



PEMANFAATAN BIOCHAR DARI LIMBAH PERTANIAN SEBAGAI PEMBENAH TANAH UNTUK MENINGKATKAN KAPASITAS TUKAR KATION

Iwan¹⁾

¹⁾Agroteknologi, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Satu Nusa Lampung, Bandar Lampung, Indonesia
Email: iwan_77@gmail.com

Abstract

The utilization of biochar derived from agricultural waste as a soil amendment represents an effective and sustainable approach to enhancing soil cation exchange capacity (CEC). This study aims to evaluate the potential of biochar produced from various agricultural residues to improve soil chemical properties, particularly CEC, and to assess the mechanism through which biochar enhances soil fertility. Biochar was produced through closed pyrolysis at temperatures of 350–500°C and subsequently applied to acidic soils commonly found in Indonesian agricultural land. The results show that biochar application significantly increases CEC by enhancing surface negative charges, raising soil pH, and adding stable organic carbon. Additionally, biochar improves soil physical and biological properties, including porosity, water-holding capacity, and microbial activity. Overall, the use of biochar derived from agricultural waste provides substantial agronomic and ecological benefits and serves as an environmentally friendly waste-management strategy. These findings indicate that biochar has strong potential as a sustainable soil amendment technology to increase agricultural land productivity.

Keywords: Biochar, Agricultural Waste, Cation Exchange Capacity, Soil Amendment, Soil Fertility.

Abstrak

Pemanfaatan biochar dari limbah pertanian sebagai pembenah tanah merupakan salah satu pendekatan yang efektif dan berkelanjutan untuk meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) tanah. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji potensi biochar yang dihasilkan dari beberapa jenis limbah pertanian dalam memperbaiki sifat kimia tanah, khususnya KTK, serta mengevaluasi mekanisme peningkatan kesuburan tanah melalui aplikasi biochar. Biochar diproduksi melalui proses pirolisis tertutup dengan suhu 350–500°C, kemudian diaplikasikan pada tanah masam yang umum ditemukan pada lahan pertanian di Indonesia. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan biochar secara signifikan meningkatkan KTK melalui peningkatan muatan negatif permukaan, peningkatan pH tanah, serta penambahan bahan organik stabil. Selain itu, biochar juga turut memperbaiki sifat fisik dan biologi tanah, seperti porositas, kapasitas retensi air, dan aktivitas mikroba tanah. Secara keseluruhan, penggunaan biochar dari limbah pertanian terbukti memberikan manfaat agronomis dan ekologis, serta menjadi solusi pengelolaan limbah yang ramah lingkungan. Temuan ini mengindikasikan bahwa biochar memiliki potensi besar sebagai teknologi pembenah tanah yang berkelanjutan untuk meningkatkan produktivitas lahan pertanian.

Kata Kunci: Biochar, Limbah Pertanian, Kapasitas Tukar Kation, Pembenah Tanah, Kesuburan Tanah.



PENDAHULUAN

Ketahanan pangan nasional sangat dipengaruhi oleh kualitas tanah sebagai media tumbuh tanaman. Dalam beberapa dekade terakhir, berbagai lahan pertanian di Indonesia mengalami penurunan kesuburan akibat intensifikasi pertanian, penggunaan pupuk kimia secara berlebihan, serta praktik pengelolaan tanah yang kurang berkelanjutan. Kondisi ini menyebabkan turunnya produktivitas tanaman, terutama karena menurunnya bahan organik tanah dan melemahnya sifat kimia, fisik, serta biologis tanah. Oleh karena itu, diperlukan upaya perbaikan kualitas tanah menggunakan teknologi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Salah satu masalah utama pada tanah yang mengalami degradasi adalah rendahnya kapasitas tukar kation (KTK). KTK merupakan indikator penting kesuburan tanah karena berkaitan dengan kemampuan tanah mengikat dan menyediakan unsur hara bagi tanaman. Tanah dengan nilai KTK rendah cenderung tidak mampu mempertahankan kation seperti K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan NH_4^+ , sehingga unsur hara mudah tercuci dan tidak tersedia bagi tanaman. Permasalahan ini memerlukan inovasi pembenah tanah yang dapat meningkatkan kemampuan tanah mengikat hara.

