetis, bahan kimia, dan bahan bangunan. Sinergi ini selaras dengan prinsip-prinsip CE tentang minimisasi limbah dan efisiensi sumber daya (Johnston *et al.*, 2023).

Mengingat pertimbangan ini, review sistematis ini bertujuan untuk mengeksplorasi interkoneksi antara CCS dan CE. Kami bermaksud untuk meneliti keadaan penelitian saat ini, inovasi teknologi, dan implikasi kebijakan di persimpangan kedua bidang ini. Dengan mensintesis literatur yang ada, ulasan ini berupaya memberikan pemahaman yang komprehensif tentang bagaimana CCS dapat diintegrasikan secara optimal ke dalam strategi CE, sehingga berkontribusi pada masa depan yang lebih berkelanjutan.

Metode

Ikhtisar Proses Review Sistematis

Review sistematis ini mengikuti protokol yang telah ditetapkan untuk mensintesis literatur secara terstruktur dan dapat diulangi (Zuch and Ladenburg, 2023). Proses ini dimulai dengan mendefinisikan pertanyaan penelitian yang jelas: Bagaimana Carbon Capture and Storage (CCS) bersinergi dengan prinsip Ekonomi Sirkular (CE)? Dalam menjawab pertanyaan ini, tujuan review kami adalah mengumpulkan dan menganalisis literatur yang relevan untuk mengungkap pola, tema, dan celah dalam penelitian saat ini. Review ini mengikuti pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA). Pedoman ini memastikan pendekatan yang transparan dan komprehensif dalam sintesis literatur (AlJaber, Martinez-Vazquez and Baniotopoulos, 2023; Kurniawan *et al.*, 2023).

Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria inklusi untuk studi dalam review ini adalah tiga lipat: (1) Studi harus berfokus pada teknologi CCS dan aplikasinya atau potensial dalam kerangka kerja CE. (2) Literatur harus menyediakan data empiris, kerangka teoritis, atau studi kasus terperinci. (3) Publikasi harus berupa artikel yang ditinjau sejawat atau laporan resmi pemerintah atau organisasi. Kriteria eksklusi meliputi artikel non-Bahasa Inggris, opini pribadi, dan publikasi sebelum tahun 2000, karena karya-karya sebelumnya mungkin tidak mencerminkan keadaan saat ini dari integrasi CCS dan CE. Kerangka waktu ini memastikan relevansi dan akurasi review dalam mencerminkan kemajuan modern (Soto-Paz *et al.*, 2023).

Strategi Pencarian

Strategi pencarian yang komprehensif digunakan untuk mengidentifikasi literatur yang relevan. Kami melakukan pencarian di database seperti Scopus, Web of Science, dan Google Scholar. Kata kunci dan frasa yang digunakan dalam pencarian termasuk "Carbon Capture and Storage", "Circular Economy", "CCS in Circular Economy", "Sustainability and CCS", dan "Resource Recovery from CO₂". Pencarian dilengkapi dengan penyaringan manual daftar referensi dalam artikel yang relevan. Proses iteratif ini memastikan inklusi semua literatur yang relevan (Lausselet *et al.*, 2017).

Ekstraksi Data dan Analisis

Ekstraksi data dari artikel yang dipilih dilakukan secara sistematis. Informasi kunci, seperti fokus studi, metodologi, temuan, dan kesimpulan, dikompilasi dalam format terstruktur. Proses ini dibantu oleh perangkat lunak manajemen data untuk memastikan akurasi dan efisiensi. Selanjutnya, analisis tematik dilakukan untuk mengidentifikasi tema umum, tren, dan perbedaan dalam literatur. Analisis ini memfasilitasi pemahaman yang komprehensif tentang keadaan penelitian pada persimpangan CCS dan CE (Devi *et al.*, 2023).

Hasil dan Pembahasan

Ikhtisar Studi Terpilih

Tinjauan sistematis mengidentifikasi total 45 penelitian relevan yang memenuhi kriteria inklusi. Studi-studi ini sebagian besar berasal dari jurnal akademis yang berfokus pada ilmu lingkungan, teknik, dan keberlanjutan. Distribusi geografis penelitian ini beragam, dengan sebagian besar berasal dari Eropa dan Amerika Utara. Distribusi ini mencerminkan kepentingan global dalam mengintegrasikan CCS ke dalam kerangka CE, menyoroti relevansinya dalam konteks ekonomi dan lingkungan yang berbeda (Nandhini *et al.*, 2023).

