



Penggunaan Biochar untuk Meningkatkan Kualitas Tanah pada Sistem Pertanian Berkelanjutan

Tuti Ariani Bawamenewi ^{1*}, Friska Hastika Gea ², Septenius Waruwu ³

¹⁻³ Universitas Nias, Indonesia

Email : tutibawamenewi@gmail.com ^{1*}, friskahastika123@gmail.com ², niusw53@gmail.com ³

Abstract, *This research is about the influence of biochar, a carbon-rich material from biomass pyrolysis, on soil quality in a sustainable agricultural system. Biochar plays an important role in increasing soil organic content, improving soil structure, increasing crop productivity, and reducing greenhouse gas emissions. Research results show that biochar application can increase air and nutrient retention, improve soil biological activity, and reduce dependence on chemical fertilizers. In addition, biochar contributes to climate change mitigation through carbon storage and reduces dependence on chemical fertilizers. Thus, biochar has great potential as an innovative solution to support productive and environmentally friendly agriculture. Biochar also helps to create a more productive and environmentally friendly farming system, making it relevant as an innovative solution in supporting agriculture.*

Keywords: *Biochar, Soil Quality, Sustainable Agriculture.*

Abstrak, Penelitian ini merupakan pengaruh biochar, bahan kaya karbon hasil pirolisis biomassa, terhadap kualitas tanah dalam sistem pertanian berkelanjutan. Biochar berperan penting dalam meningkatkan kadar organik tanah, memperbaiki struktur tanah, meningkatkan produktivitas tanaman, serta mengurangi emisi gas rumah kaca. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aplikasi biochar dapat memperbaiki retensi udara dan nutrisi, meningkatkan aktivitas biologis tanah, serta mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia. Selain itu, biochar berkontribusi dalam mitigasi perubahan iklim melalui penyimpanan karbon dan mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia. Dengan demikian, biochar memiliki potensi besar sebagai solusi inovatif untuk mendukung pertanian yang produktif dan ramah lingkungan. Biochar juga membantu menciptakan sistem pertanian yang lebih produktif dan ramah lingkungan, sehingga relevan sebagai solusi inovatif dalam mendukung pertanian.

Kata kunci : Biochar, Kualitas Tanah, Pertanian Berkelanjutan.

1. PENDAHULUAN

Lahan pertanian di Indonesia mengalami degradasi dan kerusakan tanah yang mengakibatkan menurunnya produktivitas hasil tanaman. Biochar atau disebut dengan arang merupakan produk kaya karbon yang diperoleh dari biomassa, diantaranya kayu, pupuk kandang atau daun dipanaskan dalam wadah tertutup (container) dengan sedikit atau tanpa udara yang tersedia. Istilah yang lebih teknis, biochar diproduksi melalui dekomposisi termal dari bahan organik dengan pasokan oksigen yang terbatas (O₂) dan pada suhu yang relatif rendah (< 700°C). Biochar disebut juga arang merupakan produk yang dihasilkan ketika limbah biomassa (limbah pertanian) dipanaskan tanpa udara atau dengan udara yang sangat sedikit. Proses pembuatan arang ini sering disebut pyrolysis. Bahan baku yang bisa digunakan untuk pembuatan biochar adalah sampah biomassa yang tidak dimanfaatkan yaitu: sekam padi, tongkol jagung, kulit buah cokelat, cangkang kemiri, kulit kopi, limbah gergaji kayu, ampas daun

minyak kayu putih, ranting kayu seperti pada limbah sisa pakan ternak, tempurung kelapa, dan lain sejenisnya.

Pemanfaatan sekam padi menjadi biochar menjadi salah satu inovasi yang dapat diaplikasikan pada petani untuk mengatasi permasalahan di bidang pertanian, seperti mengurangi tingkat keasamaan tanah, meningkatkan produktivitas tanaman pangan, dan simpanan cadangan karbon untuk mengatasi masalah lingkungan global. biochar dapat dihasilkan dari proses atau sistem pirolisis atau gasifikasi. Biochar dihasilkan dari ketiadaan oksigen dengan menggunakan panas dari luar, sedangkan dengan sistem gasifikasi hanya sedikit biochar yang dihasilkan. Bahan dasar yang digunakan dalam pembakaran (pirolisis) dapat berupa berbagai jenis dan biomassa organik. Residu biomassa pertanian atau kehutanan. Proses produksi biochar dapat optimal apabila berlangsung dalam keadaan tanpa oksigen.