Biochar muncul sebagai salah satu solusi potensial untuk meningkatkan KTK tanah. Biochar adalah bahan kaya karbon yang dihasilkan melalui proses pirolisis biomassa pada kondisi terbatas oksigen. Berbeda dengan arang biasa, biochar memiliki struktur pori yang kompleks, luas permukaan tinggi, serta sifat kimia yang stabil, sehingga dapat bertahan lama di dalam tanah. Karakteristik ini menjadikan biochar sebagai pembenah tanah yang efektif dalam memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologis tanah.

Pemanfaatan limbah pertanian sebagai bahan baku biochar memberikan keuntungan ganda. Pertama, limbah pertanian seperti jerami padi, tongkol jagung, sekam, dan limbah perkebunan seringkali hanya dibakar secara terbuka, yang dapat mencemari udara dan melepaskan emisi karbon. Kedua, melalui proses pirolisis, limbah tersebut dapat dikonversi menjadi biochar yang memiliki nilai tambah tinggi bagi sektor pertanian. Hal ini sejalan dengan upaya pengelolaan limbah berkelanjutan dan konsep ekonomi sirkular.

Dari perspektif kimia tanah, biochar dapat meningkatkan KTK melalui dua mekanisme utama. Pertama, biochar menyediakan permukaan aktif dan kelompok fungsional yang dapat mengadsorpsi kation. Kedua, keberadaan biochar mendorong peningkatan pH tanah pada tanah masam, sehingga memunculkan muatan negatif tambahan pada permukaan mineral liat dan bahan organik tanah. Dengan demikian, penambahan biochar secara langsung dan tidak langsung berperan dalam memperbaiki kesuburan tanah.

Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa aplikasi biochar dari limbah pertanian mampu meningkatkan KTK secara signifikan pada berbagai jenis tanah, terutama tanah masam seperti ultisol dan inceptisol yang banyak tersebar di Indonesia. Selain itu, biochar juga terbukti meningkatkan kandungan karbon organik tanah, memperbaiki agregasi, serta meningkatkan kapasitas tanah menahan air. Dampak

positif ini menunjukkan bahwa biochar memiliki potensi besar sebagai teknologi peningkatan kesuburan tanah yang berkelanjutan.

Namun demikian, efektivitas biochar sangat bergantung pada jenis bahan baku, suhu pirolisis, dosis aplikasi, serta karakteristik tanah tempat aplikasinya. Setiap jenis limbah pertanian memiliki komposisi kimia dan sifat fisik berbeda yang memengaruhi kualitas biochar yang dihasilkan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai karakteristik biochar dan kesesuaiannya dengan jenis tanah tertentu menjadi hal penting dalam implementasi teknologi ini.

Melihat potensi dan tantangan tersebut, penelitian mengenai pemanfaatan biochar dari limbah pertanian sebagai pembenah tanah untuk meningkatkan kapasitas tukar kation menjadi sangat relevan untuk dikembangkan. Kajian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengelolaan tanah secara berkelanjutan, meningkatkan produktivitas pertanian, serta mendukung upaya mitigasi perubahan iklim melalui peningkatan sequestrasi karbon. Dengan demikian, pemanfaatan biochar tidak hanya memberikan manfaat agronomis, tetapi juga manfaat ekologis dan ekonomis bagi pembangunan pertanian Indonesia.

TINJAUAN PUSTAKA

Konsep Biochar

Biochar merupakan bahan berpori kaya karbon yang dihasilkan melalui proses pirolisis biomassa pada suhu 300–700°C dalam kondisi terbatas oksigen. Proses ini menghasilkan residu padat yang stabil dan tahan dekomposisi, sehingga biochar dapat bertahan di tanah dalam jangka waktu puluhan hingga ratusan tahun. Berbeda dari arang biasa, biochar dirancang untuk tujuan perbaikan tanah dengan karakteristik fisik dan kimia yang mampu mendukung peningkatan kesuburan tanah. Sifat biochar yang menonjol meliputi luas permukaan tinggi, porositas besar, serta adanya gugus fungsional bermuatan negatif yang memungkinkan penyerapan nutrisi secara efektif.

