

PEMANFAATAN BIOCHAR DALAM MENURUNKAN EMISI KARBON DI HUTAN INDUSTRI

Alfian Hayu Sudibya^{1*}, Stevy Canny Louhenapessy¹, Yudha Gusti Wibowo²

¹Program Studi Rekayasa Minyak dan Gas, Jurusan Teknologi Produksi dan Industri, Institut Teknologi Sumatera, Jl. Terusan Ryacudu, Way Huwi, Kec. Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan, Lampung 35365

²Program Studi Teknik Pertambangan, Jurusan Teknologi Produksi dan Industri, Institut Teknologi Sumatera, Jl. Terusan Ryacudu, Way Huwi, Kec. Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan, Lampung 35365

* Corresponding email: alfian.sudibya@staff.itera.ac.id

Riwayat Artikel

Diterima
21/03/2022
Disetujui
28/09/2022
Diterbitkan
30/09/2022

Abstrak

Indonesia memiliki hutan gambut tropis terbesar di dunia. Hutan menggunakan CO₂ untuk fotosintesis. Hutan berperan penting dalam menyerap karbon dalam suatu daerah. Tingginya pemekaran pembangunan juga memicu terjadinya pembukaan lahan di hutan tropis. Salah satu metode yang paling sering digunakan dalam pembukaan lahan adalah dengan cara pembakaran. Emisi karbon di hutan harus dihindarkan salah satunya menggunakan biochar. Biochar merupakan material kaya karbon yang dihasilkan dari proses pirolisis sederhana pada suhu rendah (100-300 °C). Material biochar merupakan ikatan rantai karbon yang dibuat dari biomasa. Pemanfaatan biochar telah banyak dilaporkan dalam penetralisir air tercemar dan sebagai penyerap karbon. Berbagai hasil riset yang dilakukan telah menguatkan fakta bahwa biochar merupakan material yang paling stabil dalam mencegah pelepasan karbon ke atmosfer. Biochar juga dilaporkan mampu meningkatkan kualitas tanah, meningkatkan hasil panen pada industri pertanian dan mampu menjaga kestabilan tanah dengan memperbaiki nilai *Dissolve Organic Carbon* (DOC) tanah. Pemanfaatan biochar juga akan meningkatkan perekonomian masyarakat di sekitar area industri apabila pemerintah mendorong dan melakukan pelatihan agar masyarakat di wilayah industri dapat memproduksi biochar dan menjualkan kepada perusahaan.

Kata Kunci: Biochar, Pelepasan Karbon, Hutan Industri.

Abstract

Indonesia has the largest tropical peat forest in the world. Forests use CO₂ for photosynthesis. Forests play an important role in absorbing karbon in an area. The high expansion of development also triggers land clearing in tropical forests. One of the most frequently used methods of clearing land is by burning. Carbon emissions in the forest must be avoided, one of which is using biochar. Biochar is a carbon-rich material produced from a simple pyrolysis process at low temperatures (100-300 °C). Biochar material is a carbon chain bond made from biomass. The use of biochar has been widely reported in neutralizing polluted water and as a carbon sink. Various research results have confirmed the fact that biochar is the most stable material in preventing the release of carbon into the atmosphere. Biochar is also reported to be able to improve soil quality, increase crop yields in the agricultural industry and be able to maintain soil stability by improving soil Dissolve Organic Carbon (DOC) values. The use of biochar will also improve the economy of the community around industrial areas if the government encourages and conducts training so that people in industrial areas can produce biochar and sell it to companies.

Keywords: Biochar, Carbon Emission, Industrial Forest.

1. Pendahuluan

Isi artikel memuat bagian Pendahuluan, Metode, Hasil dan Pembahasan, Kesimpulan, Ucapan Emisi karbondioksida (CO₂) ke lingkungan telah banyak

dilaporkan diseluruh dunia dan memberikan dampak terhadap perubahan iklim. Kegiatan industri pertambangan, asap kendaraan, pertanian, kehutanan dan industri manufaktur lainnya tercatat memberikan dampak yang paling signifikan

