

## DEKARBONISASI INDUSTRI DENGAN BIOCHAR DALAM AKSELERASI TUJUAN PEMBANGUNAN

Nurin Alwaaritsy<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Fisika, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim, Malang  
*Corresponding author: nurinalwaaritsy2003@gmail.com*

**ABSTRAK:** Dekarbonisasi industri merupakan langkah krusial dalam mencapai target emisi nol bersih di tengah pembangunan berkelanjutan. Biochar, produk pengolahan limbah dengan metode pirolisis yang berasal dari biomassa, menawarkan solusi potensial guna menekan emisi gas rumah kaca melalui operasional industri yang ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji potensi biochar dalam mendukung pencapaian SDGs di sektor industri. Penelitian ini dilakukan dengan basis studi pustaka guna mengeksplorasi berbagai penerapan biochar di industri, termasuk sebagai bahan bakar alternatif, agen penyerap karbon, dan bahan baku untuk produk ramah lingkungan. Dibahas pula manfaat biochar dalam meningkatkan efisiensi energi, mengurangi limbah industri, dan mendukung ekonomi sirkular dengan menerapkannya pada sejumlah industri. Secara khusus penelitian ini membahas implikasi penerapan biochar terhadap target emisi nol bersih dan pencapaian SDGs. Ditekankan bahwa biochar dapat menjadi katalisator transformasi industri menuju kelestarian lingkungan dan pembangunan ekonomi yang berkelanjutan. Namun, penerapan biochar masih dihadapkan pada beberapa tantangan, seperti standar yang tersertifikasi, tingginya biaya produksi, infrastruktur yang belum memadai, dan keterbatasan sumber daya manusia. Diperlukan upaya berkelanjutan untuk mengatasi tantangan ini dan mendorong pemanfaatan biochar secara optimal. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam memahami peran biochar dalam mendukung pencapaian SDGs di sektor industri. Temuan penelitian ini diharapkan dapat mendorong pengembangan dan implementasi kebijakan yang mendukung pemanfaatan biochar secara optimal untuk mencapai industri ramah lingkungan dan pembangunan berkelanjutan.

**Kata Kunci:** Biochar, *Net Zero Emission*, Industri, Pembangunan Berkelanjutan.

**ABSTRACT:** *Industrial decarbonization is a crucial step in achieving net-zero emissions targets amid sustainable development. Biochar, a pyrolysis-based waste treatment product derived from biomass, offers a potential solution to reduce greenhouse gas emissions through environmentally friendly industrial operations. This research aims to assess the potential of biochar in supporting the achievement of SDGs in the industrial sector. This research was conducted on the basis of a literature study to explore the various applications of biochar in industry, including as an alternative fuel, carbon sequestration agent, and raw material for environmentally friendly products. It also discusses the benefits of biochar in improving energy efficiency, reducing industrial waste, and supporting a circular economy by applying it to a number of industries. In particular, this research discusses the implications of biochar application for net-zero emission targets and the achievement of SDGs. It is emphasized that biochar can catalyze industrial transformation towards environmental sustainability and sustainable economic development. However, the application of biochar is still faced with several challenges, such as certified standards, high production costs, inadequate infrastructure, and limited human resources. Continuous efforts are needed to overcome these challenges and encourage optimal utilization of biochar. This research makes an important contribution in understanding the role of biochar in supporting the achievement of SDGs in the industrial sector. The findings of this research are expected to encourage the development and implementation of policies that support the optimal utilization of biochar to achieve environmentally friendly industries and sustainable development.*

**Keywords:** *Biochar, Net Zero Emission, Industry, Sustainable Development.*

### PENDAHULUAN

Net zero emission merupakan visi jangka panjang yang bisa direalisasikan dengan melaksanakan strategi jangka pendek. Target ini dilakukan dalam rangka

mempertahankan suhu global tidak naik melebihi 1,5°C melalui proses penurunan emisi hingga 42% (Olhoff & Christensen, 2023). Ada banyak peluang untuk memenuhi tujuan iklim global di berbagai bidang. Mengingat adanya kompleksitas dan tantangan di tengah pelaksanaan tujuan pembangunan berkelanjutan, menunjukkan bahwa diperlukannya sebuah pendekatan. Sebagai pilar ekonomi yang signifikan sekaligus sumber emisi termasuk CO<sub>2</sub>, industri menjadi salah satu pelaku yang potensial dalam mendukung tujuan pembangunan berkelanjutan. Hal ini sejalan dengan komitmen global dan nasional (SDGs) terutama pada tujuan point yang kedelapan tentang pekerjaan layak dan pertumbuhan ekonomi, tujuan kesembilan tentang industri, inovasi, dan infrastruktur, tujuan kedua belas tentang konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab), dan tujuan ketiga belas terkait aksi penangan iklim. Peran industri dalam pengembangan proyek ramah lingkungan perlu ditekankan.