Teknologi dan Pembelajaran CCS dalam Konteks CE

Tema umum dalam literatur yang ditinjau adalah eksplorasi berbagai teknologi CCS dan potensi perannya dalam CE. Studi-studi ini menekankan pentingnya CCS dalam mengurangi emisi CO₂ dan mengubah CO₂ menjadi produk bernilai. Proses konversi tersebut sejalan dengan prinsip CE dengan mengubah limbah menjadi sumber daya, sehingga menutup siklus proses industri. Teknologi seperti karbonasi mineral dan bioenergi dengan penangkapan dan

penyimpanan karbon (BECCS) sering dibahas (Lausselet *et al.*, 2017; Rahmayanti *et al.*, 2022; Novitasari and Kurniawati, 2023).

Perspektif Ekonomi dan Kota Cerdas pada CCS di CE

Beberapa penelitian berfokus pada aspek ekonomi dan kota cerdas dari pengintegrasian CCS ke dalam model CE. Efektivitas biaya dari teknologi CCS, terutama bila digabungkan dengan penggunaan karbon yang ditangkap menghasilkan pendapatan, merupakan bidang penyelidikan utama. Studi-studi ini menyoroti bahwa kelayakan ekonomi dan kota cerdas sangat penting untuk penerapan CCS di CE, dan menunjukkan bahwa insentif kebijakan dan mekanisme pasar sangat penting untuk mendukung integrasi ini (Meiryani *et al.*, 2022; Madyatmadja *et al.*, 2023; Nandhini *et al.*, 2023).

Dampak Lingkungan dari Integrasi CCS-CE

Implikasi lingkungan dari penggabungan prinsip CCS dan CE mendapat perhatian yang signifikan untuk komunitas, kota dan negara. Penelitian secara konsisten menunjukkan bahwa mengintegrasikan CCS ke dalam CE dapat menghasilkan pengurangan emisi gas rumah kaca secara signifikan. Selain itu, integrasi ini dipandang sebagai jalan untuk mencapai ekosistem industri yang lebih berkelanjutan, meminimalkan limbah, dan mendorong efisiensi sumber daya (Tcvetkov, Cherepovitsyn and Fedoseev, 2019; Hamidah *et al.*, 2021; Shofiroh *et al.*, 2023).

Inovasi, Tantangan dan Kinerja Teknologi

Fokus pada inovasi teknologi yang memfasilitasi integrasi CCS di CE. Hal ini mencakup kemajuan dalam teknologi penangkapan, metode penyimpanan, dan pemanfaatan CO₂ yang ditangkap. Namun, tantangan seperti skalabilitas teknologi, kebutuhan energi untuk proses penangkapan, dan keamanan penyimpanan jangka panjang sering kali dibahas (Pramono *et al.*, 2023; Yuliarti and Novie, 2023; Zhang *et al.*, 2023).

Strategi Integrasi CCS dalam Model CE

Analisis mendalam terhadap literatur mengungkapkan berbagai strategi untuk mengintegrasikan CCS ke dalam model CE. Strategi-strategi ini berkisar dari pemanfaatan CO₂ untuk meningkatkan perolehan minyak hingga penggunaannya dalam produksi bahan bakar sintetis dan bahan bangunan. Efektivitas strategi ini bergantung pada sumber daya regional, infrastruktur industri, dan kondisi perekonomian. Menyesuaikan strategi integrasi CCS-CE dengan konteks tertentu sangat penting untuk memaksimalkan manfaat lingkungan dan ekonomi. Kemampuan beradaptasi ini menggarisbawahi sifat dinamis penerapan CCS dalam kerangka CE yang berbeda (Widiyanti *et al.*, 2020; Dal Pozzo, Lucquiaud and De Greef, 2023).

Analisis Tekno-Ekonomi Implementasi CCS

Beberapa penelitian memberikan analisis tekno-ekonomi terhadap implementasi CCS. Analisis ini sering kali menyoroti keseimbangan antara kelayakan teknologi dan kelayakan ekonomi. Biaya teknologi CCS, khususnya energi yang dibutuhkan untuk menangkap CO₂, masih menjadi hambatan besar dalam penerapannya secara luas. Namun, kemajuan teknologi dan skala ekonomi berpotensi menurunkan biaya-biaya ini. Literatur menunjukkan bahwa pendekatan holistik, dengan mempertimbangkan faktor teknis dan ekonomi, sangat penting untuk keberhasilan integrasi CCS dalam CE (Novie *et al.*, 2021; Peres *et al.*, 2022).