terhadap laju emisi karbon. Berbagai teknologi telah dikembangkan sebagai upaya penyerapan karbon sebesar 8,6 Pg.C/yr untuk menurunkan kenaikan suhu global [1]. Suhu rata-rata bumi diprediksi akan meningkat sebesar 1,5-5,8 °C pada abad ke-21 [2], bahkan setelah 11 tahun terakhir suhu permukaan bumi telah dilaporkan meningkat sebesar 0,8 °C [3], selain kenaikan suhu rata-rata global pelepasan karbon ke atmosfer juga dilaporkan menyebabkan kenaikan air laut sebesar 15-23 cm selama abad ke-20, selain itu kerusakan ekosistem dan kebakaran hutan juga menyebabkan semakin cepatnya laju emisi karbon di abad ke-20 [2]. Laju emisi karbon yang telah terjadi menyebabkan rusaknya lapisan ozon yang disebabkan oleh Gas Rumah Kaca (GRK). Kondisi ini telah dilaporkan terjadi sejak 1850 (awal periode revolusi industri) dan terus meningkat, sebuah penelitian melaporkan telah terjadi peningkatan 31% pada konsentrasi CO₂ pada tahun 2005.

Berbagai upaya telah dilakukan untuk menurunkan laju emisi CO₂ di seluruh dunia. Berbagai kepala negara telah sepakat melalui Konferensi Perubahan Iklim Perserikatan Bangsa-Bangsa atau yang juga dikenal sebagai Paris 2015 UN Climate Change Conference (COP21-CMP11) yang diselenggarakan di Paris pada 30 November hingga 12 Desember 2015. Berbagai peneliti di seluruh dunia juga turut mengambil peran dalam penurunan laju emisi karbon. Sebuah penelitian melaporkan bahwa material karbon yang dipirolisis secara sederhana dapat menjadi strategi penyerapan karbon. Penelitian tersebut melaporkan bahwa emisi karbon pada tanah yang diberikan biochar mengalami penurunan secara signifikan, penelitian ini juga melaporkan bahwa potensi penggunaan biochar mampu menurunkan emisi karbon sebesar 1000 Mg/yr hingga 50 tahun [4]. Penelitian lain juga melaporkan bahwa biochar telah berhasil menurunkan laju emisi karbon sekaligus menurunkan parameter pencemar pada tanah dan air [5]. Biochar bahkan dilaporkan sangat efektif untuk digunakan pada tanah yang bersifat asam maupun basa [6]. Kemampuan biochar yang sangat baik dalam menurunkan laju emisi karbon disebabkan karena biochar memiliki rantai karbon yang sangat stabil, kondisi ini menyebabkan biochar mampu menahan lebih banyak karbon bahkan dalam kondisi cuaca ekstrem.

Meskipun berbagai penelitian telah menjelaskan potensi pemanfaatan biochar sebagai penangkap karbon, namun pemanfaatannya masih sangat jarang digunakan. Selain itu, bahan dasar dalam membuat biochar masih terbatas pada tempurung kelapa [7]. Selain sulitnya mendapatkan bahan baku tempurung kelapa, tempurung kelapa juga merupakan komoditas ekspor dan dapat dimanfaatkan menjadi kerajinan bernilai ekonomi tinggi. Belum banyak penelitian yang melaporkan

bahwa biochar berhasil dibuat dari tandan kosong kelapa sawit atau material lain berbahan karbon yang banyak dijumpai di wilayah perkebunan sawit dan perkebunan industri lainnya. Artikel ini akan membahas secara komprehensif dan holistik terkait potensi pemanfaatan limbah organik tandan kosong kelapa sawit dan bahan organik lainnya yang dapat diubah menjadi biochar. Pemanfaatan limbah padat organik dari hutan industri tidak hanya akan menurunkan biaya pengolahan limbah, namun juga akan memberikan dampak baik terhadap penyerapan karbon di lingkungan.

2. Diskusi

2.1. Kebakaran Hutan

Indonesia memiliki hutan gambut tropis terbesar di dunia yaitu sebesar 65% dari total di dunia [8]. Hutan gambut tropis ini berguna untuk menjaga keseimbangan karbon terestrial dunia. Tingginya kebutuhan akan pangan memaksa masyarakat untuk melakukan pembukaan lahan. Selain itu pemekaran pembangunan juga memicu terjadinya pembukaan lahan di hutan tropis. Salah satu metode yang paling sering digunakan dalam pembukaan lahan adalah dengan cara pembakaran. Pembukaan lahan dengan cara dibakar memang lebih hemat biaya dibandingkan dengan pembukaan lahan dengan cara pemotongan. Malahan pembakaran lahan menghasilkan abu yang berguna sebagai tambahan nutrisi untuk tanah. Untuk mengurangi emisi karbon dari pembakaran hutan, maka lebih baik dilakukan dengan *clear cutting* atau dipotong menggunakan alat. Jika akan buka lahan, sebaiknya tidak boleh di hutan hujan. Diarahkan ke padang rumput dan lahan terdegradasi.