Intergovernmental Panel on Climate Change menetapkan produk biochar sebagai teknologi untuk *net zero emission* yang efektif dalam konteks pembangunan berkelanjutan (Rogelj et al., 2022). Hasil penelitian terdahulu mengemukakan bahwa tiap giga ton biochar setara dengan  $2,2 \pm 0,4$  Gt CO<sub>2</sub>e per tahun. (Pant et al., 2023). Biochar bisa dijadikan alat dalam pembangunan berkelanjutan dengan menyisipkannya dalam sistem yang sudah berjalan di industri. Bahan bakunya yang fleksibel memungkinkan untuk diproduksi dari segala limbah organik sisa proses industri (Osman et al., 2022). Setiap industri memiliki produk biochar masing – masing. Selain mampu menangkap dan menyimpan karbon agar tidak lepas ke atmosfer, biochar juga memiliki kebermanfaatan yang berlaku bagi sektor ekonomi, lingkungan, maupun industri.

## METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan selama penelitian ini adalah studi literatur dengan cara mengumpulkan sebanyak - banyaknya data dari jurnal yang relevan dengan topik penelitian. Analisa data dilakukan dengan mengkaji potensi yang strategis sebagai upaya percepatan target pembangunan berkelanjutan menuju *net zero emission* dengan memfokuskan pada industri sebagai salah satu pelaksana target pembangunan berkelanjutan lewat biochar dengan menyoroti aspek kebermanfaatannya.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Dekarbonisasi

Dekarbonisasi dalam industri menjadi langkah pada kampanye *net zero emission* untuk mendorong pembangunan berkelanjutan. Aktivitas industrialisasi

yang semakin pesat turut meningkatkan limbah dan emisi (Liu et al., 2020). Sektor limbah yang telah berkontribusi pada emisi gas rumah kaca global berperan dalam mencapai netralitas karbon (emisi) melalui manajemen limbah terpadu (Kurniawan et al., 2023). Upaya mendorong pertumbuhan ekonomi yang kuat meningkatkan tantangan dalam pengelolaan limbah (Kurniawan et al., 2013) Penelitian ini bertujuan untuk mengintegrasikan industri dalam target pembangunan berkelanjutan sebagai langkah menuju dekarbonisasi menuju pencapaian net-zero emission pada tahun 2050 (Zhang et al., 2023)

Net zero emission dalam konteks pembangunan berkelanjutan dilaksanakan melalui upaya pengurangan emisi karbon yang mendukung adaptasi terhadap perubahan iklim lewat inovasi dalam pemakaian sumber daya untuk menciptakan efisiensi energi yang lebih baik. Net zero emission mengarahkan investasi pada sumber daya terbarukan. Targetnya, bisa tercipta keseimbangan lingkungan, ekonomi, dan kesejahteraan sosial (Liu et al., 2020).

Faktor ekonomi turut memegang peranan yang menonjol dalam pembangunan berkelanjutan terlebih bila mentargetkan *net zero emission* di masa depan (Hieu & Hai, 2023). Atas alasan ini tentu tidak mungkin diterapkan kebijakan yang membatasi operasional industri. Industri harus didorong untuk bisa berkembang semakin pesat, dengan tetap bertanggung jawab terhadap dampak lingkungan. Di satu sisi, aktivitas sehari – hari secara terus menerus berdampak pada kenaikan emisi secara signifikan. Kedepannya seluruh industri harus bisa menjadi media dalam tujuan *net zero emission* melalui pengembangan teknologi yang dapat menekan pelepasan CO<sub>2</sub> di udara. Sistem manajemen lingkungan yang baik dipilih sebagai pendekatan yang melibatkan ilmu pengetahuan dan teknologi di dalamnya. Teknologi penangkapan karbon memainkan peran penting dalam mengurangi emisi.