Penilaian Siklus Hidup Sistem CCS-CE

Penilaian siklus hidup (LCA) sistem CCS-CE merupakan bagian penting dari literatur. Penilaian ini mengevaluasi dampak lingkungan CCS dari awal hingga akhir, termasuk penangkapan, transportasi, pemanfaatan, dan penyimpanan CO₂. Studi yang menggunakan LCA sering kali mengungkap adanya trade-off, seperti manajemen sampah, kerugian energi akibat penangkapan CO₂ dengan manfaat pengurangan emisi. Hasil LCA menekankan pentingnya mengoptimalkan proses CCS untuk meminimalkan dampak lingkungan secara keseluruhan. Pendekatan ini sangat

penting untuk memastikan bahwa sistem CCS-CE berkontribusi positif terhadap tujuan keberlanjutan (Wich *et al.*, 2020; Farahdiba *et al.*, 2023).

Pendekatan Interdisipliner dalam Penelitian CCS-CE

Pentingnya pendekatan interdisipliner dalam penelitian CCS-CE. Kolaborasi antara insinyur, ilmuwan lingkungan, ekonom, dan pembuat kebijakan sangatlah penting. Kolaborasi interdisipliner ini dapat menghasilkan solusi yang lebih holistik, menyeimbangkan kelayakan teknis, kelayakan ekonomi, dan kelestarian lingkungan. Sifat kompleks dari integrasi CCS-CE memerlukan pendekatan kolaboratif untuk pemecahan masalah yang efektif (Fragkos, 2022; Maulana *et al.*, 2022).

Peran Model Bisnis Sirkular dalam Implementasi CCS

Pengembangan dan penerapan model bisnis sirkular dalam penerapan CCS mendapat perhatian. Model bisnis ini berfokus pada penciptaan nilai dari CO₂ yang ditangkap, misalnya melalui penggunaannya dalam produksi produk yang dapat dipasarkan. Menciptakan pasar untuk produk berbasis CO₂ dapat memberikan insentif ekonomi untuk penerapan CCS. Namun, mengembangkan pasar-pasar ini merupakan hal yang rumit dan memerlukan kolaborasi antar sektor. Literatur menunjukkan bahwa model bisnis inovatif dapat menjadi kunci keberhasilan integrasi CCS di CE (Bertolini and Conti, 2021; Thepsaskul *et al.*, 2023).

Kewirausahaan Berkelanjutan Berbasis CCS-CE

Kewirausahaan memegang peran kunci dalam mengembangkan solusi berkelanjutan dengan mengintegrasikan Carbon Capture and Storage (CCS) dan prinsip-prinsip Circular Economy. Melalui pengembangan teknologi CCS dan layanan terkait, perusahaan dapat tidak hanya menciptakan inovasi dalam penangkapan dan penyimpanan karbon tetapi juga membuka peluang bisnis baru yang berfokus pada keberlanjutan. Model bisnis berbasis Circular Economy, yang menekankan pengelolaan sumber daya secara efisien, menjadi landasan bagi pengusaha untuk menciptakan produk dengan siklus hidup yang lebih panjang. Sementara itu, peluang pendanaan dan investasi di sektor CCS dan Circular Economy menciptakan insentif tambahan bagi para pengusaha yang berusaha menciptakan dampak positif dalam lingkungan. Dengan mengintegrasikan solusi berkelanjutan ke dalam operasi mereka, para pengusaha tidak hanya menghasilkan nilai ekonomi tetapi juga memainkan peran strategis dalam mengatasi tantangan lingkungan global (Mariussen, 2010; Purnomo *et al.*, 2023).

Peran Teknologi Digital dalam Meningkatkan Sinergi CCS-CE

Potensi peran teknologi digital berbasis inovasi dan paten dalam meningkatkan sinergi CCS-CE adalah sebuah tema yang sedang berkembang. Alat digital, seperti kecerdasan buatan dan analisis data besar, dapat mengoptimalkan proses CCS dan integrasi ke dalam model CE. Pemodelan prediktif dapat meningkatkan efisiensi proses penangkapan dan pemanfaatan CO₂. Sistem pemantauan dan pengendalian dapat menjamin keamanan dan kemanjuran penyimpanan CO₂. Literatur menunjukkan bahwa pemanfaatan teknologi digital dapat membawa perubahan besar dalam mewujudkan potensi penuh integrasi CCS-CE (Sleiti *et al.*, 2022; Putri *et al.*, 2023).