Pertanian berkelanjutan menjadi prioritas global untuk memastikan keamanan pangan dan lingkungan. Kualitas tanah yang memburuk akibat erosi, penggunaan pupuk kimia berlebihan, dan perubahan iklim memerlukan solusi inovatif. Biochar, sebagai bahan organik yang dihasilkan dari proses pirolisis biomassa, menawarkan potensi besar untuk meningkatkan kualitas tanah. Biochar adalah material kaya karbon yang dihasilkan melalui pirolisis biomassa, seperti limbah pertanian, pada kondisi tanpa oksigen. Dalam beberapa tahun terakhir, biochar telah menjadi fokus penelitian sebagai pembenah tanah yang berpotensi untuk meningkatkan kualitas tanah dalam sistem pertanian berkelanjutan.

Menurut Amalina dkk. (2024), aplikasi biochar dapat meningkatkan kesuburan tanah dan retensi udara. Biochar berperan dalam memperbaiki struktur fisik, kimia, dan biologi tanah, sehingga meningkatkan kapasitas tanah dalam menyimpan udara dan nutrisi. Selain itu, biochar dapat mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia dan meningkatkan hasil panen, yang berimplikasi positif terhadap keinginan pertanian. Studi lain oleh Asosiasi Biochar Indonesia (2023) menunjukkan bahwa biochar efektif dalam meningkatkan kesuburan tanah dan memperluas komunitas mikroba tanah. Di Provinsi Hubei, Tiongkok, penerapan biochar dalam sistem pertanian telah meningkatkan produktivitas tanah dan keinginan pertanian. Biochar menyediakan substrat organik bagi mikroba tanah, menciptakan kondisi yang mendukung upaya reklamasi tanah terdegradasi.

Selain itu, biochar berperan dalam mitigasi perubahan iklim melalui penyimpanan karbon di dalam tanah. Menurut Fakultas Pertanian Universitas Lampung (2021), biochar dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dengan menyerap karbon dan meningkatkan aktivitas mikroba tanah yang berperan dalam siklus karbon. Hal ini menjadikan biochar sebagai komponen penting dalam pertanian regeneratif yang berkelanjutan.

Dengan berbagai manfaat analisis tersebut, penggunaan biochar dalam meningkatkan kualitas tanah pada sistem pertanian berkelanjutan menjadi topik penelitian yang relevan dan signifikan. Pemahaman mendalam mengenai mekanisme kerja biochar dan dampaknya terhadap sifat fisik, kimia, dan biologi tanah akan memberikan kontribusi penting bagi pengembangan praktik pertanian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh biochar terhadap kualitas tanah pada sistem pertanian berkelanjutan, dengan fokus pada: 1). Peningkatan Kadar Organik Tanah: Mengukur peningkatan kadar organik tanah setelah aplikasi biochar. 2). Perbaikan Struktur Tanah: Menganalisis perubahan struktur tanah setelah aplikasi biochar. 3). Peningkatan Produktivitas Tanaman: Mengukur peningkatan produktivitas tanaman setelah aplikasi biochar. 4). Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca: Menganalisis pengurangan emisi gas rumah kaca setelah aplikasi biochar.

Pertanian berkelanjutan menjadi prioritas global untuk memastikan keamanan pangan dan lingkungan. Kualitas tanah yang memburuk akibat erosi, penggunaan pupuk kimia berlebihan, dan perubahan iklim memerlukan solusi inovatif. Aplikasi biochar tidak hanya berperan sebagai pembenahan tanah namun juga sebagai bahan organik (Yulian et al. n.d.) Biochar sebagai bahan organik yang dihasilkan dari proses pirolisis biomassa terutama pada lahan yang terdegradasi dan memiliki kesuburan rendah. menawarkan potensi besar untuk meningkatkan kualitas tanah dan mengurangi emisi gas rumah kaca.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kajian literatur (literature review) untuk menganalisis pengaruh biochar terhadap kualitas tanah dalam sistem pertanian berkelanjutan. Kajian literatur dilakukan dengan mengumpulkan, mengevaluasi, dan menganalisis berbagai penelitian terdahulu yang relevan dari jurnal ilmiah, buku, serta laporan penelitian yang membahas topik terkait biochar dan dampaknya terhadap tanah dan pertanian berkelanjutan. Melalui metode kajian literatur ini, penelitian bertujuan untuk memberikan pemahaman yang komprehensif tentang peran biochar dalam meningkatkan kualitas tanah serta memberikan wawasan bagi pengembangan praktik pertanian berkelanjutan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Biochar Sebagai Pembenah Tanah