Penelitian mengenai inisiatif penurunan emisi masih terus berlanjut. Pengembangan sumber energi yang berkelanjutan sebagai solusi ramah lingkungan untuk memenuhi tujuan global saat ini menjadi salah satu fokus penelitian. Inovasi yang dihasilkan harus bisa dilaksanakan secara efisien sehingga investasi yang dibutuhkan rendah, mudah dikelola, namun tetap berdampak yang signifikan. Hal ini menjadi sebuah tantangan besar yang dihadapi peneliti.

Biochar dapat diandalkan sebagai salah satu alat untuk pengelolaan lingkungan (Elkhlifi et al., 2023). Biochar yang dihasilkan melalui pirolisis biomassa punya teknologi ganda untuk menunjang pergerakan lebih cepat mencapai *net zero emission*. Selain penangkapan CO<sub>2</sub> oleh bahan bakunya, biochar mampu menyimpan karbon

dalam jangka panjang dalam tanah serta meningkatkan kualitas lahan. Produk biochar pertama kali diperkenalkan oleh Peter Read, seorang profesor di bidang bioenergi, mitigasi perubahan iklim, dan pengelolaan tanah (Jha et al., 2023). Biochar dinilai sebagai penyerap polutan yang efektif dengan sifatnya yang berkelanjutan, hemat biaya, dengan bahan baku sederhana berbasis limbah biologis. Biochar didefinisikan sebagai zat yang diolah dengan perlakuan termal pirolitik atau anaerobik yang stabil dan kaya karbon (Mahdi et al., 2019). Bahan produksi biochar berupa limbah material organik yang bisa diperoleh dari sisa pertanian, perkebunan, industri, hingga makanan. Penerapan produk hasil teknologi ini relevan dengan target *net zero emission* efisiensinya yang tinggi dalam menghilangkan polutan. Pengembangan terhadap biochar menjadi topik yang dilirik oleh peneliti sebagai alternatif ramah lingkungan yang mampu menjadi mitigasi perubahan iklim (Jeyasubramanian et al., 2021).

### Implikasi Biochar bagi Sejumlah Industri

Strategi pengurangan emisi dan penghapusan karbon harus didukung oleh seluruh lapisan masyarakat dalam mencapai tujuan *net zero emission*. Meskipun upaya pengurangan emisi harus didahulukan untuk mengurangi tambahan karbon baru yang masuk ke atmosfer, penghapusan karbon juga tetap diperlukan untuk menangani sisa-sisa karbon yang sudah ada. Penghapusan karbon dapat membantu mencapai *net zero emission* dengan mengurangi konsentrasi CO<sub>2</sub> di atmosfer. Teknologi penghapusan karbon seperti biochar, direct air capture, dan teknik peningkatan penyimpanan karbon di tanah dapat digunakan untuk menyerap karbon dari atmosfer. Produk hasil pirolisis biomassa seperti serbuk kayu, jerami, dan limbah organik lainnya yang disebut mampu berkontribusi dalam menekan permasalahan iklim karena kemampuannya biochar bersifat fleksibel untuk diterapkan di berbagai sektor industri (Fawzy et al., 2021). Kedepannya bentuk biochar dapat terus berkembang dari setiap industri sesuai bidang usahanya.

#### 1. Pertanian

Penggunaan biochar dalam tanah memberikan keuntungan dalam mengurangi dampak perubahan iklim dan pengembangan hasil pertanian (Osman et al., 2021). Biochar adalah salah satu bentuk karbon yang sangat stabil sehingga mampu beradaptasi terhadap berbagai perubahan lingkungan (Kumar et al., 2022). Biochar dapat meningkatkan kualitas, kesuburan tanah, dan produktivitas tanaman. Penerapan biochar juga berkaitan erat dengan pengurangan emisi gas rumah kaca karena mencegah CO<sub>2</sub> terlepas ke udara (Fawzy et al., 2020). Bagi tanah, biochar meningkatkan aktivitas mikroba untuk memperbaiki kualitas kompos dan hasil tanaman.

Potensi aplikasi biochar terhadap kualitas dan produktivitas hasil panen memberikan kontribusi yang fundamental dalam menyongsong ekonomi berkelanjutan, Sehingga, dapat mendorong peningkatan efisiensi sektor pertanian yang berkelanjutan menuju *net zero emission* melalui langkah mitigasi perubahan iklim.