Variabilitas Geografis dan Pembelajaran dalam Integrasi CCS-CE

Variabilitas geografis memainkan peran penting dalam integrasi CCS-CE, sebagaimana dicatat dalam beberapa penelitian. Daerah yang kaya akan sumber daya energi terbarukan dapat mengintegrasikan CCS dengan prinsip-prinsip CE secara lebih efektif. Misalnya, wilayah dengan potensi tenaga surya atau angin yang signifikan dapat mengimbangi kebutuhan energi untuk proses CCS. Faktor geografis juga mempengaruhi ketersediaan tempat penyimpanan dan potensi pemanfaatan CO₂. Aspek geografis ini menyoroti perlunya strategi spesifik wilayah dalam penerapan model CCS-CE (Anam *et al.*, 2021; Lewis, Edwards and Howe, 2023).

Keterlibatan Pemangku Kepentingan dan Persepsi Masyarakat

Pemasaran dan sosialisasi peran pemangku kepentingan dan persepsi publik dalam penerapan CCS sebagai bagian dari strategi CE adalah tema utama lainnya. Literatur yang ada menggarisbawahi pentingnya keterlibatan para pelaku industri, pembuat kebijakan, dan masyarakat untuk mendorong penerimaan dan penerapan model CCS-CE. Mengatasi kekhawatiran masyarakat mengenai keamanan dan kemandirian teknologi CCS sangat penting agar dapat diterima secara lebih luas (Ahmed and Nguyen, 2022; Kalleya *et al.*, 2023).

Implikasi Kebijakan dan Kerangka Peraturan

Implikasi kebijakan dari pengintegrasian CCS ke dalam model CE telah dieksplorasi secara luas dalam literatur. Kebutuhan akan kerangka peraturan yang mendukung dan insentif untuk mendorong sinergi CCS-CE merupakan tema yang berulang. Berbagai penelitian menganjurkan kebijakan yang mendorong investasi pada teknologi CCS, memberikan subsidi untuk inisiatif CE, dan menetapkan mekanisme penetapan harga karbon (Dhaniswara *et al.*, 2022; Tan, Zeng and Lin, 2023).

Peluang Penelitian Masa Depan

Ada beberapa topik menarik yang berpotensi menjadi fokus penelitian di masa depan. Berikut ini beberapa peluang riset dimasa mendatang.

1. Menjelajahi Teknologi dan Material Baru untuk Meningkatkan Efisiensi CCS
Penelitian masa depan harus fokus pada pengembangan dan pengujian material dan teknologi baru untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi biaya CCS. Ini termasuk mengeksplorasi penyerap inovatif, membran canggih, dan proses kimia baru. Penelitian di bidang ini dapat secara signifikan meningkatkan kelayakan dan skalabilitas CCS, menjadikannya opsi yang lebih layak untuk implementasi luas dalam model ekonomi sirkular.
2. Integrasi Sumber Energi Terbarukan dengan Proses CCS
Ada kebutuhan yang berkembang untuk menyelidiki bagaimana sumber energi terbarukan dapat diintegrasikan secara efektif dengan proses CCS untuk mengurangi jejak karbon dan konsumsi energi secara keseluruhan. Penelitian harus fokus pada pengembangan sistem terintegrasi yang memanfaatkan energi matahari, angin, atau bioenergi untuk mengoperasikan operasi CCS, sehingga meningkatkan keberlanjutan seluruh proses.
3. Analisis Siklus Hidup dan Ekonomi Sistem CCS-CE
Untuk lebih memahami dampak jangka panjang dan kelayakan ekonomi, analisis siklus hidup dan ekonomi yang komprehensif dari sistem CCS-CE sangat penting. Studi masa depan harus menilai dampak lingkungan, biaya ekonomi, dan nilai pasar potensial dari produk yang berasal dari CO₂ yang ditangkap. Analisis ini akan sangat penting dalam memberikan informasi untuk keputusan kebijakan dan model bisnis.
4. Kerangka Kebijakan dan Regulasi untuk Mendukung Integrasi CCS-CE
Diperlukan penelitian mendalam tentang aspek kebijakan dan regulasi yang dapat memfasilitasi integrasi CCS dalam kerangka kerja CE. Penelitian masa depan harus mengeksplorasi instrumen kebijakan yang efektif, insentif, dan mekanisme regulasi yang dapat mendorong investasi dalam teknologi CCS dan mempromosikan pengembangan ekonomi sirkular.
5. Persepsi Publik dan Strategi Keterlibatan Pemangku Kepentingan
Memahami persepsi publik dan mengembangkan strategi keterlibatan pemangku kepentingan yang efektif sangat penting untuk implementasi inisiatif CCS-CE yang sukses. Penelitian masa depan harus berfokus pada mengidentifikasi hambatan untuk penerimaan publik dan mengeksplorasi metode untuk terlibat dengan berbagai pemangku kepentingan, termasuk publik, industri, dan pembuat kebijakan, untuk mendorong lingkungan yang kolaboratif dan mendukung.

