

Strategi Manajemen Transisi Indonesia Menuju *Net Zero Emission*: Tantangan Tata Kelola, Kebijakan Dekarbonisasi, dan Integrasi Biochar dalam Pembangunan Berkelanjutan

Rijali Noor¹, Nova Annisa¹ ✉

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Lambung Mangkurat

Abstrak

Komitmen global dalam mengatasi perubahan iklim telah mendorong berbagai negara, termasuk Indonesia, untuk menetapkan target *Net Zero Emission* (NZE) sebagai bagian dari strategi pembangunan rendah karbon dan berkelanjutan. Artikel ini bertujuan untuk menganalisis arah pembangunan roadmap Indonesia menuju NZE dalam konteks dinamika global, mengidentifikasi peran dan tantangan utama dalam pencapaian target tersebut, serta mengkaji peluang pemanfaatan biochar sebagai salah satu pendekatan berbasis lingkungan untuk mendukung pengurangan emisi gas rumah kaca. Kajian dilakukan melalui pendekatan deskriptif-analitis dengan menelaah berbagai kebijakan, literatur ilmiah, serta perkembangan strategi dekarbonisasi pada tingkat nasional dan global. Hasil kajian menunjukkan bahwa pencapaian NZE di Indonesia memerlukan transformasi sistemik di sektor energi, industri, transportasi, kehutanan, pertanian, serta pengelolaan limbah. Tantangan utama meliputi ketergantungan pada energi fosil, kebutuhan investasi dan teknologi rendah karbon, konsistensi regulasi, kesiapan infrastruktur, serta koordinasi lintas sektor. Dalam konteks tersebut, biochar memiliki potensi strategis karena mampu menyimpan karbon dalam jangka panjang, meningkatkan kualitas dan kesuburan tanah, memanfaatkan limbah biomassa, serta mendukung ekonomi sirkular. Integrasi pengembangan biochar ke dalam strategi mitigasi perubahan iklim, pengelolaan limbah biomassa, dan pertanian berkelanjutan dapat menjadi salah satu instrumen pendukung untuk mempercepat pencapaian NZE. Oleh karena itu, roadmap Indonesia menuju NZE perlu dibangun melalui pendekatan terintegrasi yang mengombinasikan transisi energi, inovasi teknologi, pengelolaan sumber daya alam berkelanjutan, dan pengembangan solusi berbasis karbon, seperti biochar, untuk menciptakan lingkungan yang rendah karbon, tangguh, dan berkelanjutan.

Kata Kunci: *net zero emission; biochar; dekarbonisasi; perubahan iklim; ekonomi sirkular; pembangunan berkelanjutan.*

Abstract

Growing global commitments to addressing climate change have encouraged many countries, including Indonesia, to establish Net Zero Emission (NZE) targets as an integral part of low-carbon and sustainable development strategies. This article examines Indonesia's roadmap toward NZE in a global context, identifies the major roles and challenges in achieving the target, and explores biochar's potential contribution as an environmentally based approach to reducing greenhouse gas emissions. This descriptive-analytical approach reviews relevant policies, scientific literature, and recent developments in national and global decarbonization strategies. The review indicates that achieving Indonesia's NZE target requires systemic transformation

across the energy, industrial, transportation, forestry, agricultural, and waste-management sectors. Major challenges include continued dependence on fossil fuels, the need for substantial investment in low-carbon technologies, regulatory consistency, infrastructure readiness, and effective cross-sectoral coordination. In this context, biochar is a promising strategy because it can sequester carbon long-term, improve soil quality and fertility, utilize biomass waste, and support the circular economy. Integrating biochar development into climate change mitigation policies, biomass waste management, and sustainable agricultural practices could therefore provide an additional mechanism for accelerating progress toward NZE. Indonesia's NZE roadmap should therefore be developed through an integrated framework that combines energy transition, technological innovation, sustainable natural-resource management, and carbon-based solutions such as biochar to establish a low-carbon, climate-resilient, and environmentally sustainable future.

Keywords: *net-zero emissions; biochar; decarbonization; climate change; circular economy; sustainable development.*

Copyright (c) 2026 Rijali Noor, Nova Annisa

✉ Corresponding author :

Email Address : aiyuvasha@ulm.ac.id

PENDAHULUAN

Perubahan iklim telah berkembang dari persoalan lingkungan menjadi isu strategis yang memengaruhi keberlanjutan ekonomi, stabilitas rantai pasok, investasi, produktivitas, ketahanan sumber daya, serta daya saing negara dan organisasi. Data ilmiah terbaru menunjukkan bahwa pemanasan global akibat aktivitas manusia telah mencapai sekitar 1,37°C pada tahun 2025 dibandingkan dengan periode praindustri, sementara emisi gas rumah kaca global pada tahun 2024 mencapai sekitar 56,8 Gt CO₂e. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa ruang untuk mempertahankan kenaikan temperatur global mendekati 1,5°C semakin terbatas (Forster et al., 2026). Dengan demikian, respons terhadap perubahan iklim tidak lagi memadai jika hanya ditempatkan sebagai agenda perlindungan lingkungan, tetapi perlu diperlakukan sebagai bagian dari manajemen strategis pembangunan, yaitu bagaimana pemerintah dan pelaku ekonomi mengalokasikan sumber daya, membangun kapabilitas, mengelola risiko, memilih portofolio teknologi, dan menciptakan nilai ekonomi dalam proses dekarbonisasi.

