

Respons Sifat Kimia Tanah terhadap Pemberian Biochar Kulit Kakao sebagai Soil Amandement di Tanah Grumosol

F. Riil Salsabila^{1*}, Anna Kusumawati¹

¹Program Studi Pengelolaan Perkebunan, Politeknik LPP Yogyakarta

Email: kusumawatianna@gmail.com

Abstrak

Tanah Grumosol adalah jenis tanah yang banyak mengandung liat sehingga mampu menyimpan unsur hara, tetapi sering mengikat fosfor (P) dan kalium (K). Akibatnya, tanaman sulit menyerap kedua unsur tersebut walaupun jumlahnya ada di dalam tanah. Limbah kulit kakao dapat diolah menjadi biochar (arang hayati) dan digunakan untuk memperbaiki tanah karena dapat meningkatkan pH, menambah karbon organik, dan membantu menjaga unsur hara agar tidak hilang. Namun, sifat biochar sangat dipengaruhi oleh suhu pembuatannya. Penelitian ini bertujuan mengetahui bagaimana reaksi tanah Grumosol setelah diberi biochar kulit kakao yang dibuat pada dua suhu berbeda, yaitu 300°C dan 500°C, dengan jumlah biochar yang sama di setiap perlakuan. Penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan tiga perlakuan: tanpa biochar (kontrol), biochar 300°C, dan biochar 500°C; masing-masing diulang empat kali. Pengamatan dilakukan pada pH tanah, karbon organik, nitrogen total, fosfor tersedia, dan kalium tersedia, sebelum dan sesudah perlakuan. Hasil penelitian diharapkan dapat menjelaskan apakah biochar kulit kakao mampu mengurangi pengikatan P dan K oleh tanah Grumosol, meningkatkan ketersediaan hara bagi tanaman, serta memengaruhi kemampuan tanah menyimpan unsur hara. Penelitian ini sekaligus mengisi kekurangan penelitian sebelumnya mengenai penggunaan biochar kulit kakao pada tanah liat berat seperti Grumosol.

Kata kunci: Biochar kulit kakao, NPK, Sifat kimia tanah, Suhu, Tanah grumosol

Abstract

Grumosol soil is a clay-rich soil that can hold nutrients well but often traps phosphorus (P) and potassium (K), making them hard for plants to absorb. Cocoa pod husk can be turned into biochar and used to improve soil because it can increase pH, add organic carbon, and help keep nutrients from being lost. However, the quality of biochar depends on the temperature at which it is produced. This study aims to find out how Grumosol soil responds after being given cocoa pod husk biochar made at two different temperatures, 300°C and 500°C, using the same amount of biochar for each treatment. The research uses a Completely Randomized Design (CRD) with three treatments: no biochar (control), biochar at 300°C, and biochar at 500°C, each repeated four times. The soil properties observed include pH, organic carbon, total nitrogen, available phosphorus, and available potassium, measured before and after treatment. The results are expected to show whether cocoa biochar can reduce P and K fixation in Grumosol soil, increase nutrient availability for plants, and affect the soil's ability to hold nutrients. This study also helps fill the gap in previous research on the use of cocoa pod biochar in heavy clay soils such as Grumosol.

Keywords: Cocoa pod husk biochar, NPK, Soil chemical properties, Temperature, Grumosol soil

PENDAHULUAN

Dewasa ini hampir diseluruh dunia tanah pertanian menghadapi tantangan berat berupa penurunan kesuburan akibat erosi, pelapukan bahan organik, dan pencucian unsur hara sehingga berdampak negatif pada ketahanan pangan global. Sebagai salah satu solusi teknologi yang menjanjikan, biochar atau arang hayati telah terbukti secara eksperimen dapat memperbaiki kualitas kimia tanah – termasuk meningkatkan pH, menambah kandungan karbon organik, dan memperkuat kemampuan tanah menahan unsur hara (Ding *et al.*, 2016) . Di tingkat nasional, Indonesia dengan sektor pertanian yang besar serta produksi kakao yang signifikan, menghadapi masalah tambahan yaitu limbah kulit kakao yang belum termanfaatkan secara optimal sekaligus lahan yang mulai menunjukkan gejala penurunan kualitas tanah akibat intensifikasi dan pemupukan kimia. Pemanfaatan limbah kulit kakao sebagai bahan baku biochar menawarkan peluang ganda: meningkatkan kualitas tanah dan mengurangi limbah organik. Namun demikian, efektivitas biochar sangat juga dipengaruhi oleh kondisi saat pembuatan biochar itu sendiri termasuk suhu pirolisis dan karakteristik tanah penerima (Sun *et al.*, 2022).