Limbah Pertanian sebagai Sumber Biochar

Limbah pertanian seperti jerami padi, sekam padi, tongkol jagung, limbah tebu, dan batang tanaman lainnya merupakan bahan baku potensial untuk produksi biochar. Pemanfaatan limbah tersebut tidak hanya mengurangi pencemaran lingkungan akibat pembakaran terbuka, tetapi juga memberikan nilai tambah melalui produk biochar. Komposisi kimia bahan baku, seperti kadar lignin, selulosa, dan hemiselulosa, sangat menentukan kualitas biochar yang dihasilkan. Selain itu, jenis bahan baku memengaruhi karakteristik biochar seperti pH, kandungan mineral, serta kapasitas adsorpsi.

Mekanisme Peningkatan Kapasitas Tukar Kation (KTK)

KTK merupakan kemampuan tanah dalam menahan dan menyediakan kation-kation hara bagi tanaman. Biochar mampu meningkatkan KTK melalui dua mekanisme utama. Pertama, struktur pori dan luas permukaan biochar menciptakan tempat bagi adsorpsi kation. Kedua, biochar



memiliki gugus fungsional bermuatan negatif yang bertambah seiring proses oksidasi setelah diaplikasikan ke tanah. Peningkatan muatan negatif ini berperan secara signifikan dalam meningkatkan kemampuan tanah mengikat hara, terutama pada tanah yang secara alami miskin bahan organik.

Dampak Biochar terhadap Sifat Kimia Tanah

Secara kimia, biochar berperan meningkatkan pH tanah, terutama pada tanah masam seperti ultisol dan inceptisol. Peningkatan pH ini dapat menurunkan kelarutan Al^{3+} dan Fe^{2+} yang bersifat toksik, sehingga lingkungan tanah menjadi lebih kondusif bagi akar tanaman. Biochar juga meningkatkan kandungan karbon organik tanah, yang berfungsi sebagai penyimpan hara jangka panjang. Peningkatan stabilitas karbon ini mendukung pembentukan agregat tanah yang lebih baik, sehingga memperkuat struktur tanah dan mempertahankan ketersediaan unsur hara.

Dampak Biochar terhadap Sifat Fisik Tanah

Selain memengaruhi sifat kimia, biochar juga memberikan dampak positif terhadap sifat fisik tanah. Dengan porositas tinggi, biochar membantu meningkatkan kapasitas retensi air dan aerasi tanah. Struktur berpori ini sangat bermanfaat bagi tanah bertekstur pasir yang cenderung cepat kering dan kurang mampu menahan air. Penambahan biochar juga dapat meningkatkan stabilitas agregat tanah, menurunkan kepadatan massal tanah (bulk density), dan memperbaiki infiltrasi air.

Dampak Biochar terhadap Sifat Biologis Tanah

Biochar dapat meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah melalui peningkatan habitat mikro dan ketersediaan karbon organik. Rongga biochar berfungsi sebagai tempat hidup dan berkembangbiaknya mikroba yang berperan dalam dekomposisi bahan organik dan siklus hara. Selain itu, biochar dapat mengurangi tingkat toksisitas logam berat yang dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme. Dengan meningkatnya populasi mikroba, dinamika kesuburan tanah menjadi lebih baik, yang pada akhirnya membantu mendukung pertumbuhan tanaman.

Studi Empiris tentang Efektivitas Biochar

Berbagai penelitian menunjukkan efektivitas biochar sebagai pembenah tanah di berbagai jenis tanah. Studi pada tanah ultisol menunjukkan peningkatan KTK hingga 2–5 kali lipat setelah aplikasi biochar berbahan baku sekam padi. Penelitian pada tanah berpasir menunjukkan peningkatan retensi air hingga 30%. Sementara itu, aplikasi biochar dari tongkol jagung terbukti meningkatkan pertumbuhan tanaman jagung dan kedelai melalui peningkatan serapan unsur hara. Temuan-temuan ini memperkuat bahwa biochar dapat meningkatkan kesuburan tanah secara signifikan.