Pencapaian *Net Zero Emission* (NZE) dalam perspektif manajemen merupakan bentuk transformasi sistemik jangka panjang yang menuntut keselarasan antara visi strategis, kebijakan, struktur kelembagaan, mekanisme pembiayaan, investasi teknologi, serta perilaku aktor pada berbagai tingkat. Literatur mengenai sustainability transition menunjukkan bahwa keberhasilan suatu transisi tidak hanya ditentukan oleh tersedianya teknologi rendah karbon, tetapi juga oleh kualitas policy mix, terutama konsistensi antarinstrumen, koherensi proses pengambilan keputusan, kredibilitas kebijakan, dan kemampuan mengarahkan inovasi menuju tujuan jangka panjang (Rogge & Reichardt, 2016). Artinya, keberadaan target NZE secara formal belum menjamin keberhasilannya apabila target tersebut tidak diterjemahkan menjadi sistem manajemen transisi yang mampu mengoordinasikan kepentingan, sumber daya, teknologi, investasi, dan aktor secara konsisten. Persoalan tersebut menjadi sangat relevan bagi Indonesia. Sebagai perekonomian terbesar di Asia Tenggara dengan kebutuhan energi yang terus meningkat, Indonesia menghadapi dilema

strategis antara mempertahankan pertumbuhan ekonomi dan mempercepat penurunan emisi. Pemodelan jalur NZE Indonesia menunjukkan bahwa keberlanjutan ketergantungan pada bauran energi berbasis fosil akan menghasilkan lintasan pembangunan yang semakin tidak berkelanjutan, sedangkan pencapaian NZE memerlukan kombinasi peningkatan energi terbarukan, elektrifikasi, efisiensi energi, serta teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon (Zhong et al., 2025). Persoalannya bukan semata-mata apakah teknologi tersebut tersedia, melainkan bagaimana transisi tersebut dikelola ketika pertumbuhan ekonomi, keamanan energi, keterjangkauan harga, investasi, dan pengurangan emisi harus dicapai secara simultan.

Komitmen kebijakan Indonesia sendiri telah mengalami perkembangan yang signifikan. *Enhanced Nationally Determined Contribution* meningkatkan target penurunan emisi tahun 2030 dari 29% menjadi 31,89% melalui kemampuan nasional dan dari 41% menjadi 43,20% dengan dukungan internasional. Perkembangan tersebut kemudian dilanjutkan melalui *Second Nationally Determined Contribution* (*Second NDC*) yang disampaikan Indonesia kepada UNFCCC pada Oktober 2025. Berbeda dengan pendekatan sebelumnya yang menggunakan persentase reduksi terhadap skenario *business as usual*, *Second NDC* menggunakan tahun 2019 sebagai reference point dengan emisi bersih sebesar 1.145.037 Gg CO₂e dan menetapkan jalur tingkat emisi menuju periode 2031–2035. Dalam skenario *Low Carbon Compatible with Paris* (LCCP), emisi diproyeksikan mencapai 1.257.717–1.488.866 Gg CO₂e pada 2035, dengan NZE tetap diarahkan untuk dicapai pada 2060 atau lebih awal. Kebijakan tersebut sekaligus memperlihatkan bahwa pemerintah berupaya mengintegrasikan target iklim dengan RPJMN 2025–2029, RPJPN 2025–2045, serta tujuan pertumbuhan ekonomi nasional. Namun, kesenjangan antara ambisi kebijakan dan kapasitas implementasi masih menjadi persoalan fundamental. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lambatnya pengadaan energi terbarukan di Indonesia tidak hanya disebabkan oleh keterbatasan teknologi, tetapi juga oleh keterkaitan dengan bahan bakar fosil (*fossil-fuel lock-in*), ketidakpastian regulasi, lemahnya hubungan antara perencanaan dan pengadaan, keterbatasan volume proyek, mekanisme harga yang kurang menarik, persoalan perizinan, serta kendala pembiayaan. Temuan tersebut mengubah cara membaca masalah NZE di Indonesia. Hambatan dekarbonisasi pada dasarnya juga merupakan masalah manajemen kelembagaan dan investasi, karena efektivitas strategi ditentukan oleh kualitas koordinasi, kredibilitas kebijakan, pembagian risiko, kepastian pasar, serta kemampuan organisasi pemerintah dalam menciptakan lingkungan investasi yang kondusif (Halimatussadiyah et al., 2024).

Persoalan tata kelola menjadi lebih kompleks ketika dianalisis melalui hubungan antaraktor. Proses transisi energi di Indonesia dibentuk oleh interaksi antara pemerintah pusat dan daerah, kepemimpinan politik, struktur ekonomi-politik, keterlibatan masyarakat sipil, serta relasi kekuasaan (Setyowati & Quist, 2022). Studi terbaru menemukan bahwa *power asymmetries*, perbedaan kepentingan antarlembaga, fragmentasi birokrasi, *political short-termism*, serta keberadaan aktor yang memperoleh manfaat dari sistem berbasis fosil dapat memperlambat implementasi kebijakan dekarbonisasi (Apriliyanti et al., 2026). Dengan demikian, persoalan NZE Indonesia tidak cukup dijelaskan melalui pendekatan teknis yang mempertanyakan “teknologi apa yang harus digunakan”, tetapi membutuhkan pendekatan manajemen yang mempertanyakan siapa yang mengelola transisi, bagaimana keputusan strategis dibuat, bagaimana konflik kepentingan dikelola,