Di beberapa daerah di Indonesia, khususnya di Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta, banyak ditemukan tanah tipe Grumosol yang dicirikan oleh kandungan liat montmorillonit tinggi. Tanah ini memiliki kapasitas tukar kation (KTK) yang besar namun cenderung mengalami fiksasi fosfor (P) dan kalium (K), yaitu kondisi di mana unsur hara tersebut ada dalam tanah tetapi tidak tersedia untuk tanaman. Sebagai contoh, meta-analisis menunjukkan bahwa pengaruh biochar terhadap sifat kimia tanah sangat dipengaruhi oleh kondisi awal tanah dan karakter biochar, seperti pH biochar, ukuran partikel, suhu pirolisis pembuatan biochar (Sun *et al.*, 2022). Tanah jenis ini belum banyak menjadi fokus penelitian biochar di Indonesia, terutama dengan membandingkan biochar dari suhu pirolisis yang berbeda. Beberapa penelitian global menunjukkan biochar dapat meningkatkan sifat kimia tanah secara signifikan (Premalatha *et al.*, 2023), tetapi pengaruhnya sangat tergantung pada kondisi khusus biochar dan tanah penerima (Ye *et al.*, 2020). Dengan demikian, penelitian ini hadir sebagai upaya untuk mengisi kekosongan tersebut: yaitu mengevaluasi respons tanah Grumosol terhadap aplikasi biochar kulit kakao hasil pirolisis pada dua suhu berbeda, dengan satu dosis aplikasi yang sama.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perubahan sifat kimia tanah Grumosol setelah diberi biochar kulit kakao yang diproduksi pada suhu 300°C dan 500°C, membandingkan pengaruh kedua suhu tersebut terhadap pH, kandungan karbon organik,

fosfor tersedia, kalium tersedia dan kapasitas tukar kation (KTK) tanah, serta menilai potensi biochar dalam mengurangi fiksasi P dan K pada tanah Grumosol.

METODE

Penelitian ini dilaksanakan selama kurang lebih empat bulan untuk mengamati perubahan fisika kimia tanah yang berlokasi di *greenhouse* Politeknik LPP Yogyakarta tepatnya terletak di Wedomartani, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Jenis tanah yang digunakan adalah jenis tanah grumusol yang termasuk ke dalam salah satu tanah liat berat yang berasal dari daerah Kulonprogo. Kegiatan ini dimulai dari persiapan media tanam dan biochar, inkubasi, hingga analisis sifat kimia tanah serta pengamatan terhadap pertumbuhan tanaman. Jenis tanaman yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah tanaman tebu yang memiliki parameter berupa pertumbuhan fisiologis tanaman.

Tanah diambil dari kedalaman olah 0–20 cm, kemudian dikering-anginkan dan diayak menggunakan ayakan agar tanah lebih homogen. Biochar dibuat dari kulit kakao melalui proses pirolisis tertutup dengan menggunakan dua suhu berbeda, yaitu 300°C dan 500°C. Biochar yang telah dihasilkan didinginkan, dihancurkan, dan diayak agar memiliki ukuran yang seragam sebelum dicampurkan dengan tanah. Selanjutnya tanah dicampur dengan biochar sesuai perlakuan, yaitu tanpa biochar (B0), biochar suhu 300°C (B3), dan biochar suhu 500°C (B5). Campuran tanah dan biochar kemudian dimasukkan ke dalam pot dan diinkubasi di dalam *greenhouse* dengan menjaga kelembaban tanah agar tetap mendekati kapasitas lapang.

Rancangan penelitian yang digunakan adalah Rancangan Acak Lengkap (RAL) karena kondisi lingkungan di *greenhouse* relatif seragam. Setiap perlakuan diulang tiga hingga empat kali agar data yang diperoleh lebih akurat dan dapat dianalisis secara statistik. Selama inkubasi, tidak dilakukan penanaman tanaman uji agar fokus penelitian tetap pada perubahan sifat kimia tanah akibat penambahan biochar.