Studi mikroskopi elektron dan spektroskopi menunjukkan bahwa biochar menghasilkan partikel organomineral skala makro dan nano yang mengendap di permukaan daun tanaman yang diperlakukan. Kompleks organomineral nanoskala seperti karbon nanomaterial, TiO<sub>2</sub>, atau senyawa organomineral kaya Si atau aluminosilikat berperan dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman dan kinerja tanaman. Ekstrak biochar memiliki potensi untuk sebagai untuk nanofertilizer untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman dan hasil tanaman. Biochar tidak hanya berguna sebagai memperbaiki lahan tetapi juga dapat diterapkan langsung pada tanaman untuk meningkatkan produktivitas (Kumar et al., 2021).

#### 2. Peternakan

Di sektor peternakan, biochar diterapkan sebagai tambahan bahan pakan untuk hewan, biochar telah terbukti dapat mempercepat laju pertumbuhan hewan, mendukung keseimbangan mikrobiota usus, mengurangi produksi metana dari pencernaan, serta mengurangi toksin dalam tubuh hewan. Menambahkan biochar pada pakan dapat meningkatkan penyerapan nutrisi, kekebalan tubuh, metabolisme, serta mengurangi bakteri patogen sehingga pencernaan hewan menjadi lebih sehat (N. L. Willson et al., 2019). Mencampurkan biochar pada suplemen makanan hewan menurunkan kadar bakteri patogen pada unggas salah satunya *Campylobacter hepaticus* penyebab penyakit hati (N.-L. Willson et al., 2019).

Manfaat penggunaan biochar dalam sektor peternakan tentu mendukung pembangunan berkelanjutan menuju *net zero emission*. Dalam hal pola konsumsi dan produksi berkelanjutan melalui optimalisasi penggunaan sumber daya alam dan energi, Serta tindakan terhadap perubahan iklim melalui penurunan produksi metana dan gas penyumbang emisi gas rumah kaca lainnya ((Kalus et al., 2020) dari sisa sistem pencernaan hewan (Al-Azzawi et al., 2021).

#### 3. Konstruksi

Selama ini, biochar umum dikenal seperti pupuk untuk memperbaiki kualitas tanah. Ternyata, biochar juga dapat dikembangkan di bidang konstruksi untuk menciptakan pembangunan yang ramah lingkungan. Biochar sebagai pengunci karbon yang stabil dapat disimpan jangka panjang dalam bentuk bangunan (Fawzy et al., 2021).

Karakteristik biochar dengan kestabilan struktur kimia yang tinggi, konduksi termal rendah, dan tidak mudah terbakar menjadi pertimbangan bahwa biochar bisa dikembangkan untuk bahan material.

Stabilitas kimia biochar dapat menekan oksidasi dalam aspal atau beton sehingga dapat memperpanjang ketahanan bangunan. Konduktivitas termal yang rendah membantu mempertahankan suhu bangunan tetap stabil karena sifatnya sebagai isolator sehingga menekan potensi keretakan akibat ekspansi atau penyusutan saat perubahan suhu lingkungan yang ekstrem (Akinyemi & Adesina, 2020). Ditinjau dari sisi keamanan, bahan dengan konduktivitas termal yang rendah menjadikan bangunan lebih tahan terhadap percikan api (Gupta & Kua, 2017). Selain manfaatnya di aspek bangunan, sebagai reservoir karbon padat, emisi yang tersimpan dalam biochar tetap terikat dan tidak dilepaskan kembali ke atmosfer. Sehingga campuran biochar dalam bahan bangunan menawarkan potensi yang signifikan untuk mengurangi emisi karbon dioksida guna merealisasi lingkungan bebas polutan.

#### 4. Energi

Tidak hanya dengan metode pirolisis proses pembuatan biochar juga bisa dilakukan secara hydrothermal liquefaction (HTL). Metode ini mengubah biomassa basah langsung menjadi bio-crude dengan nilai kalor tinggi tanpa memerlukan proses pengeringan yang memakan energi. Produk utama yang dihasilkan berupa gas, biochar, dan bio oil. Bagi industri yang bergerak di bidang energi, bio-oil memiliki sifat kimia yang mirip dengan minyak mentah, sehingga cocok untuk digunakan sebagai bahan bakar transportasi seperti diesel, bensin, dan jet fuel. Produk HTL, termasuk biochar, yang diintegrasikan ke dalam infrastruktur energi yang ada menawarkan solusi energi yang lebih bersih dan berkelanjutan (Nguyen et al., 2024). Teknologi ini tidak hanya membantu mengurangi penggunaan bahan bakar fosil tetapi juga mengelola limbah biomassa secara efektif sehingga berkontribusi signifikan terhadap pengurangan emisi karbon untuk target *net zero emission*.