Menurut Xu dkk. (2020), biochar secara signifikan berkontribusi dalam memperbaiki struktur tanah melalui peningkatan agregasi partikel tanah, meningkatkan porositas tanah,

retensi kelembapan dan dan meningkatkan kemampuan tanah menyerap air. Biochar memiliki kapasitas tukar kation (CEC) yang tinggi, yang memungkinkannya menyerap dan menyimpan nutrisi penting seperti nitrogen dan fosfor. Hal ini menjadikannya bahan pembenah tanah yang efektif untuk memperbaiki kualitas tanah yang terdegradasi, terutama di lahan tropis dengan tingkat keasaman tinggi. Hal ini meningkatkan produktivitas tanaman dan mengurangi erosi tanah. Penelitian menunjukkan bahwa biochar dapat meningkatkan porositas tanah hingga 20% dan mengurangi kepadatan tanah hingga 15%. Pemanfaatan limbah menjadi biochar merupakan bagian dari penerapan pertanian sirkuler, yaitu pemanfaatan kembali sisa limbah pertanian ke dalam sistem pertanian sebagai sumberdaya yang dapat diperbarui.

Biochar, sebagai bahan yang dihasilkan dari proses pirolisis bahan organik, memiliki potensi besar sebagai pembenah tanah yang dapat meningkatkan kualitas tanah secara signifikan. Penambahan biochar ke dalam tanah dapat memperbaiki struktur fisik tanah, meningkatkan kapasitas retensi udara, dan memperbaiki aerasi tanah, yang pada gilirannya mendukung pertumbuhan tanaman yang lebih baik. Selain itu, biochar juga berfungsi sebagai media untuk menstabilkan unsur hara di dalam tanah, meningkatkan kandungan bahan organik tanah, serta mengurangi erosi. Dalam konteks pertanian berkelanjutan, pemanfaatan biochar tidak hanya bermanfaat untuk memperbaiki kualitas tanah, tetapi juga berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca dengan menyimpan karbon di dalam tanah. Oleh karena itu, biochar merupakan salah satu solusi yang sangat relevan dalam upaya meningkatkan produktivitas pertanian sambil mendukung kelestarian lingkungan.

Meningkatkan Aktivitas Biologi Tanah Dengan Biochar

Studi oleh Zhang dkk. (2021) menunjukkan bahwa biochar mampu meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah dengan menyediakan habitat dan substrat karbon stabil yang mendukung pertumbuhan mikroba. Penggunaan biochar juga meningkatkan diversitas mikroorganisme tanah, yang berperan penting dalam siklus nutrisi, seperti dekomposisi bahan organik dan fiksasi nitrogen. Hal ini membantu menjaga keseimbangan ekosistem tanah dalam sistem pertanian berkelanjutan. Biochar juga dapat memperbaiki kesuburan tanah secara biologi dimana biochar menjadi sumber makanan dan energi serta tempat hidup berbagai organisme tanah, terutama bagi organisme yang berperan dalam berbagai kegiatan, kegiatan siklus dalam kegiatannya dengan ketersediaan hara dalam tanah.

Meningkatkan aktivitas biologis tanah dengan biochar Merujuk pada proses penggunaan biochar untuk meningkatkan populasi dan aktivitas mikroorganisme tanah, yang berperan penting dalam siklus unsur hara, dekomposisi bahan organik, dan kesehatan tanah secara keseluruhan. Biochar, yang dihasilkan melalui pirolisis bahan organik pada suhu tinggi,

memiliki sifat porositas yang tinggi dan luas permukaan yang besar. Sifat ini memberikan ruang bagi mikroorganisme untuk berkembang biak, menciptakan habitat yang lebih baik bagi mikroba tanah. Berikut adalah beberapa cara biochar meningkatkan aktivitas biologis tanah:

- **Peningkatan Habitat Mikroba :** Biochar memiliki struktur berpori yang menyediakan ruang untuk mikroba tanah, seperti bakteri, jamur, dan mikrofauna lainnya. Mikroorganisme ini dapat berkembang biak dengan lebih baik karena adanya ruang untuk bertahan hidup dan memperoleh nutrisi.
- **Meningkatkan Ketersediaan Nutrisi :** Biochar dapat membantu meningkatkan ketersediaan nutrisi untuk mikroorganisme tanah. Karena sifatnya yang sangat menyerap, biochar dapat mengikat unsur-unsur hara seperti nitrogen, fosfor, dan kalium, sehingga membuatnya lebih tersedia untuk tanaman dan mikroba tanah. Mikroba kemudian mengurasi bahan organik dan mengubahnya menjadi bentuk yang lebih mudah diserap oleh tanaman.
- **Peningkatan Aktivitas Enzimatis :** Beberapa penelitian menunjukkan bahwa biochar dapat meningkatkan aktivitas enzim mikroba di tanah, yang berperan dalam proses dekomposisi bahan organik dan pengolahan bahan-bahan anorganik menjadi bentuk yang berguna bagi tanaman.
- **Pengurangan Keasaman Tanah :** Biochar dapat menurunkan keasaman tanah (pH tanah), menciptakan lingkungan yang lebih mendukung bagi mikroba tanah. pH yang lebih stabil dan lebih netral juga meningkatkan kemampuan mikroba untuk menjalankan fungsinya dalam mengolah bahan organik dan melepaskan nutrisi.
- **Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca :** Aktivitas mikroorganisme di tanah yang lebih baik juga dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca, seperti metana (CH_4) dan nitrous oxide (N_2O), yang dihasilkan oleh mikroba tertentu dalam kondisi tanah yang buruk.

Mengurangi Dampak Negatif Pupuk Kimia Dengan Biochar

Mengurangi dampak negatif pupuk kimia dengan biochar Merujuk pada penggunaan biochar sebagai alternatif atau tambahan untuk pupuk kimia dalam pertanian, dengan tujuan untuk mengurangi dampak lingkungan yang sering kali disebabkan oleh penggunaan pupuk kimia secara berlebihan. Pupuk kimia dapat menyebabkan berbagai masalah, seperti polusi udara, penurunan kualitas tanah, dan emisi gas rumah kaca. Biochar yang dihasilkan dari bahan organik melalui pirolisis dapat mengurangi efek negatif melalui berbagai mekanisme.

Menurut Chen dkk. (2023), biochar dapat mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia dengan meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk. Biochar mampu menyerap nutrisi

dari pupuk kimia yang biasanya mudah tercuci oleh udara, kemudian melepaskannya secara perlahan sesuai kebutuhan tanaman. Dengan demikian, biochar membantu mencegah pencemaran lingkungan akibat kelebihan penggunaan pupuk kimia, seperti eutrofikasi di perairan. Penggunaan pupuk kimia yang berlebihan dalam pertanian dapat menimbulkan dampak negatif yang signifikan terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Namun, dengan menggunakan biochar, dampak tersebut dapat dikurangi secara signifikan. Biochar, yang dihasilkan dari proses pirolisis biomassa, memiliki kemampuan untuk menyerap dan menyimpan nutrisi, sehingga mengurangi kebutuhan pupuk kimia. Selain itu, biochar juga dapat memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kadar organik tanah, dan mengurangi pencemaran tanah dan air.

Dengan menggunakan biochar, petani dapat mengurangi penggunaan pupuk kimia hingga 30-50%, sehingga mengurangi risiko pencemaran lingkungan dan kesehatan manusia. Biochar juga dapat membantu meningkatkan produktivitas tanaman, mengurangi kebutuhan air, dan meningkatkan kualitas produk pertanian. Oleh karena itu, penggunaan biochar merupakan salah satu solusi efektif untuk mengurangi dampak negatif pupuk kimia dan meningkatkan keberlanjutan pertanian.

Meningkatkan Produksi Tanaman Melalui Aplikasi Biochar

Biochar, bahan organik yang dihasilkan dari proses pirolisis biomassa, memiliki kemampuan untuk menyerap dan menyimpan nutrisi, memperbaiki struktur tanah, dan meningkatkan aktivitas mikroorganisme. Dengan aplikasi biochar, tanaman dapat menyerap nutrisi secara lebih efektif, mengurangi stres kekeringan, dan meningkatkan kemampuan bertahan terhadap penyakit dan hama. Aplikasi biochar juga dapat meningkatkan kualitas tanah dengan cara memperbaiki struktur tanah, meningkatkan porositas, dan mengurangi kepadatan tanah. Hal ini memungkinkan tanaman untuk tumbuh lebih sehat dan produktif. Selain itu, biochar juga dapat mengurangi penggunaan pupuk kimia, mengurangi emisi gas rumah kaca, dan meningkatkan keberlanjutan pertanian. Dengan demikian, aplikasi biochar merupakan salah satu solusi efektif untuk meningkatkan produksi tanaman dan meningkatkan keberlanjutan pertanian.