bagaimana sumber daya dialokasikan, dan bagaimana keberhasilan setiap instrumen diukur. Kondisi tersebut menunjukkan kelemahan apabila roadmap NZE hanya berorientasi pada transisi energi atau pada satu kelompok teknologi. Secara manajerial, NZE lebih tepat diperlakukan sebagai portofolio strategi dekarbonisasi yang mengombinasikan pengurangan emisi pada sumbernya dengan pengelolaan emisi sisa. Energi terbarukan, efisiensi energi, elektrifikasi, perlindungan hutan, CCS/CCUS, pengelolaan limbah, peningkatan karbon tanah, dan *carbon dioxide removal* (CDR) memiliki karakteristik biaya, risiko, tingkat kematangan teknologi, skala, dan manfaat yang berbeda-beda. Karena itu, keputusan mengenai NZE pada dasarnya menyerupai keputusan strategis dalam manajemen portofolio, di mana pemerintah harus menentukan kombinasi instrumen yang memberikan manfaat iklim terbesar dengan risiko ekonomi, sosial, teknologi, dan kelembagaan yang dapat dikelola. Kerangka policy mix juga menegaskan bahwa efektivitas transisi bergantung pada hubungan antarinstrumen serta konsistensi, koherensi, dan kredibilitas secara keseluruhan dari sistem kebijakan (Rogge & Reichardt, 2016).

Biochar dalam konteks manajemen portofolio menawarkan karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan teknologi penangkapan karbon industri konvensional. Biochar dihasilkan melalui konversi termokimia biomassa dalam kondisi oksigen terbatas sehingga sebagian karbon biogenik dapat ditransformasikan menjadi struktur karbon yang relatif stabil. Selain itu, pemanfaatan residu biomassa secara berkelanjutan untuk produksi biochar berpotensi memberikan kontribusi CDR yang signifikan; pemodelan terhadap 155 negara menghasilkan potensi rata-rata yang setara dengan sekitar $6,23 \pm 0,24\%$ dari emisi GRK negara-negara yang dianalisis dalam horizon 100 tahun (Lefebvre et al., 2023). Bukti meta-analisis juga menunjukkan bahwa aplikasi biochar meningkatkan berbagai fraksi karbon tanah secara signifikan (Chagas et al., 2022). Dengan demikian, biochar memiliki nilai strategis karena berpotensi menghubungkan pengelolaan karbon, pengelolaan limbah biomassa, pertanian, pemulihan tanah, dan ekonomi sirkular dalam satu rantai nilai. Akan tetapi, peluang lingkungan tersebut tidak secara otomatis berarti bahwa biochar layak diterapkan pada skala besar. Dari perspektif manajemen, terdapat kesenjangan penting antara potensi teknis dan feasibility manajerial maupun ekonomis. Penelitian lainnya menunjukkan bahwa profitabilitas produksi dan penggunaan biochar sangat kontekstual dan dipengaruhi oleh lokasi, jenis bahan baku, skala produksi, kondisi pirolisis, harga biochar, jenis tanaman, serta kemampuan menginternalisasi manfaat eksternal seperti sequestrasi karbon (Campion et al., 2023).

Hambatan ekonomi dan ketidakpastian manfaat menyebabkan adopsi biochar dalam skala luas masih terbatas. Artinya, tantangan biochar bukan sekadar menghasilkan material dengan kandungan karbon tinggi, tetapi juga bagaimana membangun model bisnis, rantai pasok biomassa, insentif karbon, mekanisme pembiayaan, standarisasi produk, pasar, serta sistem *monitoring, reporting, and verification* (MRV) yang mampu mengubah manfaat lingkungan menjadi nilai ekonomi yang dapat diterima investor, produsen, petani, dan pemerintah. Hal ini sangat penting bagi Indonesia. Studi tahun 2021 secara eksplisit memasukkan Indonesia dalam analisis enam negara berkembang dan berpendapatan menengah, serta menemukan bahwa sistem biochar dapat menghasilkan manfaat lingkungan, tetapi manfaat ekonominya sangat bergantung pada teknologi produksi dan kondisi setempat. Bahkan dapat terjadi trade-off antara manfaat lingkungan bagi masyarakat dan kerugian finansial bagi pelaku usaha atau petani secara individual (Owsianiak et

al., 2021a). Temuan tersebut mempunyai implikasi manajemen yang penting yaitu apabila manfaat sosial dari sekuestrasi karbon tidak diterjemahkan melalui harga karbon, insentif, subsidi, pembiayaan hijau, atau mekanisme pasar lainnya, teknologi yang secara lingkungan menguntungkan belum tentu memperoleh investasi dan adopsi yang memadai. Dengan demikian, pengembangan biochar untuk mendukung NZE membutuhkan bukan hanya inovasi teknologi, tetapi juga inovasi kelembagaan dan model penciptaan nilai.

Literatur mengenai NZE di Indonesia cenderung berkembang dalam beberapa arus yang masih relatif terpisah. Pertama, penelitian jalur NZE banyak menekankan pemodelan energi, elektrifikasi, efisiensi energi, dan CCS (Zhong et al., 2025). Kedua, kajian transisi energi Indonesia lebih banyak menyoroti *fossil lock-in*, kebijakan, institusi, relasi kekuasaan, pengadaan energi terbarukan, dan koordinasi multi-level (Apriliyanti et al., 2026; Halimatussadiyah et al., 2024; Setyowati & Quist, 2022). Ketiga, literatur biochar terutama berkembang pada ranah teknis mengenai sekuestrasi karbon, kualitas tanah, pirolisis, dan potensi CDR (Chagas et al., 2022; Lefebvre et al., 2023), sementara kajian ekonomi menunjukkan bahwa implementasinya menghadapi persoalan kelayakan investasi dan internalisasi eksternalitas (Campion et al., 2023; Owsianiak et al., 2021a). Masih terdapat ruang kajian untuk menghubungkan ketiga arus tersebut dalam satu kerangka manajemen strategis NZE di Indonesia. Sintesis literatur tersebut menunjukkan bahwa kelemahan bukan terletak pada ketiadaan solusi, melainkan pada belum terintegrasinya solusi teknologi, tata kelola, pembiayaan, dan penciptaan nilai dalam satu sistem manajemen transisi.