#### 5. Industri lainnya

Pengembangan biochar dapat diterapkan pada industri plastik dan elektronika, artinya tidak terbatas pada industri yang beroperasi dari bahan – bahan alam (Schmidt et al., 2019). Dalam industri plastik, biochar digunakan sebagai aditif untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuannya plastik. Produk biodegradable dapat menekan penggunaan plastik murni dengan produknya yang lebih tahan lama. Biochar dapat menyerap polutan sehingga produk plastik yang dihasilkan lebih ramah lingkungan. Di industri elektronik biochar dapat

digunakan sebagai bahan elektroda dalam baterai. Biochar berpotensi menghasilkan baterai dengan harga yang lebih ekonomis dan lebih awet waktu penggunaannya dibandingkan baterai lithium-ion tradisional. Sifatnya yang tahan api dan tahan lama menjadikannya pilihan yang ideal untuk digunakan sebagai bahan elektronik.

#### Peluang dan Tantangan Penerapan Biochar

Keuntungan atas ketersediaan, netralitas karbon, dan potensinya untuk mengurangi emisi, terdapat beberapa hambatan besar dalam teknologi biochar (Ahorsu et al., 2018). Skalabilitas metode konversi biomassa harus memenuhi persyaratan produksi skala industri (Anastopoulos et al., 2021). Metode konversi biomassa, mencakup pirolisis, gasifikasi, dan fermentasi harus bersertifikasi sesuai dengan standar untuk bisa menjadi serapan karbon. Terlebih, biomassa bersifat heterogen yang mana komposisi, kandungan air, dan sifat fisiknya berbeda (Yan et al., 2020). Sehingga ketika diterapkan tidak sepenuhnya punya tingkat kebermanfaatan yang sama.

Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan supaya diperoleh desain sistem yang efisien dari proyek berbasis biochar. Ada beberapa perspektif yang perlu dipertimbangkan untuk memastikan efektivitas dan efektivitas biayanya. Seperti dalam skala industri misalnya, pola adsorpsi lahan, interaksi antara akar tanaman, mikroba, struktur tanah, dan stabilitas biochar hingga jangka panjang yang tidak sama perlu dipelajari secara mendalam Hasilnya dapat dinyatakan sebagai siklus biogeokimia, nutrisi, dan dinamika pelepasan nutrisi di lingkungan tanah yang diperkaya dengan biochar (Holanda et al., 2023).

#### KESIMPULAN

Integrasi teknologi biochar secara luas dalam sektor industri, berpotensi terhadap percepatan transisi dalam pembangunan berkelanjutan menuju emisi nol bersih. Aksi ini turut berperan kepada komitmen global terhadap keberlanjutan dan aksi iklim. Kemampuannya untuk mereduksi karbon, meningkatkan kesuburan tanah, dan serapan nutrisi juga mampu berkontribusi terhadap penurunan emisi. Bahan produksi pembuatan biochar yang terjangkau dari sisa organik hasil produksi bisa diterapkan tanpa mempengaruhi sistem operasional industri yang sudah berjalan. Setiap bidang industri punya peluang untuk menciptakan biocharnya masing – masing. Pemanfaatan limbah organik lewat biochar turut membuka peluang ekonomi sirkular khususnya selama