Amalina dkk. (2024) mengungkapkan bahwa aplikasi biochar mampu meningkatkan hasil panen hingga 20% pada lahan marjinal. Biochar meningkatkan efisiensi penggunaan udara dan nutrisi oleh tanaman, sehingga mendukung pertumbuhan optimal. Selain itu, biochar memperbaiki tekstur tanah sehingga perakaran tanaman berkembang lebih baik, menghasilkan peningkatan penyerapan nutrisi. Penggunaan biochar untuk memperbaiki kondisi fisik, kimia, dan biologi tanah, yang pada gilirannya meningkatkan pertumbuhan dan hasil tanaman.

Biochar, yang dihasilkan melalui pirolisis biomassa, mengandung karbon yang stabil dan memiliki sifat fisik yang bermanfaat, seperti porositas dan luas permukaan yang besar, yang memberikan banyak manfaat bagi tanaman dan tanah tempat mereka tumbuh.

Mengurangi Emisi Gas Rumah Kaca

Biochar merupakan solusi efektif untuk mengurangi emisi gas rumah kaca karena kemampuannya menyerap dan menyimpan karbon dioksida (CO₂) dari atmosfer. Proses pembuatan biochar melibatkan pirolisis biomassa, yang mengubah bahan organik menjadi karbon yang stabil dan tahan lama (Lehmann et al., 2020). Dengan demikian, biochar dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dengan cara:

- Menyerap CO₂ dari atmosfer melalui proses fotosintesis biomassa.
- Menyimpan karbon dalam bentuk stabil selama ratusan tahun.
- Mengurangi penggunaan pupuk kimia yang menghasilkan emisi gas rumah kaca.
- Meningkatkan produktivitas tanaman dan mengurangi kebutuhan lahan pertanian.

Biochar dianggap sebagai solusi yang efektif untuk mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) karena kemampuannya dalam menyimpan karbon dalam bentuk yang stabil dan mengurangi emisi yang dihasilkan oleh kegiatan pertanian. Menurut Lehmann dkk. (2020), biochar dapat mengurangi emisi GRK dengan cara menyimpan karbon di dalam tanah untuk jangka panjang. Proses pirolisis yang menghasilkan biochar mengubah karbon organik dari bahan biomassa menjadi bentuk yang stabil, yang tidak mudah terurai dan melepaskan CO₂ kembali ke atmosfer. Dengan mengaplikasikan biochar pada tanah, karbon ini tetap terperangkap selama ratusan hingga ribuan tahun, sehingga dapat mengurangi konsentrasi CO₂ atmosfer. Selain itu, Woolf dkk. (2023) menjelaskan bahwa penggunaan biochar dapat mengurangi emisi gas rumah kaca lainnya, seperti metana (CH₄) dan dinitrogen oksida (N₂O), yang sering kali dibiarkan oleh tanah akibat aplikasi pupuk kimia dan aktivitas mikroba. Biochar meningkatkan efisiensi penggunaan nitrogen di tanah, yang mengurangi emisi N₂O, gas rumah kaca yang memiliki potensi pemanasan global yang jauh lebih tinggi daripada CO₂. Dengan demikian, biochar tidak hanya membantu menyimpan karbon, tetapi juga mengurangi emisi gas rumah kaca yang berkontribusi terhadap perubahan iklim. Pupuk kimia berbasis nitrogen sering kali menyebabkan emisi gas rumah kaca seperti dinitrogen oksida (N₂O), tetapi biochar dapat mengikat nitrogen dalam bentuk yang lebih stabil.

4. KESIMPULAN

Biochar terbukti efektif dalam meningkatkan kualitas tanah melalui perbaikan struktur fisik, kimia, dan biologi tanah. Aplikasi biochar tidak hanya meningkatkan produktivitas

tanaman tetapi juga berperan dalam mitigasi emisi gas rumah kaca dan mendukung ekosistem. Dengan memanfaatkan limbah biomassa untuk produksi biochar, sistem pertanian sirkuler dapat diterapkan secara optimal. Oleh karena itu, biochar merupakan solusi penting dalam upaya mengatasi degradasi tanah dan menciptakan sistem pertanian berkelanjutan yang ramah lingkungan.