Kebaruan kajian ini terletak pada pengembangan perspektif *strategic sustainability management* yang mengintegrasikan tata kelola transisi NZE, koherensi kebijakan, manajemen portofolio dekarbonisasi, serta biochar sebagai instrumen circular carbon management. Berbeda dari penelitian sebelumnya yang cenderung membahas transisi energi dan biochar secara terpisah, penelitian ini menempatkan biochar sebagai sumber daya strategis, dengan keberhasilan implementasinya ditentukan secara simultan oleh kinerja lingkungan, kelayakan ekonomi, tata kelola, pembiayaan, rantai nilai biomassa, serta sistem MRV dalam roadmap NZE Indonesia.

METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif yang kokoh untuk menyelidiki emisi karbon dan kebijakan mitigasi di Indonesia. Pendekatan ini memungkinkan analisis yang mendalam dan bernuansa, melampaui batasan statistik dan angka semata. Sebagai fondasi, paper ini memanfaatkan kekayaan literatur yang relevan, termasuk jurnal internasional dan nasional, laporan resmi pemerintah, publikasi lembaga internasional, serta hasil penelitian akademis terkini. Sumber-sumber ini memberikan wawasan komprehensif tentang lanskap emisi karbon di Indonesia, kebijakan yang ada untuk mengatasinya, serta perbandingannya dengan negara lain (Sambodo et al., 2022; Tavares et al., 2022). Lebih lanjut, studi kasus yang dipilih dengan cermat akan memperkaya analisis. Kasus-kasus ini akan dieksplorasi secara mendalam untuk mengungkap kompleksitas emisi karbon serta efektivitas kebijakan mitigasi pada tingkat lokal. Dengan menggabungkan analisis literatur dan studi kasus, paper ini bertujuan untuk mengkaji temuan yang tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga interpretatif dan kritis. Pemahaman yang lebih mendalam tentang emisi karbon dan kebijakan mitigasi di Indonesia ini diharapkan dapat

memberikan kontribusi yang signifikan bagi ilmu pengetahuan dan praktik di bidang ini (Bardant et al., 2018; Wiloso et al., 2020).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Emisi karbon dan dampaknya terhadap perubahan iklim kini menjadi fokus utama perhatian dunia internasional. Data dari berbagai lembaga nasional dan internasional menunjukkan peningkatan konsentrasi gas karbon dioksida (CO₂), yang merupakan komponen terbesar karbon di atmosfer (Cahyono et al., 2022; Cheng et al., 2022; Dlugokencky et al., 1994). Gas ini, yang juga dikenal sebagai gas rumah kaca, memiliki kemampuan untuk mempengaruhi iklim global. Hal ini terjadi karena gas tersebut dapat menghasilkan efek rumah kaca dengan menjebak radiasi panas matahari di atmosfer bumi, yang pada gilirannya menyebabkan pemanasan global (Anderson et al., 2016; Cheng et al., 2022). Perubahan iklim yang diakibatkan oleh gas rumah kaca ini terbukti dapat memicu bencana, seperti banjir akibat kenaikan permukaan air laut, yang diawali dengan pencairan es di kutub bumi akibat pemanasan global (Amjad et al., 2022; Hoffman et al., 1990). Selain itu, perubahan iklim juga dapat meningkatkan frekuensi dan intensitas cuaca ekstrem seperti badai dan gelombang panas yang tidak biasa (Clarke et al., 2022; Marx et al., 2021). Dampak negatif lainnya dari perubahan iklim juga mencakup ekosistem laut, seperti terumbu karang yang sangat penting bagi Indonesia (Dickson et al., 2000).

Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) dan Bank Dunia (*World Bank*) tengah menyusun dan melaksanakan kebijakan-kebijakan terkait mitigasi emisi karbon, baik pada tingkat nasional maupun global, untuk menangani dampak negatif perubahan iklim (United Nations, 2016; World Bank, 2021). Peran Indonesia menjadi krusial dalam hal ini, mengingat posisinya sebagai salah satu negara dengan emisi karbon tertinggi di dunia, untuk berkontribusi dalam kebijakan *net zero emission*. Pemerintah Indonesia, sebagai salah satu peserta dalam Conference of Parties ke-26 (COP-26) PBB terkait perubahan iklim, telah berkomitmen mendukung pencapaian target *net zero emission* pada tahun 2060 (IEA, 2022; Tasrif, 2021). Untuk mencapai target *net zero emission*, pemerintah Indonesia telah mengambil berbagai langkah untuk mengurangi emisi karbon di berbagai sektor. Salah satunya melalui Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) dengan pembangunan unit *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS) di kilang Pertamina Gundi. Beberapa unit CCUS lainnya juga telah dibangun oleh berbagai pihak di dalam negeri. Namun, sebagian besar unit CCUS ini dibangun di kawasan industri dengan tujuan memitigasi emisi karbon dari pabrik tersebut. Menurut proyeksi Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), tren emisi karbon di Indonesia masih menunjukkan pola peningkatan (Cahyono et al., 2022), yang mengindikasikan bahwa mitigasi karbon di Indonesia saat ini masih belum optimal meskipun dengan adanya CCUS. Selain itu, masalah lain terkait CCUS adalah tingginya biaya investasi dan waktu pembangunan yang relatif panjang.