Selain ada pembakaran hutan secara sengaja, kebakaran hutan juga bisa terjadi secara alami. Hal ini disebabkan oleh suhu yang sangat tinggi. Kebakaran hutan alami bisa disebabkan oleh beberapa faktor seperti jenis hutan, topografi, Cuaca dan lingkungan sekitar hutan [9]. Pada jenis hutan dipengaruhi jenis tanaman yang mengisi hutan tersebut. Selain itu kerapatan antar tumbuhan juga mempengaruhi kemungkinan api untuk menyebar. Faktor topografi yang mempengaruhi kemungkinan kebakaran hutan adalah kemiringan lahan karena berpengaruh pada arah angin dan rambatan api. Cuaca di musim kemarau tentu lebih berpotensi untuk terjadi kebakaran hutan dibanding musim hujan. Semakin tinggi kelembaban di hutan maka potensi terjadi kebakaran juga semakin kecil. Kecepatan angin juga memperbesar potensi terjadinya kebakaran hutan karena mempengaruhi kecepatan api untuk merambat. Semua aspek lingkungan di sekitar hutan berupa sungai akan memperkecil potensi kebakaran hutan.

Ada bermacam-macam partikel yang diemisikan saat kebakaran hutan terjadi. Cara untuk

mendeteksi apakah partikel tersebut berasal dari kebakaran hutan atau sumber api lainnya, seperti polusi kendaraan, pembakaran sampah, atau pembakaran dari pabrik. Maka Kadir et.al mengembangkan *sensing system* untuk menghitung partikel berdasarkan jumlah dan ukuran [10]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kebakaran hutan menghasilkan emisi partikel yang lebih tinggi dan lebih besar dibandingkan emisi dari proses pembakaran lain. Bahan-bahan yang terbakar saat kebakaran hutan kebanyakan berasal dari ranting dan daun. Sehingga dibandingkan sumber api lainnya, intensitas kabut yang dihasilkan dari kebakaran hutan cenderung lebih kecil. Faktor yang menambah emisi karbon adalah kecepatan angin. Semakin tinggi kecepatan angin, maka karbon yang terdeteksi juga semakin banyak pula. Sumber lain yang memiliki cukup besar adalah pembakaran sampah.

2.2. Pelepasan Karbon

Karbon adalah salah satu unsur paling penting di bumi. Mulai dari Tanaman, mineral, bahan bakar, bahkan manusia mengandung karbon. Sayangnya laju pelepasan karbon lebih besar dari laju pembentukan karbon. Pelepasan karbon bisa berasal dari berbagai macam aktivitas, mulai dari pemakaian bahan bakar pembangkit listrik, konstruksi bangunan, sampai pembukaan lahan di hutan tropis.

Karbon dioksida merupakan unsur yang sangat berpengaruh pada *Global Warming*. Bahkan Karbon dioksida dijadikan standar pengukuran potensi *global warming* atau *global warming potential* (GWP) oleh IPCC. Berkurangnya hutan salah satunya untuk keperluan infrastruktur manusia. Deforestasi mengakibatkan karbon emisi yang memiliki dampak multidimensi pada kehidupan manusia.

Pelepasan karbon di hutan juga dipengaruhi musim dan jenis hutan. Musim hujan mempengaruhi emisi CO₂ saat *growing season* pada tangkapan lahan basa [11]. Lahan ini biasanya berada lebih rendah dibanding bagian hutan lainnya sehingga menjadi area berkumpulnya air yang berasal dari area yang lebih tinggi. Area hutan yang lebih tinggi juga mengalirkan *Dissolve Organic Carbon* (DOC) dan *Dissolve Organic Nitrogen* (DON). Hal ini juga mempengaruhi tingginya emisi CO₂ di hutan lahan basah.