pelaksanaan pembangunan berkelanjutan. Penerapan biochar masih dihadapkan oleh sejumlah tantangan baik segi teknologi, pengetahuan, biaya, hingga dampak pengolahan lain memerlukan penelitian dan inovasi secara terus menerus.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Ahorsu, R., Medina, F., & Constantí, M. (2018). Significance and Challenges of Biomass as a Suitable Feedstock for Bioenergy and Biochemical Production: A Review. *Energies*, *11*(12), 3366. <https://doi.org/10.3390/en11123366>
- Akinyemi, B. A., & Adesina, A. (2020). Recent advancements in the use of biochar for cementitious applications: A review. *Journal of Building Engineering*, *32*, 101705. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2020.101705>
- Al-Azzawi, M., Bowtell, L., Hancock, K., & Preston, S. (2021). Addition of Activated Carbon into a Cattle Diet to Mitigate GHG Emissions and Improve Production. *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 8254*, *13*(15), 8254. <https://doi.org/10.3390/SU13158254>
- Anastopoulos, I., Ighalo, J. O., Adaobi Igwegbe, C., Giannakoudakis, D. A., Triantafyllidis, K. S., Pashalidis, I., & Kalderis, D. (2021). Sunflower-biomass derived adsorbents for toxic/heavy metals removal from (waste) water. *Journal of Molecular Liquids*, *342*, 117540. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117540>
- Elkhlifi, Z., Iftikhar, J., Sarraf, M., Ali, B., Saleem, M. H., Ibranshabib, I., Bispo, M. D., Meili, L., Ercisli, S., Torun Kayabasi, E., Alemzadeh Ansari, N., Hegedúsová, A., & Chen, Z. (2023). Potential Role of Biochar on Capturing Soil Nutrients, Carbon Sequestration and Managing Environmental Challenges: A Review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su15032527>
- Fawzy, S., Osman, A. I., Doran, J., & Rooney, D. W. (2020). Strategies for mitigation of climate change: a review. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 18, Issue 6, pp. 2069–2094). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01059-w>
- Fawzy, S., Osman, A. I., Yang, H., Doran, J., & Rooney, D. W. (2021). Industrial biochar systems for atmospheric carbon removal: a review. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 19, Issue 4, pp. 3023–3055). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01210-1>
- Gupta, S., & Kua, H. W. (2017). Factors Determining the Potential of Biochar As a Carbon Capturing and Sequestering Construction Material: Critical Review. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *29*(9), 04017086. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001924](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001924)
- Hieu, V. M., & Hai, N. T. (2023). The role of environmental, social, and governance responsibilities and economic development on achieving the SDGs: evidence from BRICS countries. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, *36*(1), 1338–1360. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2022.2086598>
- Holanda, M. A. S., Coelho Menezes, J. M., Coutinho, H. D. M., & Teixeira, R. N. P. (2023). Effectiveness of biochar as an adsorbent for pesticides: Systematic review and meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, *345*, 118719. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.118719>
- Jeyasubramanian, K., Thangagiri, B., Sakthivel, A., Dhaweethu Raja, J., Seenivasan, S., Vallinayagam, P., Madhavan, D., Malathi Devi, S., & Rathika, B. (2021). A complete review on biochar: Production, property, multifaceted applications, interaction mechanism and computational approach. *Fuel*, *292*, 120243. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2021.120243>
- Jha, S., Gaur, R., Shahabuddin, S., & Tyagi, I. (2023). Biochar as Sustainable Alternative and Green Adsorbent for the Remediation of Noxious Pollutants: A Comprehensive Review. In *Toxics* (Vol. 11, Issue 2). MDPI. <https://doi.org/10.3390/toxics11020117>
- Kalus, K., Konkol, D., Korczyński, M., Koziel, J. A., & Opaliński, S. (2020). Effect of Biochar Diet Supplementation on Chicken Broilers Performance, NH3 and Odor Emissions and Meat Consumer Acceptance. *Animals 2020, Vol. 10, Page 1539*, *10*(9), 1539. <https://doi.org/10.3390/ANI10091539>
- Kumar, A., Joseph, S., Graber, E. R., Taherysoosavi, S., Mitchell, D. R. G., Munroe, P., Tsechansky, L., Lerdahl, O., Aker, W., & Sæbø, M. (2021). Fertilizing behavior of extract of organomineral-activated biochar: low-dose foliar application for promoting lettuce growth. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, *8*(1). <https://doi.org/10.1186/s40538-021-00222-x>
- Kumar, A., Singh, E., Mishra, R., & Kumar, S. (2022). Biochar as environmental armour and its diverse role towards protecting soil, water and air. *Science*