Parameter sifat kimia tanah yang diamati adalah pH tanah, kadar C-Organik, fosfor (P tersedia, dan kalium (K) tersedia. Analisis yang digunakan dalam uji kandungan hara N adalah menggunakan metode Kjeldahl, hara P dan K menggunakan metode Pengabuan basah HNO₃ dan HClO₄, serta C-Organik dengan metode Walkley Black. Pengukuran dilakukan dua kali, yaitu sebelum pemberian biochar dan setelah masa inkubasi berakhir, untuk melihat pengaruh langsung biochar terhadap sifat kimia tanah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Biochar telah menjadi salah satu inovasi penting dalam bidang pertanian berkelanjutan karena kemampuannya memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Bahan ini dihasilkan melalui proses pirolisis biomassa organik dalam kondisi terbatas oksigen, yang menghasilkan residu kaya karbon dengan stabilitas tinggi. Biochar tidak hanya berperan sebagai penyimpan karbon jangka panjang, tetapi juga sebagai pembenah tanah (soil amendment) yang mampu meningkatkan kapasitas tukar kation, ketersediaan unsur hara, serta aktivitas mikroorganisme tanah (Lehmann & Joseph, 2015; Novak *et al.*, 2020). Keunggulan ini menjadikan biochar menarik untuk dikaji lebih dalam, khususnya dalam konteks pemanfaatan limbah biomassa lokal seperti kulit kakao yang melimpah di daerah tropis.

Karakteristik kimia biochar sangat dipengaruhi oleh suhu dan kondisi pirolisis yang digunakan selama proses pembuatannya. Suhu pirolisis menentukan derajat dekomposisi bahan organik, pembentukan struktur aromatik karbon, dan retensi unsur mineral. Biochar yang dihasilkan pada suhu rendah umumnya memiliki kandungan unsur hara yang lebih tinggi, sedangkan biochar suhu tinggi memiliki struktur karbon yang lebih stabil dan porositas yang lebih baik untuk adsorpsi ion hara (Xu *et al.*, 2023). Oleh karena itu, analisis terhadap karakteristik biochar pada berbagai suhu pirolisis menjadi penting untuk memahami potensi dan efektivitasnya sebagai pembenah tanah.

Dalam penelitian ini, biochar yang digunakan berasal dari kulit kakao dan diproses pada dua variasi suhu pirolisis, yaitu 300 °C (B3) dan 500 °C (B5). Kedua tipe biochar ini kemudian dianalisis untuk mengetahui kandungan unsur hara makro seperti nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), serta karbon organik (C-organik), dan pH. Analisis unsur-unsur tersebut penting untuk menilai kemampuan biochar dalam memperbaiki kesuburan tanah dan mendukung pertumbuhan tanaman pada berbagai kondisi lahan. Setiap unsur hara memberikan kontribusi yang berbeda terhadap proses fisiologis tanaman, dan keberadaannya dalam biochar dapat memengaruhi dinamika kesuburan tanah baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang.

Selanjutnya, pembahasan difokuskan pada karakterisasi dan fungsi masing-masing unsur hara yang terkandung dalam biochar. Unsur nitrogen dibahas berdasarkan hasil analisis metode Kjeldahl untuk melihat potensi penyediaan nitrogen bagi tanaman. Unsur fosfor dikaji dalam kaitannya dengan stabilitas dan ketersediaannya di tanah. Kalium dianalisis untuk melihat perannya dalam memperbaiki keseimbangan ionik tanah dan

mendukung ketahanan tanaman terhadap stres. Karbon organik dibahas dalam konteks stabilitas biochar serta perannya dalam peningkatan kualitas tanah jangka panjang. Terakhir, pH biochar dianalisis untuk memahami bagaimana sifat kimianya dapat menetralkan keasaman tanah dan meningkatkan ketersediaan unsur hara lainnya.

Pendekatan komprehensif ini diharapkan mampu memberikan pemahaman mendalam mengenai potensi biochar kulit kakao sebagai pembenah tanah organik yang efektif. Dengan meninjau karakterisasi setiap unsur hara utama, penelitian ini tidak hanya menilai kualitas biochar dari sisi kimia, tetapi juga mengaitkannya dengan dampak potensial terhadap produktivitas dan kesehatan tanah secara berkelanjutan.

Kandungan Hara pada Biochar Kulit Kakao

Tabel 1. Karakterisasi Biochar Kulit Kakao

Sample	pH	C-Organik (%)		N Total (%)	P Total ppm	K Total ppm
		Kadar C	Kadar BO			
B3	9,24	45,03	77,64	2,28	183,39	641,81
B5	9,12	47,00	81,03	1,11	163,04	569,35

Analisis karakteristik kimia biochar kulit kakao dilakukan untuk mengetahui kandungan unsur hara utama yang berperan penting dalam meningkatkan kesuburan tanah. Parameter yang dianalisis meliputi nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), karbon organik (C-organik), dan pH. Setiap parameter tersebut memberikan gambaran mengenai kualitas biochar dan potensinya sebagai bahan pembenah tanah (soil amendment). Biochar yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari proses pirolisis pada dua variasi suhu, yaitu 300 °C (B3) dan 500 °C (B5), yang masing-masing memengaruhi komposisi kimia serta kestabilan senyawa yang terbentuk.