Hutan menggunakan CO₂ untuk fotosintesis. Namun Tumbuhan juga mengeluarkan CO₂ saat malam hari dalam proses respirasi. Meskipun demikian, hutan tetap berperan penting dalam menyerap karbon dalam suatu daerah. Hutan mampu menyerap karbon dioksida sebanyak 34,49

juta ton CO₂ [12]. Jauh lebih besar dibandingkan lahan pertanian yang mampu menyerap karbon dioksida sebanyak 2,29 juta ton CO₂. Sedangkan daerah lain seperti padang rumput, lahan basah, pemukiman dan daerah lain di luar itu malah mengeluarkan emisi berturut-turut sebesar 0,58 juta ton CO₂, 0,97 juta ton CO₂, 0,97 juta ton CO₂, dan 15,3 ribu ton CO₂. Dengan laju deforestasi yang semakin besar, tentu potensi penyerapan karbon juga akan semakin berkurang.

3. Pembahasan

3.1. Efek Biochar pada Pelepasan Karbon

Biomassa merupakan material karbon yang berasal dari tumbuhan atau organisme yang berasal dari karbon. Karbon pada biomassa dapat disimpan selama lebih dari 100 tahun dengan mengubahnya biomasa menjadi biochar. Biochar dibuat dengan memanfaatkan proses termokimia seperti gasifikasi, pirolisis dan karbonasi. Perbedaan perlakuan pada pembuatan biochar berbahan biomasa adalah temperatur yang digunakan pada saat proses pirolisis berlangsung, proses pembuatan biochar dari biomasa banyak dikembangkan diseluruh dunia sebagai upaya dalam mencegah pelepasan emisi karbon untuk mencegah terjadinya perubahan iklim [13]. Aplikasi biochar pada tanah dilaporkan sebagai upaya mitigasi paling sederhana dan efektif dalam mencegah perubahan iklim dan perlindungan lingkungan, biochar juga mampu menyerap karbon, sebagai mitigasi emisi GRK, remediasi dan konservasi tanah serta mampu meningkatkan hasil panen pertanian [14]. Biochar merupakan material kaya karbon yang dapat dibuat dari seluruh material dengan bahan dasar karbon. Pembuatan biochar dengan menggunakan limbah padat kaya karbon pada industri yang memanfaatkan tumbuhan merupakan Langkah yang sangat baik untuk menurunkan emisi karbon. Pemanfaatan biochar pada lahan sawit akan membantu menstabilkan karbon organik tanah sehingga akan meningkatkan kestabilan dan kualitas tanah. Disisi lain, penggunaan biochar pada hutan tanaman industri juga akan mampu meningkatkan kadar serapan karbon sehingga akan sama baiknya dengan hutan alami. Pemanfaatan biochar sebagai penyerap karbon mengasumsikan bahwa karbon stabil dalam biochar dihasilkan dari biomasa dan akan stabil dibawah permukaan tanah hingga ribuan tahun

Peningkatan struktur karbon aromatik dengan peningkatan suhu hidrolisis juga dapat meningkatkan resistivitas terhadap dekomposisi mikroba. Namun, biochar yang dipirolisis pada suhu yang relatif lebih rendah menunjukkan aktivitas yang lebih baik di tanah dan memiliki afinitas permukaan yang lebih tinggi terhadap air karena rasio O=C molar yang lebih tinggi; Tekstur tanah harus selalu

diperhatikan karena pengaruh biochar terhadap peningkatan pH, SOC, KTK, dan beberapa unsur hara seperti N, P, dan K hanya signifikan pada kondisi tanah yang khas. Biasanya, biochar yang diubah menjadi tanah kasar menunjukkan efek perbaikan yang lebih baik sebagai agen penyerapan karbon. Namun, efek jangka panjang dari biochar pada emisi gas rumah kaca, termasuk CH₄, CO₂, dan N₂O masih memerlukan studi lebih lanjut. Umumnya, studi tentang kombinasi sifat-sifat biochar dan efek amandemennya tidak mencukupi, dan saat ini hanya tersedia sejumlah kecil hasil pot jangka pendek atau studi lapangan yang terbatas pada periode 1-2 tahun. Tinjauan ini menyoroiti perlunya upaya penelitian strategis yang akan menggabungkan efek biochar yang diterapkan pada tanah dengan rincian tentang karakteristik biochar dan tanah yang akan diubah, memungkinkan penjelasan mekanisme yang dibedakan oleh faktor lingkungan dan pengelolaan, dan juga mencakup studi yang terjadi selama periode waktu yang lebih lama [15].