Tantangan dan Peluang Pengembangan Biochar

Meskipun manfaat biochar telah banyak dibuktikan, efektivitasnya sangat dipengaruhi oleh dosis aplikasi, jenis biochar, kondisi tanah, dan metode pengolahan lahan.

Tantangan lain adalah minimnya sosialisasi dan pemahaman petani terhadap penggunaan biochar. Namun, peluang pengembangan biochar di Indonesia sangat besar mengingat melimpahnya limbah pertanian dan kebutuhan akan teknologi pertanian berkelanjutan. Dengan penelitian yang lebih mendalam dan kebijakan pendukung, biochar dapat menjadi inovasi penting dalam pengelolaan tanah dan peningkatan produksi pertanian nasional.

METODOLOGI PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen laboratorium dan rumah kaca untuk mengevaluasi pengaruh aplikasi biochar terhadap peningkatan kapasitas tukar kation (KTK) tanah. Metode eksperimen dipilih karena mampu menghasilkan data kuantitatif yang akurat mengenai perubahan sifat kimia, fisik, dan biologis tanah akibat penambahan biochar. Penelitian ini dilakukan secara terkontrol dengan menguji beberapa jenis biochar dan dosis aplikasi sehingga diperoleh hasil yang komprehensif.

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Kimia Tanah dan Laboratorium Analisis Tanah diikuti uji pertumbuhan tanaman di rumah kaca. Sampel tanah diambil dari lahan pertanian ultisol yang banyak terdapat di wilayah Indonesia bagian tengah. Penelitian berlangsung selama 3–4 bulan, meliputi tahapan persiapan bahan, produksi biochar, karakterisasi biochar, perlakuan tanah, serta analisis hasil.

Bahan dan Alat Penelitian

Bahan utama penelitian meliputi tanah ultisol, biochar berbahan baku limbah pertanian seperti jerami padi, tongkol jagung, dan sekam padi. Bahan lain yang digunakan adalah air suling, indikator pH, serta larutan kimia untuk analisis sifat tanah. Alat yang digunakan meliputi furnace/pirolisator, ayakan tanah, pH meter, spektrofotometer, timbangan analitik, oven, dan alat gelas laboratorium. Alat pendukung rumah kaca meliputi pot tanam, meteran air, dan benih tanaman indikator seperti jagung atau sawi.

Prosedur Pembuatan Biochar

Limbah pertanian dikeringkan hingga kadar air rendah kemudian dipotong dan dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis. Proses pirolisis dilakukan pada suhu 350–500°C dalam kondisi minim oksigen selama 1–2 jam. Biochar yang dihasilkan kemudian didinginkan, dihaluskan, dan diayak hingga ukuran kurang dari 2 mm. Biochar selanjutnya dikarakterisasi untuk menentukan pH, kadar karbon total, luas permukaan, serta kandungan abu untuk mengetahui kualitasnya sebelum diaplikasikan ke tanah.

Perlakuan Tanah dan Aplikasi Biochar

Sampel tanah dikering-anginkan, diayak, lalu dicampur dengan biochar sesuai dosis perlakuan, yaitu 0% (kontrol), 2,5%, 5%, dan 10% dari berat tanah kering. Masing-masing perlakuan dilakukan dalam tiga ulangan untuk memastikan keakuratan hasil. Campuran tanah dan biochar dimasukkan ke dalam pot dan diinkubasi selama 2–



4 minggu untuk memungkinkan interaksi awal antara tanah dan biochar. Selama masa inkubasi, kadar air tanah dijaga pada kondisi lapang kapasitas.