- of *The Total Environment*, 806, 150444. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.150444>
- Kurniawan, T. A., Othman, M. H. D., Liang, X., Goh, H. H., Gikas, P., Kusworo, T. D., Anouzla, A., & Chew, K. W. (2023). Decarbonization in waste recycling industry using digitalization to promote net-zero emissions and its implications on sustainability. *Journal of Environmental Management*, 338, 117765. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117765>
- Kurniawan, T. A., Puppim de Oliveira, J., Premakumara, D. G. J., & Nagaishi, M. (2013). City-to-city level cooperation for generating urban co-benefits: the case of technological cooperation in the waste sector between Surabaya (Indonesia) and Kitakyushu (Japan). *Journal of Cleaner Production*, 58, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.002>
- Liu, M., Tan, S., Zhang, M., He, G., Chen, Z., Fu, Z., & Luan, C. (2020). Waste paper recycling decision system based on material flow analysis and life cycle assessment: A case study of waste paper recycling from China. *Journal of Environmental Management*, 255, 109859. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109859>
- Mahdi, Z., El Hanandeh, A., & Yu, Q. J. (2019). Preparation, characterization and application of surface modified biochar from date seed for improved lead, copper, and nickel removal from aqueous solutions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(5), 103379. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2019.103379>
- Nguyen, V. G., Ho Tran, M., Paramasivam, P., Le, H. C., & Nguyen, D. T. (2024). Biomass: A Versatile Resource for Biofuel, Industrial, and Environmental Solution. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, 14(1).
- Olhoff, A., & Christensen, J. (2023). Context and Framing of the Emissions Gap Report 2023. In *Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again)*. United Nations Environment Programme. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/43922>
- Osman, A. I., Fawzy, S., Farghali, M., El-Azazy, M., Elgarahy, A. M., Fahim, R. A., Maksoud, M. I. A. A., Ajlan, A. A., Yousry, M., Saleem, Y., & Rooney, D. W. (2022). Biochar for agronomy, animal farming, anaerobic digestion, composting, water treatment, soil remediation, construction, energy storage, and carbon sequestration: a review. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 20, Issue 4, pp. 2385–2485). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01424-x>
- Osman, A. I., Hefny, M., Abdel Maksoud, M. I. A., Elgarahy, A. M., & Rooney, D. W. (2021). Recent advances in carbon capture storage and utilisation technologies: a review. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 19, Issue 2, pp. 797–849). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01133-3>
- Pant, D., Shah, K. K., Sharma, S., Bhatta, M., Tripathi, S., Pandey, H. P., Tiwari, H., Shrestha, J., & Bhat, A. K. (2023). Soil and Ocean Carbon Sequestration, Carbon Capture, Utilization, and Storage as Negative Emission Strategies for Global Climate Change. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(2), 1421–1437. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01215-5>
- Rogelj, J., Shindell, D., & Jiang, K. (2022). Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. In *Global Warming of 1.5°C* (pp. 93–174). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.004>
- Schmidt, H. P., Anca-Couce, A., Hagemann, N., Werner, C., Gerten, D., Lucht, W., & Kammann, C. (2019). Pyrogenic carbon capture and storage. *GCB Bioenergy*, 11(4), 573–591. <https://doi.org/10.1111/GCBB.12553>
- Willson, N. L., Van, T. T. H., Bhattarai, S. P., Courtice, J. M., McIntyre, J. R., Prasai, T. P., Moore, R. J., Walsh, K., & Stanley, D. (2019). Feed supplementation with biochar may reduce poultry pathogens, including *Campylobacter hepaticus*, the causative agent of Spotty Liver Disease. *PLOS ONE*, 14(4), e0214471. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0214471>
- Willson, N.-L., Van, T. T. H., Bhattarai, S. P., Courtice, J. M., McIntyre, J. R., Prasai, T. P., Moore, R. J., Walsh, K., & Stanley, D. (2019). Feed supplementation with biochar may reduce poultry pathogens, including *Campylobacter hepaticus*, the causative agent of Spotty Liver Disease. *PLOS ONE*, 14(4), e0214471. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214471>
- Yan, J., Oyedeji, O., Leal, J. H., Donohoe, B. S., Semelsberger, T. A., Li, C., Hoover, A. N., Webb, E., Bose, E. A., Zeng, Y., Williams, C. L., Schaller, K. D., Sun, N., Ray, A. E., & Tanjore, D. (2020). Characterizing Variability in Lignocellulosic Biomass: A Review. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(22),

8059–8085.

<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06263>

Zhang, M., Ma, N., & Yang, Y. (2023). Carbon Footprint Assessment and Efficiency Measurement of Wood Processing Industry Based on Life Cycle Assessment. *Sustainability (Switzerland)*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/su15086558>