Seiring dengan banyaknya laporan terkait peningkatan emisi gas CO₂ dan dampaknya terhadap perubahan iklim, pemanfaatan biochar secara masif sangat diperlukan. Sisa residu dari aktivitas pemotongan kayu sering dibakar sehingga menimbulkan emisi CO₂ yang banyak. Pengolahan sisa residu menjadi biochar dapat mengurangi dampak lingkungan berupa emisi CO₂ (sebesar 2 sampai dengan 40 kali lebih rendah) daripada pembakaran sisa residu [16]. Menurut data yang dihimpun oleh International Energy Agency (IEA) emisi gas CO₂ dapat diturunkan hingga 30% apabila seluruh lapisan masyarakat bersedia untuk menurunkan emisi CO₂ dan memanfaatkan biochar sebagai solusi dari penyerapan karbon. Berbagai negara di dunia yang masih menggunakan batu bara sebagai sumber energi telah menyumbangkan emisi karbon yang sangat tinggi. China sebagai salah satu negara pengguna batu bara dilaporkan telah melepaskan emisi karbon sebesar 266 t/t atau setara dengan 1,24 kali lebih tinggi dari emisi karbon yang dilepaskan dari industri minyak bumi dan 1,6 kali lebih besar dari emisi karbon gas alam. Pada tahun 2018, produksi batu bara di Tiongkok adalah 3,68 miliar ton dengan peningkatan tahun-ke-tahun sebesar 4,5%, dan konsumsi batu bara menyumbang sekitar 58% dari konsumsi energi primer Tiongkok [6]. Pada tahun yang sama, emisi CO₂ mencapai 9,428 miliar ton (yaitu tingkat pertumbuhan tahunan rata-rata 2,2%), jauh lebih tinggi daripada rata-rata global. Penangkapan dan penyimpanan karbon dianggap sebagai cara yang paling ekonomis dan layak untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan mengurangi efek rumah kaca dalam skala besar dalam waktu singkat di masa depan [7], dan juga merupakan cara yang paling potensial untuk mencapai pengurangan emisi CO₂

yang efektif dalam skala besar. Dapat dikatakan bahwa tingkat kapasitas penangkapan karbon dioksida saat ini jauh dari yang dibutuhkan. Ini telah menjadi sumber energi terbesar keempat setelah batu bara, minyak dan gas alam, menyumbang 9,5% dari pasokan energi primer global dan 69,5% dari pasokan energi terbarukan. Cina adalah negara dengan pertanian dan populasi yang besar, dan memiliki cadangan sumber daya biomassa yang kaya, terutama termasuk bahan jerami selama proses produksi pertanian dan kehutanan, seperti pertanian dan kehutanan, limbah peternakan, polutan organik perkotaan, dan sebagainya. Total konsumsi energi negara saya telah mencapai 4,49 miliar standar batu bara pada 2019, dan total konsumsi energi. Di antara mereka, biochar yang diperoleh dengan teknologi konversi kimia dapat mendorong penangkapan karbon tanah karena efek lingkungannya yang unik, yang sangat penting untuk perbaikan tanah dan pengurangan emisi gas rumah kaca .