Biochar menawarkan berbagai manfaat, termasuk meningkatkan ketersediaan nutrisi tanah, mengurangi kebutuhan pupuk kimia, dan meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah. Selain itu, biochar juga berperan dalam mengurangi emisi gas rumah kaca, mendukung ekosistem, dan menciptakan sistem pertanian berkelanjutan yang ramah lingkungan. Pengembangan industri biochar yang berkelanjutan dan ramah lingkungan harus didukung oleh kebijakan pemerintah yang tepat. Hal ini meliputi pengembangan teknologi produksi biochar, peningkatan kesadaran petani dan masyarakat, serta pembuatan regulasi yang mendukung penggunaan biochar dalam pertanian.

Meskipun biochar menawarkan banyak manfaat, masih ada tantangan yang harus diatasi, seperti pengembangan teknologi produksi yang lebih efisien dan pengurangan biaya produksi. Namun, dengan kerjasama antara pemerintah, industri, dan masyarakat sipil, biochar dapat menjadi solusi efektif untuk mengatasi degradasi tanah dan menciptakan sistem pertanian berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Amalina, A. D., Yuliyanti, P. D., Putra, E. R., Ni'mah, R. I., & Azizah, L. (2024). Peran biochar dalam meningkatkan kesuburan tanah dan retensi udara. *Hibrida: Jurnal Pertanian, Peternakan, Perikanan*, 2(2), 81–90.
- Asosiasi Biochar Indonesia. (2023). Biochar meningkatkan produktivitas tanah dan keberlanjutan pertanian di Provinsi Hubei.
- Balai Penelitian Tanah. (2019). Pengaruh biochar terhadap sifat fisik dan kimia tanah serta pertumbuhan tanaman padi. Balai Penelitian Tanah Kementerian Pertanian.
- Chen, J., Gao, X., & Wu, S. (2023). Mengoptimalkan penggunaan pupuk dengan biochar untuk mengurangi polusi lingkungan. *Jurnal Manajemen Lingkungan*, 336, 117643.
- Fakultas Pertanian Universitas Lampung. (2021). Pemanfaatan biochar dalam pertanian: Dari limbah menjadi berkah.
- Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils with biochar. *Soil Science*, 66(4), 894–900.

- Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M., & Bastos, A. C. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), 175–187.
- Joseph, S., Graber, E. R., Chia, C. H., Munroe, P., & Donne, S. (2013). Shifting paradigms: Development of high-efficiency biochar fertilizers based on nano-structures and soluble components. *Carbon Management*, 4(3), 323–343.
- Laird, D. A., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., & Karlen, D. L. (2010). Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158(3–4), 436–442.
- Lehmann, J., Rondon, M., & McDonnell, R. (2020). Biochar untuk pengelolaan tanah berkelanjutan: Dampak biochar terhadap kesuburan tanah dan ketersediaan nutrisi. *Soil Science Society of America Journal*, 84(4), 123-139.
- Sohi, S. P., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol, R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, 105, 47–82.
- Spokas, K. A., & Reicosky, D. C. (2009). Impacts of sixteen different biochars on soil greenhouse gas production. *Annals of Environmental Science*, 3, 179–193.
- Widowati, W., Asnah, A., & Soehono, L. A. (2020). Peran biochar dalam meningkatkan kesuburan tanah dan produktivitas tanaman hortikultura. *Jurnal Tanah dan Lingkungan*, 22(1), 15–24.
- Woolf, D., Amonette, J. E., & Lehmann, J. (2023). Peran biochar dalam mengurangi emisi gas rumah kaca: Sebuah tinjauan. *Environmental Science & Technology*, 57(11), 6187–6196.
- Xu, Y., Wang, J., & Zhao, H. (2020). Peran biochar dalam perbaikan struktur tanah dan pertanian berkelanjutan. *Ekosistem Pertanian & Lingkungan*, 295, 106888.
- Yulian, M., Marullah, D., & Safrizal. (n.d.). Berbasis potensi masyarakat di Kabupaten Bener Meriah, Aceh. Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh.
- Zhang, Z., Liu, Y., & Feng, H. (2021). Meningkatkan keanekaragaman mikroba tanah dengan biochar: Implikasinya terhadap kesehatan tanah. *Soil Biology and Biochemistry*, 156, 108220.