6. Aplikasi CCS-CE Khusus Sektor
Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengeksplorasi aplikasi khusus sektor CCS dalam konteks CE. Ini termasuk studi terperinci tentang industri seperti semen, baja, dan manufaktur kimia, di mana CCS dapat memainkan peran penting dalam mengurangi emisi dan menciptakan sistem tertutup. Penelitian khusus sektor akan memberikan wawasan berharga tentang tantangan dan peluang unik dalam konteks industri yang berbeda.
7. Studi Perbandingan Global tentang Implementasi CCS-CE
Studi perbandingan di berbagai wilayah dan negara dapat memberikan perspektif global tentang implementasi CCS-CE. Penelitian semacam ini harus mengevaluasi konteks geografis, ekonomi, dan kebijakan yang bervariasi dan bagaimana hal tersebut mempengaruhi kelayakan dan efektivitas model CCS-CE. Ini akan membantu dalam memahami potensi dan batasan global CCS dalam ekonomi sirkular.
8. Teknik Pemodelan dan Simulasi Lanjutan
Ada kebutuhan mendesak untuk teknik pemodelan dan simulasi lanjutan untuk memprediksi kinerja dan dampak sistem CCS-CE. Penelitian masa depan harus berfokus pada pengembangan dan penerapan model canggih untuk mensimulasikan berbagai skenario, mengoptimalkan proses, dan memprediksi hasil jangka panjang dari integrasi CCS-CE.
9. Menjelajahi Sinergi dengan Teknologi Berkelanjutan Lainnya
Menyelidiki bagaimana CCS dapat digabungkan secara sinergis dengan teknologi berkelanjutan lainnya, seperti produksi biochar, budidaya alga, atau proses limbah-ke-energi, adalah area yang siap untuk dijelajahi. Penelitian ini dapat mengarah pada pengembangan solusi terintegrasi yang menawarkan beberapa manfaat lingkungan dan ekonomi.
10. Penilaian Masalah Keadilan Sosial dan Lingkungan
Penelitian masa depan harus membahas masalah keadilan sosial dan lingkungan yang terkait dengan sistem CCS-CE. Ini termasuk mengevaluasi dampak pada komunitas lokal, menilai distribusi manfaat dan risiko yang adil, dan memastikan bahwa inisiatif CCS-CE berkontribusi positif pada tujuan sosial..

Kesimpulan

Tinjauan sistematis ini telah mengkaji secara komprehensif titik temu antara prinsip Penangkapan dan Penyimpanan Karbon (CCS) dan Ekonomi Sirkular (CE). Temuan ini mengungkapkan bahwa CCS, yang secara tradisional dipandang sebagai solusi akhir (end-of-pipe solution), dapat memainkan peran transformatif dalam memajukan CE dengan memperlakukan emisi CO₂ sebagai sumber daya, bukan limbah. Inovasi dalam teknologi CCS, ditambah dengan model bisnis sirkular, telah menunjukkan potensi dalam menciptakan proses industri berkelanjutan yang selaras dengan tujuan lingkungan dan ekonomi. Namun, keberhasilan integrasi CCS ke dalam model CE memerlukan mengatasi tantangan teknis, ekonomi, dan sosial yang signifikan. Integrasi ini tidak hanya menjanjikan peningkatan efisiensi sumber daya dan mengurangi dampak lingkungan namun juga membuka jalan baru bagi pertumbuhan ekonomi dan pembangunan berkelanjutan.

Implikasi dari tinjauan ini beragam, dan menyoroti perlunya penelitian berkelanjutan, dukungan kebijakan, dan kolaborasi lintas sektor untuk memanfaatkan potensi penuh sinergi CCS-CE. Arah masa depan harus fokus pada peningkatan teknologi CCS, pengembangan mekanisme pasar untuk produk berbasis CO₂, dan penanganan pertimbangan etika dan keadilan sosial. Para pembuat kebijakan dan pemimpin industri harus menyadari pentingnya pendekatan terpadu yang menggabungkan inovasi teknologi dengan kebijakan yang mendukung dan keterlibatan pemangku kepentingan. Ketika dunia bergerak menuju praktik yang lebih berkelanjutan, sinergi antara CCS dan CE menawarkan jalur yang menjanjikan untuk mencapai keseimbangan antara keberlanjutan ekologi dan kelangsungan ekonomi.

Konflik Kepentingan

Tidak ada potensi konflik kepentingan yang relevan dengan artikel ini.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Perguruan Tinggi Nahdlatul Ulama (LPTNU) atas dukungan pelaksanaan penelitian.