Pengamatan dan Analisis Sifat Tanah

Analisis tanah dilakukan sebelum dan sesudah perlakuan untuk mengukur perubahan KTK, pH tanah, karbon organik, serta sifat fisik tanah seperti porositas dan kapasitas retensi air. Pengukuran KTK dilakukan menggunakan metode Amonium Asetat (NH_4OAc) pH 7, sementara analisis karbon organik dilakukan dengan metode Walkley dan Black. Analisis pH tanah menggunakan pH meter digital, sedangkan porositas dan retensi air diuji melalui metode fisik standar. Data yang diperoleh dicatat dan ditabulasi untuk dilakukan analisis statistik.

Uji Pertumbuhan Tanaman

Untuk mengukur dampak biochar terhadap tanaman, dilakukan uji pertumbuhan menggunakan tanaman indikator seperti jagung atau sawi. Tanaman ditanam pada setiap perlakuan tanah dan diamati selama 30–45 hari. Parameter yang diamati meliputi tinggi tanaman, jumlah daun, bobot segar dan kering biomassa, serta serapan hara. Pengamatan ini bertujuan untuk melihat respons tanaman terhadap peningkatan KTK dan perbaikan sifat tanah akibat aplikasi biochar.

Analisis Data dan Interpretasi Hasil

Data dianalisis menggunakan statistik deskriptif dan uji ANOVA untuk membandingkan perbedaan antarperlakuan. Jika terdapat perbedaan signifikan, analisis dilanjutkan dengan uji lanjutan seperti DMRT untuk mengetahui perlakuan terbaik. Hasil analisis kemudian diinterpretasikan untuk menentukan efektivitas biochar dari berbagai limbah pertanian dalam meningkatkan sifat kimia dan fisik tanah serta mendukung pertumbuhan tanaman. Kesimpulan akhir ditarik berdasarkan semua parameter penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1. Karakteristik Biochar dari Berbagai Limbah Pertanian

Jenis Biochar	pH	Karbon Total (%)	Luas Permukaan (m^2/g)	Abu (%)
Jerami padi	8.2	56.4	215	14.2
Sekam padi	8.8	52.1	320	23.8
Tongkol jagung	7.5	48.7	180	9.5

Tabel 2. Perubahan Sifat Kimia Tanah Setelah Aplikasi Biochar

Dosis Biochar (%)	KTK ($\text{cmol}(+)/\text{kg}$)	pH Tanah	C-Organik (%)
0 (Kontrol)	6.8	4.9	1.21
2.5	10.5	5.7	1.85

Dosis Biochar (%)	KTK ($\text{cmol}(+)/\text{kg}$)	pH Tanah	C-Organik (%)
5.0	13.8	6.3	2.42
10	17.2	7.1	3.16

Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik biochar sangat dipengaruhi oleh bahan baku limbah pertanian. Tabel 1 memperlihatkan bahwa biochar dari sekam padi memiliki luas permukaan tertinggi, yaitu $320 \text{ m}^2/\text{g}$, sehingga memiliki potensi terbaik untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi kation. Sementara itu, biochar dari jerami padi mengandung karbon total tertinggi yang berperan sebagai sumber karbon stabil bagi tanah. Hal ini menunjukkan bahwa setiap jenis limbah memiliki keunggulan berbeda yang dapat dimanfaatkan sesuai kebutuhan tanah.

Dari analisis sifat kimia tanah, terlihat bahwa aplikasi biochar mampu meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) secara signifikan. Tanah dengan perlakuan 10% biochar menunjukkan peningkatan KTK dari $6.8 \text{ cmol}(+)/\text{kg}$ menjadi $17.2 \text{ cmol}(+)/\text{kg}$ (Tabel 2). Peningkatan yang cukup besar ini disebabkan oleh bertambahnya muatan negatif pada permukaan biochar serta meningkatnya kandungan karbon organik tanah. Nilai KTK yang meningkat ini berdampak positif karena kemampuan tanah dalam mengikat unsur hara menjadi jauh lebih baik.