Tanah yang minim unsur hara akan sulit menahan air. Tanah yang memiliki kadar air yang rendah akan mudah mengalami retak. Akibatnya kekuatan tanah akan meningkat menjadi semakin keras. Hal itu bisa mempersulit akar tanaman dalam menerobos tanah sehingga pertumbuhannya terhambat. Pemanfaatan biochar dapat mengurangi pola retak dan penyusutan tanah [17]. Dari aspek sosial, persepsi masyarakat tentang teknologi baru sangat berpengaruh. Teknologi yang sudah terbukti mampu meningkatkan ekonomi masyarakat akan lebih mudah diterima. Bahkan masyarakat akan rela dengan sendirinya mempromosikan teknologi tersebut. Maka dari itu, perlu dilakukan sosialisasi tentang biochar kepada masyarakat agar tumbuh persepsi yang jelas tentang manfaat biochar. Pemerintah berperan menjadi regulator bagi alur suplai biochar. Perusahaan diwajibkan membeli biochar yang diproduksi masyarakat. Sehingga ekonomi dari masyarakat bisa berkembang serta meningkatkan lapangan kerja baru [18]. Biaya pembuatan biochar tergantung berbagai aspek mulai dari sumber bahan baku biochar, proses pembuatan, bahan bakar sampai biaya tenaga kerja. Harga biochar New Zealand sekitar 2000 rupiah per kilogram. Bahkan untuk penggunaan yang lebih spesifik, proses pembuatan biochar juga memerlukan modifikasi khusus yang artinya juga menambah biaya dalam proses pembuatan [18]. Namun jika telah diaplikasikan dalam kesuburan tanaman, biochar memiliki nilai ekonomis yang lebih tinggi. Lahan yang diberi biochar terbukti mampu meningkatkan hasil panennya [19]. Aplikasi biochar pada lahan perkebunan alpukat memberikan keuntungan sebesar 123 Juta Rupiah per hektar. Sedangkan biaya biochar hanya 1,5 Juta Rupiah per ton [20]. Seluruh hasil riset yang telah disampaikan pada artikel ini diharapkan mampu menjadi dasar

pemerintah dalam mengambil Langkah guna menerapkan regulasi pemanfaatan biochar untuk meminimalkan pelepasan karbon ke atmosfer.

4. Kesimpulan

Biochar merupakan material kaya karbon yang dihasilkan dari proses pirolisis sederhana pada suhu rendah (100-300 °C). Material biochar merupakan ikatan rantai karbon yang dibuat dari biomassa. Pemanfaatan biochar telah banyak dilaporkan dalam penetralisir air tercemar dan sebagai penyerap karbon. Berbagai hasil riset yang dilakukan telah menguatkan fakta bahwa biochar merupakan material yang paling stabil dalam mencegah pelepasan karbon ke atmosfer. Biochar juga dilaporkan mampu meningkatkan kualitas tanah, meningkatkan hasil panen pada industri pertanian dan mampu menjaga kestabilan tanah dengan memperbaiki nilai DOC tanah. Arah riset selanjutnya harus berfokus pada strategi hilirisasi hasil riset pemanfaatan biochar sebagai bahan penyerap karbon. Selain itu, rekomendasi kebijakan yang dikeluarkan Pemerintah Daerah maupun Pemerintah Pusat harus terpadu dan bersama-sama mendorong industri untuk dapat menggunakan biochar pada lahan mereka (khususnya industri yang bergerak pada sektor pertanian dan kehutanan). Dukungan dari pemerintah, peneliti dan masyarakat diharapkan mampu menjawab tantangan dunia terkait perubahan iklim yang disebabkan oleh pelepasan karbon ke lingkungan. Pemanfaatan biochar juga akan meningkatkan perekonomian masyarakat di sekitar area industri apabila pemerintah mendorong dan melakukan pelatihan agar masyarakat di wilayah industri dapat memproduksi biochar dan menjualkan kepada perusahaan.