Indonesia dalam upaya mencapai target *net zero emission* menghadapi berbagai tantangan, salah satunya kesulitan melacak sumber emisi karbon. Beragam sumber emisi karbon di Indonesia meliputi kendaraan bermotor, kebakaran hutan, emisi industri, penggunaan batu bara, dan perubahan penggunaan lahan (Yoro & Daramola, 2020). Namun, data yang tersedia hanya menunjukkan konsentrasi total karbon di atmosfer tanpa rincian sektor mana yang berkontribusi serta seberapa besar kontribusinya. Perhitungan emisi sektoral yang ada selama ini lebih bersifat ekonomis

dan tidak didasarkan pada pengukuran langsung di lapangan (Cahyono et al., 2022). Tantangan lainnya adalah menentukan lokasi dan metode penangkapan karbon yang efektif mengingat luasnya wilayah daratan Indonesia. Beberapa instalasi CCUS telah dibangun di kawasan industri, namun penggunaannya terbatas pada penangkapan karbon dari emisi industri. Selain itu, investasi yang diperlukan untuk pembangunan dan pengoperasian CCUS sangat tinggi, sementara konsentrasi karbon di atmosfer Indonesia terus meningkat akibat banyaknya sumber emisi di luar sektor industri. Ini menunjukkan bahwa Indonesia membutuhkan sistem penangkap karbon yang lebih efektif dan efisien (Cahyono et al., 2022).

Teknologi saat ini telah berhasil menemukan metode untuk mengidentifikasi asal emisi karbon berdasarkan rasio isotopnya. CO₂ memiliki rasio isotop karbon yang berbeda-beda tergantung pada sumber emisinya (Dai et al., 2022). Misalnya, karbon yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil memiliki rasio isotop yang berbeda dari karbon yang secara alami terdapat di atmosfer. Temuan ini telah dipublikasikan dalam berbagai jurnal ilmiah hasil penelitian dari berbagai negara (Aguilera & Whigham, 2018). Selain itu, beberapa lembaga seperti National Physical Laboratory di Inggris telah berhasil memetakan pola pergerakan polutan karbon berupa metana menggunakan data dari stasiun pengukuran di lapangan yang diintegrasikan dengan data pergerakan angin (Rennick et al., 2021). Metode pemodelan serupa juga telah dilaporkan untuk pengembangan pemetaan fluks radon (Rn) di atmosfer, dengan mengombinasikan pengukuran presisi tinggi dan pemodelan transportasi atmosfer.

Terkait pengukuran karbon di udara, Universitas Telkom sebagai salah satu universitas swasta terkemuka di Indonesia telah mengembangkan sistem pemantauan kadar polutan gas di udara berbasis sensor berbiaya rendah. Dengan menggunakan sistem ini, pelacakan karbon dapat dilakukan dengan biaya yang lebih terjangkau (Chandra et al., 2021). Dalam upaya penangkapan karbon, Universitas Gadjah Mada telah melakukan terobosan dengan mengembangkan sistem *direct-air capture* berbasis mikroalga yang revolusioner. Sistem ini telah diuji coba di halte transportasi umum, menunjukkan efektivitasnya dalam mengurangi konsentrasi karbon di lokasi dengan tingkat polusi yang tinggi. Mikroalga digunakan karena kemampuannya yang luar biasa dalam menyerap CO₂ melalui proses fotosintesis, sehingga menjadikannya pilihan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan (Arbye et al., 2020). Sementara itu, Universitas Telkom sedang mengembangkan filter karbon berbasis zeolit, yang dikenal memiliki struktur berpori mikro dan kemampuan adsorpsi yang tinggi. Zeolite dapat menyerap dan menyimpan CO₂ secara efisien, dan dengan penelitian lebih lanjut, material ini dapat dioptimalkan untuk digunakan dalam skala yang lebih besar. Filter berbasis zeolite memiliki potensi besar untuk diterapkan di berbagai lokasi, termasuk industri dan daerah perkotaan dengan konsentrasi karbon yang tinggi. Kombinasi kedua inovasi ini, yaitu sistem *direct-air capture* berbasis mikroalga dan filter karbon berbasis zeolit, dapat menawarkan solusi penangkapan karbon yang sangat efektif. Dengan optimasi lebih lanjut, teknologi ini dapat diterapkan secara strategis di hotspots karbon, area yang dikenal memiliki emisi CO₂ tinggi. Implementasi teknologi ini tidak hanya akan membantu mitigasi emisi karbon secara signifikan, tetapi juga berkontribusi pada upaya global dalam menghadapi perubahan iklim. Selain itu, keberhasilan dalam pengembangan dan penerapan teknologi ini dapat menjadikan Indonesia sebagai pemimpin dalam inovasi teknologi penangkapan

karbon, serta menjadi contoh bagi negara-negara lain dalam upaya melindungi lingkungan dan mencapai target keberlanjutan.