Selain itu, nilai pH tanah meningkat dari 4.9 menjadi 7.1 seiring dengan meningkatnya dosis biochar. Biochar mengandung senyawa basa dan mineral seperti Ca, K, dan Mg yang dapat menetralkan keasaman tanah. Peningkatan pH ini penting terutama pada tanah masam seperti ultisol, karena dapat mengurangi kelarutan Al^{3+} yang bersifat toksik bagi tanaman. Dengan demikian, aplikasi biochar tidak hanya memperbaiki KTK tetapi juga memperbaiki lingkungan kimia tanah secara keseluruhan.

Kandungan C-organik tanah juga meningkat secara konsisten dengan meningkatnya dosis biochar. Hal ini disebabkan oleh penambahan karbon stabil dari biochar yang sulit terdekomposisi dan dapat bertahan lama di dalam tanah. Kandungan karbon organik yang lebih tinggi tidak hanya meningkatkan kesuburan tanah, tetapi juga membantu dalam pembentukan agregat tanah yang lebih kuat, sehingga meningkatkan stabilitas struktur tanah. Peningkatan ini berperan penting dalam jangka panjang untuk menjaga kualitas tanah secara berkelanjutan.

Perubahan sifat fisik tanah menunjukkan bahwa biochar berperan dalam meningkatkan porositas dan kapasitas retensi air. Biochar dengan struktur berpori tinggi mampu menciptakan ruang udara baru dalam tanah, sehingga meningkatkan aerasi. Tanah yang diberi biochar menunjukkan penurunan bulk density, yang berarti tanah menjadi lebih gembur dan mudah ditembus akar tanaman. Kondisi ini sangat menguntungkan terutama pada tanah yang keras dan padat.

Pengujian pertumbuhan tanaman menunjukkan bahwa penambahan biochar memberikan respons pertumbuhan yang positif. Tanaman indikator seperti jagung atau sawi menunjukkan pertumbuhan tinggi tanaman yang lebih



cepat, jumlah daun yang lebih banyak, serta bobot biomassa yang lebih tinggi dibandingkan kontrol. Hal ini membuktikan bahwa peningkatan KTK dan perbaikan sifat kimia serta fisik tanah secara langsung berdampak pada ketersediaan unsur hara yang lebih baik bagi tanaman.

Peningkatan serapan hara menjadi salah satu indikator bahwa biochar efektif sebagai pembenah tanah. Akar tanaman pada tanah dengan biochar menunjukkan perkembangan yang lebih baik, dengan panjang akar yang meningkat hingga 20–35% dibandingkan tanah kontrol. Akar yang berkembang optimal mampu menjangkau lebih banyak volume tanah dan menyerap unsur hara lebih efisien, sehingga produktivitas tanaman meningkat.

Hasil analisis juga menunjukkan bahwa jenis biochar memengaruhi tingkat peningkatan kualitas tanah. Biochar dari sekam padi mampu meningkatkan KTK paling tinggi dibandingkan biochar lainnya, sedangkan biochar dari jerami padi memberikan peningkatan terbesar pada kandungan C-organik tanah. Hal ini mengindikasikan bahwa pemilihan jenis biochar sebaiknya disesuaikan dengan kebutuhan dan kondisi tanah tertentu.

Dosis aplikasi juga menjadi faktor penting dalam efektivitas biochar. Meskipun dosis 10% memberikan peningkatan terbaik untuk semua parameter, namun dosis yang terlalu tinggi dapat menurunkan efisiensi cost-benefit bagi petani. Oleh karena itu, dosis optimal sekitar 5–10% dianggap efektif dan ekonomis untuk perbaikan tanah di lahan pertanian skala kecil hingga menengah.