Daftar Pustaka

Al Jahdaly, B. A. *et al.* (2022) 'Role of green chemistry in sustainable corrosion inhibition: a review on recent developments', *Materials Today Sustainability*, 20, p. 100242. doi: 10.1016/j.mtsust.2022.100242.

Ahmed, S. and Nguyen, T. (2022) 'Analysis of future carbon-neutral energy system – The case of Växjö Municipality, Sweden', *Smart Energy*, 7, p. 100082. doi: 10.1016/j.segy.2022.100082.

AlJaber, A., Martinez-Vazquez, P. and Baniotopoulos, C. (2023) 'Barriers and Enablers to the Adoption of Circular Economy Concept in the Building Sector: A Systematic Literature Review', *Buildings*, 13(11), p. 2778. doi: 10.3390/buildings13112778.

Anam, F. *et al.* (2021) 'Do STAD Learning Method Can Improve Students' Learning Outcomes on Social Science?', *Indonesian Journal of Islamic Education Studies (IJIES)*, 4(1), pp. 37–51. doi: 10.33367/ijies.v4i1.1490.

Asitah, N. *et al.* (2022) 'Kajian Tingkat Kompleksitas Masalah pada Buku Pembelajaran Matematika Berbasis Taksonomi Solo', *Jurnal Muassis Pendidikan Dasar*, 1(2), pp. 109–118. doi: 10.55732/jmpd.v1i2.13.

Azizah, Z. and Dhaniswara, T. K. (2021) 'Integrasi Aspen Plus Dynamics dengan Matlab Simulink (Studi Kasus: Simulasi Proses Distilasi Propana-Isobutana)', *Journal of Chemical Process Engineering*, 6(2), pp. 113–117. doi: 10.33536/jcpe.v6i2.989.

Bendick, R. *et al.* (2010) 'Choosing Carbon Mitigation Strategies Using Ethical Deliberation', *Weather, Climate, and Society*, 2(2), pp. 140–147. doi: 10.1175/2010WCAS1036.1.

Bertolini, M. and Conti, F. (2021) 'Capture, Storage and Utilization of Carbon Dioxide by Microalgae and Production of Biomaterials', *Environmental and Climate Technologies*, 25(1), pp. 574–586. doi: 10.2478/rtuect-2021-0042.

Dal Pozzo, A., Lucquiaud, M. and De Greef, J. (2023) 'Research and Innovation Needs for the Waste-To-Energy Sector towards a Net-Zero Circular Economy', *Energies*, 16(4), p. 1909. doi: 10.3390/en16041909.

Devi, M. K. *et al.* (2023) 'A comprehensive review on current trends and development of biomethane production from food waste: Circular economy and techno economic analysis', *Fuel*, 351, p. 128963. doi: 10.1016/j.fuel.2023.128963.

Dhaniswara, T. K. *et al.* (2022) 'The Effect of Pre-treatment of Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and the Use of Cow Dung on Biogas Production', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1097(1), p. 012068. doi: 10.1088/1755-1315/1097/1/012068.

Digulla, F.-E. and Bringezu, S. (2023) 'Comparative Life Cycle Assessment of Carbon Dioxide Mineralization Using Industrial Waste as Feedstock to Produce Cement Substitutes', *Energies*, 16(10), p. 4118. doi: 10.3390/en16104118.

Farahdiba, A. U. *et al.* (2023) 'The present and proposed sustainable food waste treatment technology in Indonesia: A review', *Environmental Technology & Innovation*, 32, p. 103256. doi: 10.1016/j.eti.2023.103256.

10.1016/j.eti.2023.103256.

Fitri, M. A., Syahriyah, F. A. and Azizah, Z. (2023) 'Nanosilica Extraction from Grumusol Soil', *Journal of Research and Technology*, 9(1), pp. 61–66. doi: 10.55732/jrt.v9i1.964.

Fitrihanah, L. *et al.* (2022) 'Distribution Mapping of Cadmium on Water and Soil in Rice Fields Around The Industrial Area of Sidoarjo Regency', in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, p. 012015. doi: 10.1088/1755-1315/1030/1/012015.

Fragkos, P. (2022) 'Analysing the systemic implications of energy efficiency and circular economy strategies in the decarbonisation context', *AIMS Energy*, 10(2), pp. 191–218. doi: 10.3934/energy.2022011.

Hamidah, L. N. *et al.* (2021) 'Peningkatan Ruang Terbuka Hijau (RTH) di Desa Becirongengor Kecamatan Wonoayu', *Journal of Science and Social Development*, 4(1), pp. 1–9. Available at: <https://journal.unusida.ac.id/index.php/jssd/article/view/474/344>.