Kombinasi teknologi digital untuk memetakan konsentrasi karbon di udara menggunakan data pengukuran lapangan yang terintegrasi dengan teknologi penentuan sumber emisi dan penangkapan karbon berdasarkan rasio isotop, merupakan inovasi yang sangat menjanjikan untuk mitigasi karbon di negara besar seperti Indonesia. Dengan luasnya wilayah dan beragamnya sumber emisi karbon di Indonesia, penggunaan teknologi ini dapat memberikan pemetaan yang lebih akurat dan rinci terhadap distribusi serta sumber emisi karbon. Teknologi digital memungkinkan pengukuran yang berkesinambungan dan real-time, sehingga dapat memantau perubahan konsentrasi karbon secara cepat. Sementara itu, teknologi penentuan sumber emisi berdasarkan rasio isotop memberikan informasi yang lebih spesifik mengenai asal usul emisi karbon, yang sangat penting untuk menyusun strategi mitigasi yang tepat. Dengan mengintegrasikan kedua teknologi ini, Indonesia dapat meningkatkan efisiensi dalam upaya menurunkan emisi karbon, mengoptimalkan sumber daya yang ada, dan mempercepat pencapaian target net zero emission. Inovasi ini tidak hanya akan memberikan manfaat bagi lingkungan, tetapi juga dapat mendukung pembangunan berkelanjutan serta meningkatkan kualitas hidup masyarakat.

Potensi pengembangan biochar menjadi sangat relevan bagi Indonesia karena negara ini menghasilkan residu biomassa dalam jumlah besar dari aktivitas pertanian, perkebunan, kehutanan, dan agroindustri. Bahan seperti sekam dan jerami padi, tongkol jagung, tempurung dan sabut kelapa, residu kelapa sawit, kulit kakao, bambu, serbuk kayu, serta berbagai limbah lignoselulosa lainnya dapat menjadi bahan baku potensial untuk produksi biochar. Penelitian menunjukkan besarnya potensi residu pertanian untuk dimanfaatkan sebagai biomassa energi di Nusa Tenggara Barat. Kondisi tersebut menunjukkan adanya basis sumber daya yang dapat dikembangkan lebih lanjut melalui skema pemanfaatan biomassa bertingkat, yaitu dengan mendahulukan pemanfaatan bernilai tinggi dan menggunakan residu yang benar-benar tersedia secara berkelanjutan untuk produksi energi dan biochar (Setyawan et al., 2024).

Bukti lapangan mengenai biochar di Indonesia juga telah tersedia. Penelitian jangka panjang pada Ultisol masam di Sumatra menggunakan biochar dari sekam padi dan kulit kakao. Biochar kulit kakao memberikan peningkatan hasil jagung yang lebih kuat karena kemampuannya meningkatkan pH dan memperbaiki rasio Ca/Al tanah. Namun, efek tersebut berkurang setelah beberapa musim tanam. Temuan ini penting karena menunjukkan bahwa manfaat biochar sangat ditentukan oleh karakteristik bahan baku dan bahwa strategi aplikasi ulang mungkin diperlukan pada kondisi tanah tertentu (Cornelissen et al., 2018). Penelitian lanjutan pada Ultisol tropis Indonesia juga menunjukkan bahwa biochar mampu meningkatkan hasil tanaman dan memperbaiki kondisi tanah masam melalui peningkatan pH, penurunan Al^{3+} yang tersedia, serta penambahan beberapa unsur hara. Temuan-temuan tersebut memberikan bukti empiris bahwa biochar relevan secara langsung dengan kondisi tanah tropis Indonesia, sekaligus memperlihatkan perlunya penyesuaian jenis biochar, bahan baku, dosis, dan frekuensi aplikasi berdasarkan kondisi agroekologi setempat. Konteks Indonesia juga diperkuat oleh penelitian lain yang membandingkan dampak lingkungan dan ekonomi dari produksi serta penggunaan biochar di enam negara berkembang dan berpendapatan menengah, termasuk

Indonesia (Owsianiak(Owsianiak et al., 2021b). Analisis *life cycle* tersebut menunjukkan bahwa manfaat lingkungan biochar dapat signifikan, tetapi kelayakan ekonominya dipengaruhi oleh jenis teknologi produksi, skala operasi, sistem pengelolaan limbah yang dibandingkan, serta kondisi local (Hale et al., 2020). Oleh karena itu, pengembangan biochar di Indonesia sebaiknya tidak menggunakan pendekatan teknologi tunggal di seluruh wilayah. Berdasarkan berbagai hasil penelitian tersebut, biochar sebaiknya ditempatkan sebagai strategi komplementer, bukan sebagai pengganti penurunan emisi secara langsung. Roadmap NZE Indonesia tetap harus memprioritaskan transisi energi terbarukan, peningkatan efisiensi energi, elektrifikasi, pengurangan penggunaan batubara, perlindungan hutan dan gambut, serta dekarbonisasi sektor industri dan transportasi. Tantangan ketergantungan pada energi fosil, ketidakpastian regulasi, pengadaan energi terbarukan, serta kebutuhan investasi masih menjadi hambatan utama dalam proses transisi energi di Indonesia. Analisis terbaru mengenai jalur NZE Indonesia juga menunjukkan bahwa kombinasi energi terbarukan, elektrifikasi, efisiensi energi, dan teknologi penangkapan karbon diperlukan untuk mencapai dekarbonisasi yang mendalam (Zhong et al., 2025). Namun, strategi tersebut dapat diperluas dengan memasukkan pengelolaan karbon berbasis biomassa dan lahan, terutama biochar, sebagai bagian dari CDR nasional (Halimatussadiah et al., 2024).