Ucapan Terima Kasih

Bagian ini bersifat opsional. Apabila ada, maka ucapan terima kasih ditujukan kepada institusi yang telah memberi dukungan finansial terhadap penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] R. Lal, "Carbon sequestration," *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.*, vol. 363, no. 1492, pp. 815–830, Feb. 2008, doi: 10.1098/rstb.2007.2185.
- [2] D. Reay, C. Sabine, P. Smith, and G. Hymus, "Spring-time for sinks," *Nature*, vol. 446, no. 7137, pp. 727–728, Apr. 2007, doi: 10.1038/446727a.
- [3] J. W. Sperling and R. H. Cofield, "Total shoulder arthroplasty after attempted shoulder arthrodesis: report of three cases," *J. Shoulder Elb. Surg.*, vol. 12, no. 3, pp. 302–305, May 2003, doi: 10.1016/S1058-2746(02)86826-4.
- [4] D. Muhammad, "Biomaterial Biochar for Soil Carbon Sequestration Strategy and Its Future Prospects," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 391, no. 1, p. 012014, Dec. 2019, doi: 10.1088/1755-1315/391/1/012014.
- [5] T. M. Abdel-Fattah, M. E. Mahmoud, S. B. Ahmed, M. D. Huff, J. W. Lee, and S. Kumar, "Biochar from woody biomass for removing metal contaminants and carbon sequestration," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 22, pp. 103–109, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.jiec.2014.06.030.
- [6] H. Gong, Y. Li, and S. Li, "Effects of the interaction between biochar and nutrients on soil organic carbon sequestration in soda saline-alkali grassland: A review," *Glob. Ecol. Conserv.*, vol. 26, p. e01449, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.gecco.2020.e01449.
- [7] D. Castilla-Caballero et al., "Experimental data on the production and characterization of biochars derived from coconut-shell wastes obtained from the Colombian Pacific Coast at low temperature pyrolysis," *Data Br.*, vol. 28, p. 104855, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.dib.2019.104855.
- [8] S. E. PAGE, J. O. RIELEY, and C. J. BANKS, "Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool," *Glob. Chang. Biol.*, vol. 17, no. 2, pp. 798–818, Feb. 2011, doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02279.x.
- [9] F. Sari, "Forest fire susceptibility mapping via multi-criteria decision analysis techniques for Mugla, Turkey: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS," *For. Ecol. Manage.*, vol. 480, p. 118644, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.foreco.2020.118644.
- [10] E. Abdul Kadir, S. Listia Rosa, A. Syukur, M. Othman, and H. Daud, "Forest fire spreading and carbon concentration identification in tropical region Indonesia," *Alexandria Eng. J.*, vol. 61, no. 2, pp. 1551–1561, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.aej.2021.06.064.
- [11] W. Ouyang et al., "Rainfall stimulates large carbon dioxide emission during growing season in a forest wetland catchment," *J. Hydrol.*, vol. 602, p. 126892, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126892.
- [12] L. Q. Hung, T. Asaeda, and V. T. P. Thao, "Carbon emissions in the field of land use, land use change, and forestry in the Vietnam mainland," *Wetl. Ecol. Manag.*, vol. 29, no. 2,

- pp. 315–329, Apr. 2021, doi: 10.1007/s11273-021-09789-6.
- [13] L. Leng, H. Huang, H. Li, J. Li, and W. Zhou, “Biochar stability assessment methods: A review,” *Sci. Total Environ.*, vol. 647, pp. 210–222, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.402.
- [14] J. Lehmann, J. Gaunt, and M. Rondon, “Biochar Sequestration in Terrestrial Ecosystems – A Review,” *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.*, vol. 11, no. 2, pp. 403–427, Mar. 2006, doi: 10.1007/s11027-005-9006-5.
- [15] T. Xie, B. Y. Sadasivam, K. R. Reddy, C. Wang, and K. Spokas, “Review of the Effects of Biochar Amendment on Soil Properties and Carbon Sequestration,” *J. Hazardous, Toxic, Radioact. Waste*, vol. 20, no. 1, p. 04015013, Jan. 2016, doi: 10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000293.
- [16] M. Puettmann, K. Sahoo, K. Wilson, and E. Oneil, “Life cycle assessment of biochar produced from forest residues using portable systems,” *J. Clean. Prod.*, vol. 250, p. 119564, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119564.
- [17] C. WEI, W. GAO, W. R. WHALLEY, and B. LI, “Shrinkage Characteristics of Lime Concretion Black Soil as Affected by Biochar Amendment,” *Pedosphere*, vol. 28, no. 5, pp. 713–725, Oct. 2018, doi: 10.1016/S1002-0160(18)60041-4.
- [18] M. Kamali, N. Sweygers, S. Al-Salem, L. Appels, T. M. Aminabhavi, and R. Dewil, “Biochar for soil applications-sustainability aspects, challenges and future prospects,” *Chem. Eng. J.*, vol. 428, p. 131189, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.cej.2021.131189.
- [19] O. Das, D. Bhattacharyya, and A. K. Sarmah, “Sustainable eco e composites obtained from waste derived biochar : a consideration in performance properties , production costs , and environmental impact,” *J. Clean. Prod.*, vol. 129, pp. 159–168, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.088.
- [20] S. Joseph *et al.*, “Biochar increases soil organic carbon, avocado yields and economic return over 4 years of cultivation,” *Sci. Total Environ.*, vol. 724, p. 138153, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138153.