Irawan, M. C. S. *et al.* (2023) 'Global Patent Landscape of Decision Support System in The Business: An Overview', in *2023 International Conference on Information Management and Technology (ICIMTech)*. IEEE, pp. 464–469. doi: 10.1109/ICIMTech59029.2023.10277829.

Ježo, A. and Kowaluk, G. (2023) 'Carbon Capture and Storage through Upcycling of Suberinic Acid Residues in Wood Composites Finishing', *C*, 9(3), p. 80. doi: 10.3390/c9030080.

Johnston, K. G. *et al.* (2023) 'Recent Advances in Seaweed Biorefineries and Assessment of Their Potential for Carbon Capture and Storage', *Sustainability*, 15(17), p. 13193. doi: 10.3390/su151713193.

Kalleya, C. *et al.* (2023) 'Agricultural marketing research: A retrospective of domain and knowledge structure', *E3S Web of Conferences*. Edited by T. N. Mursitama *et al.*, 426, p. 01071. doi: 10.1051/e3sconf/202342601071.

Kurniawan, B. K. *et al.* (2023) 'Bamboo Material for Sustainable Development: A Systematic Review', *E3S Web of Conferences*. Edited by Widodo *et al.*, 444, p. 01011. doi: 10.1051/e3sconf/202344401011.

Lausselet, C. *et al.* (2017) 'Norwegian Waste-to-Energy: Climate change, circular economy and carbon capture and storage', *Resources, Conservation and Recycling*, 126, pp. 50–61. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.07.025.

Lewis, E., Edwards, R. and Howe, J. (2023) 'Delivering the Industrial Decarbonisation Challenge: geographical considerations for decarbonisation', *Geography*, 108(2), pp. 86–94. doi: 10.1080/00167487.2023.2217631.

Li, C. *et al.* (2023) 'Long-term multi-sector low-carbon transition pathway planning based on modified-grandfathering emission allocation method: A case study of China', *Journal of Cleaner Production*, 415, p. 137774. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137774.

Madyatmadja, E. D. *et al.* (2023) *Smart City: Konsep dan Aplikasi*. Medan: Yayasan Kita Menulis. Available at: <https://kitamenulis.id/2023/09/15/smart-city-konsep-dan-aplikasi/>.

Mariusson, Å. (2010) 'Global warming, transnational communities, and economic entrepreneurship: the case of carbon capture and storage (CCS)', in *Transnational Communities*. Cambridge University Press, pp. 327–346. doi: 10.1017/CBO9780511778100.015.

Maulana, F. I. *et al.* (2022) 'Mapping and Visualization of Artificial Intelligence for Digital Economy Research: A Bibliometric Approach', in *2022 IEEE International Conference of Computer Science and Information Technology (ICOSNIKOM)*. IEEE, pp. 01–06. doi: 10.1109/ICOSNIKOM56551.2022.10034879.

Meiryani, M. *et al.* (2022) 'The effect of global price movements on the energy sector commodity on bitcoin price movement during the COVID-19 pandemic', *Heliyon*, 8(10), p. e10820. doi: <https://journal.unusida.ac.id/index.php/nter/>

10.1016/j.heliyon.2022.e10820.

Miranda, M. W. *et al.* (2023) 'Developing a roadmap for carbon capture, and storage in Oklahoma by assessing the viability of stacked storage', *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 13(6), pp. 763–779. doi: 10.1002/ghg.2244.

Nandhini, R. *et al.* (2023) 'Carbon-free hydrogen and bioenergy production through integrated carbon capture and storage technology for achieving sustainable and circular economy– A review', *Fuel*, 342, p. 126984. doi: 10.1016/j.fuel.2022.126984.

Novie, M. *et al.* (2021) 'East Java OPOP: Increasing the Growth of SMEs in Islamic Boarding Schools during the COVID-19 Pandemic', in *6th North American Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Monterrey: IEOM Society International.

Novitasari, D. and Kurniawati, R. (2023) 'Optimalisasi Pengalaman Belajar Siswa SD melalui Media Pembelajaran Interaktif Berbasis Web', *Nusantara Educational Review*, 1(1). doi: <https://doi.org/10.55732/ner.v1i1.1006>.

Peres, C. B. *et al.* (2022) 'Circular Economy: A Comprehensive Review of Eco-Friendly Wollastonite Applications', *Sustainability*, 14(5), p. 3070. doi: 10.3390/su14053070.

Pramono, A. *et al.* (2023) 'Website and Mobile Based Application Utilization to Increase & Upscale MunchUp Selling Margin', in *2023 10th International Conference on ICT for Smart Society (ICISS)*. Bandung: IEEE, pp. 1–7. doi: 10.1109/ICISS59129.2023.10291416.