SIMPULAN

Perubahan iklim adalah ancaman global yang memerlukan upaya kolektif dari seluruh negara untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan membatasi dampak negatifnya. Indonesia, dengan populasi yang besar dan pertumbuhan ekonomi yang cepat, menghadapi tantangan besar dalam mencapai target *Net Zero Emission* pada tahun 2060. Memahami tantangan-tantangan ini serta mengembangkan strategi yang efektif dan berkelanjutan merupakan langkah krusial untuk memenuhi komitmen internasional dan mencapai tujuan iklim nasional.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Lambung Mangkurat, atas dukungan akademik dan fasilitas yang diberikan dalam penyusunan artikel ini. Apresiasi juga disampaikan kepada seluruh pihak yang telah memberikan masukan, referensi, serta dukungan dalam proses pengembangan kajian mengenai strategi manajemen keberlanjutan, Net Zero Emission, dekarbonisasi, dan pemanfaatan biochar untuk mendukung ekonomi sirkular. Penulis juga mengapresiasi kontribusi para peneliti dan institusi yang hasil kajiannya menjadi landasan ilmiah dalam penyusunan artikel ini.

Referensi

- Aguilera, J., & Whigham, L. D. (2018). Using the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ carbon isotope ratio to characterise the emission sources of airborne particulate matter: a review of literature. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 54(6), 573–587. <https://doi.org/10.1080/10256016.2018.1531854>
- Amjad, I., Noor, R., Khalid, A., & Riaz, S. (2022). Polar Ice Caps Melting- A Hallmark to Vanishing Ice along with a Global Climate Change- and Addressing Solutions to it. *Journal of Environmental Science and Public Health*, 06(01), 135–144. <https://doi.org/10.26502/jesph.96120161>

- Anderson, T. R., Hawkins, E., & Jones, P. D. (2016). CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models. *Endeavour*, 40(3), 178–187. <https://doi.org/10.1016/j.endeavour.2016.07.002>
- Apriliyanti, I. D., Nugraha, D. B., & Overland, I. (2026). Explaining Indonesia's failed energy transition: Mapping power and support for decarbonization among government institutions and actors. *Energy Research & Social Science*, 135, 104675. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2026.104675>
- Arbye, S., Arianti, R. F., Pradana, Y. S., Suyono, E. A., Koerniawan, M. D., Suwanti, L. T., Siregar, U. J., & Budiman, A. (2020). The design of microalgae (*Chlorella* sp.) photobioreactor as a façade bus shelter building in Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, 2296(November). <https://doi.org/10.1063/5.0030408>
- Bardant, T. B., Haq, M. S., Setiawan, A. A. R., Harianto, S., Waluyo, J., Mastur, A. I., Lestari, A. D., Sujarwo, Sulaswatty, A., & Wiloso, E. I. (2018). The Renewability Indicator and Cumulative Degree of Perfection for Gamboeng Tea; Part.2, Exergy Calculation of Tea Factory. *J.Kim.Terap.Indones.*, 20(2), 79–89. <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/e3sconf/20187407003>
- Cahyono, W. E., Parikesit, Joy, B., Setyawati, W., & Mahdi, R. (2022). Projection of CO₂ emissions in Indonesia. *Materials Today: Proceedings*, 63, S438–S444. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.091>
- Campion, L., Bekchanova, M., Malina, R., & Kuppens, T. (2023). The costs and benefits of biochar production and use: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 408, 137138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137138>
- Chagas, J. K. M., Figueiredo, C. C. de, & Ramos, M. L. G. (2022). Biochar increases soil carbon pools: Evidence from a global meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 305, 114403. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114403>
- Chandra, I., Hidayat, D. S., & Iskandar, A. R. (2021). Monitoring IoT-based PM_{2.5} and CO₂ concentrations under a policy of “working from home” in telkom university, Bandung. *AIP Conference Proceedings*, 2320(March). <https://doi.org/10.1063/5.0037552>
- Cheng, W., Dan, L., Deng, X., Feng, J., Wang, Y., Peng, J., Tian, J., Qi, W., Liu, Z., Zheng, X., Zhou, D., Jiang, S., Zhao, H., & Wang, X. (2022). Global monthly gridded atmospheric carbon dioxide concentrations under the historical and future scenarios. *Scientific Data*, 9(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01196-7>
- Clarke, B., Otto, F., Stuart-Smith, R., & Harrington, L. (2022). Extreme weather impacts of climate change: an attribution perspective. *Environmental Research: Climate*, 1(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/2752-5295/ac6e7d>
- Cornelissen, G., Jubaedah, Nurida, N. L., Hale, S. E., Martinsen, V., Silvani, L., & Mulder, J. (2018). Fading positive effect of biochar on crop yield and soil acidity during five growth seasons in an Indonesian Ultisol. *Science of The Total Environment*, 634, 561–568. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.380>
- Dai, J., Ni, Y., Liu, Q., Wu, X., Yu, C., Gong, D., Hong, F., Zhang, Y., & Yan, Z. (2022). Carbon Dioxide and its Carbon Isotopic Composition of Natural Gas in the Sichuan Basin, SW China. *Frontiers in Earth Science*, 10(April), 1–14. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.857876>
- Dickson, D., Pockley, P., & Macilwain, C. (2000). Global warming identified as main threat to coral reefs. *Nature*, 407(October), 2000.
- Dlugokencky, E. J., Steele, L. P., Lang, P. M., & Masarie, K. A. (1994). The growth rate and distribution of atmospheric methane. *Journal of Geophysical Research*, 99(D8). <https://doi.org/10.1029/94jd01245>
- Forster, P. M., Walsh, T., Smith, C., Lamb, W. F., Lamboll, R., Cassou, C., Hauser, M., Hausfather, Z., Lee, J.-Y., Palmer, M. D., von Schuckmann, K., Slangen, A. B. A., Szopa, S., Trewin, B., Yun, J., Gillett, N. P., Jenkins, S., Matthews, H. D., Raghavan, K., ... Zhai, P. (2026). Indicators of Global Climate Change 2025: annual update of key indicators of