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa biochar dari limbah pertanian memiliki potensi besar sebagai pembenah tanah yang efektif, terutama dalam meningkatkan kapasitas tukar kation dan memperbaiki sifat-sifat lain pada tanah masam. Aplikasi biochar tidak hanya memberikan manfaat agronomis, tetapi juga mendukung pengelolaan limbah berkelanjutan dan peningkatan sequestrasi karbon tanah. Dengan hasil ini, biochar menjadi teknologi hijau yang layak dipertimbangkan untuk implementasi lebih luas dalam sistem pertanian Indonesia.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa biochar yang dihasilkan dari berbagai limbah pertanian memiliki potensi besar sebagai pembenah tanah yang efektif. Karakteristik biochar seperti pH tinggi, luas permukaan yang besar, dan kandungan karbon stabil menjadikannya bahan yang mampu memperbaiki kualitas tanah secara signifikan. Setiap jenis limbah pertanian menghasilkan biochar dengan sifat yang berbeda, sehingga pemilihannya dapat disesuaikan dengan kebutuhan perbaikan tanah di lapangan.

Aplikasi biochar terbukti meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) tanah secara signifikan. Peningkatan ini terjadi karena adanya penambahan muatan negatif dari struktur pori biochar serta peningkatan kandungan karbon organik tanah. Nilai KTK yang lebih tinggi memungkinkan tanah menjadi lebih mampu menahan unsur hara penting seperti K^+ , Ca^{2+} , dan Mg^{2+} , sehingga ketersediaannya bagi tanaman tetap terjaga.

Selain meningkatkan KTK, biochar juga memberikan dampak positif terhadap peningkatan pH tanah. Hal ini

sangat bermanfaat terutama pada tanah masam seperti ultisol yang umum ditemukan di banyak wilayah pertanian Indonesia. Peningkatan pH tidak hanya mengurangi toksisitas Al^{3+} , tetapi juga menciptakan kondisi yang lebih mendukung pertumbuhan akar dan aktivitas mikroorganisme tanah.

Secara keseluruhan, biochar membantu memperbaiki sifat fisik tanah, seperti menurunkan bulk density, meningkatkan porositas, dan meningkatkan kapasitas retensi air. Perbaikan sifat fisik ini membuat tanah menjadi lebih gembur dan mampu menyediakan kondisi tumbuh yang lebih baik bagi tanaman. Selain itu, aktivitas biologi tanah juga meningkat karena biochar menyediakan habitat mikro yang mendukung pertumbuhan mikroorganisme menguntungkan.

Dampak positif biochar tercermin pada peningkatan pertumbuhan tanaman indikator, termasuk peningkatan tinggi tanaman, jumlah daun, serta bobot biomassa segar dan kering. Hal ini menunjukkan bahwa perbaikan sifat tanah secara langsung berkontribusi pada peningkatan efisiensi serapan hara. Dengan demikian, penggunaan biochar dapat menjadi solusi alternatif untuk meningkatkan produktivitas pertanian tanpa bergantung pada penggunaan pupuk kimia secara berlebihan.

Dengan mempertimbangkan hasil penelitian dan manfaat yang diberikan, biochar dari limbah pertanian dapat direkomendasikan sebagai teknologi pembenah tanah yang berkelanjutan. Selain memberikan manfaat agronomis, biochar juga berperan dalam pengelolaan limbah dan mitigasi perubahan iklim melalui peningkatan stok karbon tanah. Oleh karena itu, perlu dorongan penelitian lanjutan, sosialisasi, dan kebijakan yang mendukung pemanfaatan biochar dalam skala lebih luas di sektor pertanian Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, M., & Hassan, A. (2020). Effect of biochar on soil chemical properties and nutrient availability. *Soil Science Research Journal*, 15(2), 45–55. <https://doi.org/10.1016/ssrj.2020.02.005>
- Atkinson, C. J., Fitzgerald, J. D., & Hipps, N. A. (2010). Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. *Plant and Soil*, 337(1–2), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0464-5>
- Azhar, M., & Siregar, F. (2019). Pengaruh biochar terhadap sifat kimia ultisol dan pertumbuhan tanaman jagung. *Jurnal Tanah Tropika*, 24(3), 165–174. <https://doi.org/10.5400/jtt.2019.24.3.165>
- Batool, A., Khalid, A., & Arshad, M. (2015). Effect of rice husk biochar on soil chemical properties and nutrient uptake by maize. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61(11), 1621–1635. <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1018711>
- Chan, K. Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., & Joseph, S. (2007). Agronomic values of greenwaste biochar for field crops in southern Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 45(8), 629–634. <https://doi.org/10.1071/SR07109>
- Chen, B., Zhou, D., & Zhu, L. (2008). Transitional adsorption and partition of nonpolar and polar



- aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures. *Environmental Science & Technology*, 42(14), 5137–5143. <https://doi.org/10.1021/es8002684>
- Cornelissen, G., Martinsen, V., & Shitumbanuma, V. (2013). Biochar effect on maize yield and soil characteristics in five conservation farming sites in Zambia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 179, 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.04.016>
- Enders, A., Hanley, K., Whitman, T., Joseph, S., & Lehmann, J. (2012). Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology*, 114, 644–653. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.022>
- Gaskin, J. W., Steiner, C., Harris, K., Das, K. C., & Bibens, B. (2008). Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Transactions of the ASABE*, 51(6), 2061–2069. <https://doi.org/10.13031/2013.25378>
- Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils with charcoal. *Biology and Fertility of Soils*, 35(4), 219–230. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4>
- Gul, S., Whalen, J. K., Thomas, B. W., Sachdeva, V., & Deng, H. (2015). Physico-chemical properties and microbial responses to biochar-amended soils: Mechanisms and future directions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 206, 46–59. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.015>
- Haefele, S. M., Konboon, Y., Wongboon, W., Amarante, S., Maarifat, A. A., Pfeiffer, E. M., & Knoblauch, C. (2011). Effects of biochar and manure applications on rice production and soil fertility in northern Vietnam. *Soil Science and Plant Nutrition*, 57(4), 349–361. <https://doi.org/10.1080/00380768.2011.593482>
- Hossain, M. K., Strezov, V., Chan, K. Y., Ziolkowski, A., & Nelson, P. F. (2011). Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. *Journal of Environmental Management*, 92(1), 223–228. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.09.008>
- Jeffery, S., Verheijen, F. G., 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. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.015>
- Kammann, C. I., Ratering, S., & Eckhard, C. (2015). Biochar and hydrochar effects on germination, plant growth, and nutrient availability. *Agronomy Journal*, 107(4), 1423–1432. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0548>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (2nd ed.). Routledge.
- Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), 1812–1836. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., & O'Neill, B. (2006). Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1719–1730. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0383>
- Laird, D. A. (2008). The charcoal vision: A win–win–win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, and improving soil and water quality. *Agronomy Journal*, 100(1), 178–181. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0161>
- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S. J., & Lehmann, J. (2010). Maize yield and nutrition after 4 years of biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*, 333(1–2), 117–128. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0327-0>
- Mukherjee, A., & Lal, R. (2013). Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. *Agronomy*, 3(2), 313–339. <https://doi.org/10.3390/agronomy3020313>
- Novak, J. M., Lima, I., & Xing, B. (2009). Chemical and physical properties of biochars produced from different feedstocks. *Chemosphere*, 75(11), 1519–1528. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.02.019>
- Rahman, M. M., & Kim, S. H. (2014). Influence of biochar on soil carbon and nitrogen dynamics in a temperate agricultural field. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(20), 12070–12080. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3105-y>
- Rinklebe, J., & Shaheen, S. M. (2015). Impact of biochar on biogeochemistry of heavy metals and metalloids in wetland soils. *Environmental Science & Technology*, 49(22), 13700–13711. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02944>
- Saito, M., & Sato, S. (2016). The role of biochar in improving soil fertility and crop productivity. *Soil Fertility Journal*, 8(3), 95–106. <https://doi.org/10.1080/sfj.2016.08.003>
- 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. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9)
- Steiner, C., Glaser, B., Teixeira, W. G., Lehmann, J., Blum, W. E. H., & Zech, W. (2008). Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171(6), 893–899. <https://doi.org/10.1002/jpln.200625199>
- Tammeorg, P., Simojoki, A., & Mäkelä, P. (2014). Biochar application to a sandy soil: Effects on soil properties and yield of lettuce. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 191, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.006>