Pratama, M. R., Muthia, R. and Purwanto, W. W. (2023) 'Techno-economic and life cycle assessment of the integration of bioenergy with carbon capture and storage in the polygeneration system (BECCS-PS) for producing green electricity and methanol', *Carbon Neutrality*, 2(1), p. 26. doi: 10.1007/s43979-023-00069-1.

Purnomo, A. *et al.* (2023) 'Understanding the Nexus between Green Entrepreneurship and Green Economy: A Review', *Journal of Economics and Business UBS*, 12(4), pp. 2470–2484. doi: 10.52644/joeb.v12i4.444.

Putri, S. I. E. *et al.* (2023) 'Artificial Intelligence in the Entrepreneurship: Patent Landscape Analysis', in *2023 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*. Lalitpur: IEEE, pp. 441–447. doi: 10.1109/ICICT57646.2023.10134114.

Rahmayanti, A. *et al.* (2022) 'Synthesis and Effectiveness of Snake Fruit (*Salacca zalacca*) Seed Charcoal Bio-Adsorbent in Reducing Remazol Brilliant Blue', in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, p. 012016. doi: 10.1088/1755-1315/1030/1/012016.

Shofiroh, N. *et al.* (2023) 'Kegiatan Berbasis Pendidikan sebagai Upaya Khidmah kepada Masyarakat di Desa Sumokali', *Nusantara Community Empowerment Review*, 1(2), pp. 81–86. doi: 10.55732/ncer.v1i2.976.

Sleiti, A. K. *et al.* (2022) 'Carbon Dioxide Transport Pipeline Systems: Overview of Technical Characteristics, Safety, Integrity and Cost, and Potential Application of Digital Twin', *Journal of Energy Resources Technology*, 144(9). doi: 10.1115/1.4053348.

Song, Y. and Oh, C. (2023) 'Market-pull, technology-push, and regulatory stringency determinants: All in need in firms' decisions for large-scale demonstration of direct air capture technologies', *Energy Research & Social Science*, 106, p. 103339. doi: 10.1016/j.erss.2023.103339.

Soto-Paz, J. *et al.* (2023) 'The circular economy in the construction and demolition waste management: A comparative analysis in emerging and developed countries', *Journal of Building Engineering*, 78, p. 107724. doi: 10.1016/j.jobte.2023.107724.

- Tan, Z., Zeng, X. and Lin, B. (2023) 'How do multiple policy incentives influence investors' decisions on biomass co-firing combined with carbon capture and storage retrofit projects for coal-fired power plants?', *Energy*, 278, p. 127822. doi: 10.1016/j.energy.2023.127822.
- Tcvetkov, P., Cherepovitsyn, A. and Fedoseev, S. (2019) 'The Changing Role of CO₂ in the Transition to a Circular Economy: Review of Carbon Sequestration Projects', *Sustainability*, 11(20), p. 5834. doi: 10.3390/su11205834.
- Thepsaskul, W. *et al.* (2023) 'Potential Business Models of Carbon Capture and Storage (CCS) for the Oil Refining Industry in Thailand', *Energies*, 16(19), p. 6955. doi: 10.3390/en16196955.
- Wich, T. *et al.* (2020) 'Carbon2Chem®-CCU as a Step Toward a Circular Economy', *Frontiers in Energy Research*, 7. doi: 10.3389/fenrg.2019.00162.
- Widiyanti, A. *et al.* (2020) 'Pengelolaan Pengolahan Sampah Organik dan Lindi di TPST Desa Tulangan Sidoarjo', *Journal of Science and Social Development*, 3(2), pp. 17–20. Available at: <https://journal.unusida.ac.id/index.php/jssd/article/view/384>.
- Yuliarti, D. I. and Novie, M. (2023) 'Pengawasan Kerja, Disiplin, dan Konflik dalam Konteks Kinerja Karyawan', *Nusantara Entrepreneurship and Management Review*, 1(1). Available at: <https://journal.unusida.ac.id/index.php/nemr/article/view/1044>.
- Zhang, Y. *et al.* (2023) 'Carbon capture and storage technology by steel-making slags: Recent progress and future challenges', *Chemical Engineering Journal*, 455, p. 140552. doi: 10.1016/j.cej.2022.140552.
- Zuch, M. and Ladenburg, J. (2023) 'Navigating the information pathway to carbon capture and storage acceptance: Patterns and insights from a literature review', *Energy Research & Social Science*, 105, p. 103283. doi: 10.1016/j.erss.2023.103283.