- the state of the climate system and human influence. *Earth System Science Data*, 18(6), 3889–3933. <https://doi.org/10.5194/essd-18-3889-2026>
- Hale, S. E., Nurida, N. L., Jubaedah, Mulder, J., Sørmo, E., Silvani, L., Abiven, S., Joseph, S., Taherymoosavi, S., & Cornelissen, G. (2020). The effect of biochar, lime and ash on maize yield in a long-term field trial in a Ultisol in the humid tropics. *Science of The Total Environment*, 719, 137455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137455>
- Halimatussadiyah, A., Kruger, W., Wagner, F., Afifi, F. A. R., Lufti, R. E. G., & Kitzing, L. (2024). The country of perpetual potential: Why is it so difficult to procure renewable energy in Indonesia? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 201, 114627. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114627>
- Hoffman, J. S., Keyes, D., & Titus, J. G. (1990). *Sources: BEnvironmental Protection Agency, reported in*. 138–153.
- IEA. (2022). *Indonesia's push to reach net zero emissions can help power a new phase in its economic development*. News - IEA. <https://www.iea.org/news/indonesia-s-push-to-reach-net-zero-emissions-can-help-power-a-new-phase-in-its-economic-development%0A%0A>
- Lefebvre, D., Fawzy, S., Aquije, C. A., Osman, A. I., Draper, K. T., & Trabold, T. A. (2023). Biomass residue to carbon dioxide removal: quantifying the global impact of biochar. *Biochar*, 5(1), 65. <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00258-2>
- Marx, W., Haunschild, R., & Bornmann, L. (2021). Heat waves: a hot topic in climate change research. *Theoretical and Applied Climatology*, 146(1–2), 781–800. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03758-y>
- Owsianiak, M., Lindhjem, H., Cornelissen, G., Hale, S. E., Sørmo, E., & Sparrevik, M. (2021a). Environmental and economic impacts of biochar production and agricultural use in six developing and middle-income countries. *Science of The Total Environment*, 755, 142455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142455>
- Owsianiak, M., Lindhjem, H., Cornelissen, G., Hale, S. E., Sørmo, E., & Sparrevik, M. (2021b). Environmental and economic impacts of biochar production and agricultural use in six developing and middle-income countries. *Science of The Total Environment*, 755, 142455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142455>
- Rennick, C., Arnold, T., Safi, E., Drinkwater, A., Dylag, C., Webber, E. M., Hill-Pearce, R., Worton, D. R., Bausi, F., & Lowry, D. (2021). Boreas: A Sample Preparation-Coupled Laser Spectrometer System for Simultaneous High-Precision in Situ Analysis of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^2\text{H}$ from Ambient Air Methane. *Analytical Chemistry*, 93(29), 10141–10151. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.1c01103>
- Rogge, K. S., & Reichardt, K. (2016). Policy mixes for sustainability transitions: An extended concept and framework for analysis. *Research Policy*, 45(8), 1620–1635. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2016.04.004>
- Sambodo, M. T., Yuliana, C. I., Hidayat, S., Novandra, R., Handoyo, F. W., Farandy, A. R., Inayah, I., & Yuniarti, P. I. (2022). Breaking barriers to low-carbon development in Indonesia: deployment of renewable energy. *Heliyon*, 8(4), e09304. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09304>
- Setyawan, H. Y., Sunyoto, N. M. S., Choirun, A., Musyaroh, M., & Arwani, M. (2024). The potential of biochar-slurry fuel from agricultural wastes in Indonesia. *Cogent Engineering*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2307201>
- Setyowati, A. B., & Quist, J. (2022). Contested transition? Exploring the politics and process of regional energy planning in Indonesia. *Energy Policy*, 165, 112980. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112980>
- Tasrif, A. (2021). *COP ke-26, Menteri ESDM Sampaikan Komitmen Indonesia Capai Net Zero Emission*. Kepala Biro Komunikasi, Layanan Informasi Publik, Dan Kerja Sama. Kementerian Energi Dan Sumber Daya Manusia. <https://migas.esdm.go.id/post/read/copke-26-menteri-esdm-sampaikan-komitmen-indonesia-capai-net-zero-emission%0A>

- Tavares, L., Smaoui, S., Pinilla, C. M. B., Ben Hlima, H., & Lopes Barros, H. (2022). Ginger: a systematic review of clinical trials and recent advances in encapsulation of its bioactive compounds. *Food & Function*, 13(3), 1078–1091. <https://doi.org/10.1039/D1FO02998C>
- United Nations. (2016). *Climate Change - United Nations Sustainable Development*.
- Wiloso, E. I., Setiawan, A. A. R., Praselia, H., Muryanto, Wiloso, A. R., Subyakto, Sudiana, I. M., Lestari, R., Nugroho, S., Hermawan, D., Fang, K., & Heijungs, R. (2020). Production of sorghum pellets for electricity generation in Indonesia: A life cycle assessment. *Biofuel Research Journal*, 7(3), 1178–1194. <https://doi.org/10.18331/BRJ2020.7.3.2>
- World Bank. (2021). *World Bank Group Climate Change Action Plan 2021 - 2025. Executive Summary*. World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/35799>
- Yoro, K. O., & Daramola, M. O. (2020). CO2 emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. In *Advances in Carbon Capture: Methods, Technologies and Applications*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819657-1.00001-3>
- Zhong, S., Su, B., He, J., & Ng, T. S. (2025). Moving towards a net-zero emissions economy in Indonesia. *Science of The Total Environment*, 1001, 180542. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180542>