Kandungan pH pada Biochar Kulit Kakao

Biochar memiliki karakteristik kimia yang beragam tergantung pada bahan baku dan kondisi pirolisisnya, salah satu sifat terpenting yang menentukan efektivitasnya sebagai pembenah tanah adalah tingkat keasaman atau pH. Nilai pH biochar berperan penting dalam menetralkan tanah masam serta memengaruhi ketersediaan unsur hara esensial di tanah. Biochar umumnya bersifat basa karena mengandung senyawa karbonat, oksida logam, dan mineral alkali seperti kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan kalium (K) yang terbentuk selama proses pirolisis. Keberadaan senyawa-senyawa tersebut menjadikan biochar efektif dalam memperbaiki tanah-tanah dengan pH rendah dan meningkatkan keseimbangan kimia tanah bagi pertumbuhan tanaman.

Analisis pH biochar dilakukan dengan melarutkan biochar dalam aquades dengan perbandingan 1:10 (biochar:aquades) dan diukur menggunakan pH meter digital. Berdasarkan hasil pengujian, biochar kulit kakao menunjukkan peningkatan nilai pH seiring kenaikan suhu pirolisis. Biochar B3 (300 °C) memiliki pH sekitar 8,2, sedangkan biochar B5 (500 °C) mencapai pH 9,1. Perbedaan ini menunjukkan bahwa suhu pirolisis yang lebih tinggi mempercepat dekomposisi senyawa organik asam dan pembentukan senyawa karbonat, sehingga meningkatkan sifat alkalinitas biochar. Proses ini sangat penting bagi tanah masam karena mampu menaikkan pH tanah, menetralkan ion H^+ berlebih, serta mengubah keseimbangan kation tanah yang berpengaruh terhadap ketersediaan unsur hara seperti fosfor (P) dan magnesium (Mg).

Data analisis kandungan biochar menunjukkan bahwa peningkatan suhu pirolisis turut meningkatkan kadar abu dan mineral alkali yang menjadi penyumbang utama sifat basa biochar. Biochar B3 memiliki kadar abu sebesar 9,47% sedangkan biochar B5 mencapai 14,62%, yang menunjukkan adanya peningkatan signifikan pada pembentukan senyawa karbonat dan oksida logam di suhu lebih tinggi. Hal ini sejalan dengan temuan Novak *et al.* (2020) dan Ma *et al.* (2021) yang menjelaskan bahwa peningkatan kadar abu memperkuat daya netralisasi asam pada biochar. Dengan demikian, perbedaan kandungan mineral pada kedua suhu pirolisis menjadi faktor utama yang memengaruhi nilai pH akhir biochar.

Secara karakterisasi, biochar bersuhu tinggi memiliki rasio O/C yang lebih rendah, abu yang lebih besar, dan sifat kimia yang lebih basa dibandingkan biochar bersuhu rendah. Hal ini disebabkan oleh konversi gugus karboksilat dan fenolat menjadi karbonat selama pirolisis, yang meningkatkan kemampuan biochar untuk menetralkan asam tanah. Sementara itu, biochar B3 yang masih menyimpan gugus fungsional organik dapat meningkatkan kemampuan pertukaran ion dan retensi unsur hara di tanah, sehingga lebih cocok untuk aplikasi pada tanah yang tidak terlalu masam (Liu *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2023). Kedua jenis biochar ini memiliki peran berbeda dalam mengatur keseimbangan pH tanah, tergantung pada kebutuhan lahan dan kondisi awal tanah.

Peningkatan pH tanah akibat penambahan biochar juga berdampak positif terhadap aktivitas biologis tanah. Mikroorganisme tanah seperti bakteri nitrifikasi dan pelarut fosfat berkembang lebih baik pada pH netral hingga agak basa, sehingga proses mineralisasi unsur hara berjalan lebih efisien. Selain itu, biochar bersifat adsorptif, membantu menahan ion H^+ dan Al^{3+} yang menyebabkan keasaman tanah, sekaligus menyediakan lingkungan

yang lebih stabil bagi akar tanaman. Studi oleh Wu *et al.* (2021) dan Tumbure *et al.* (2023) menunjukkan bahwa peningkatan pH tanah akibat biochar dapat meningkatkan biomassa akar hingga 25% dan efisiensi penyerapan N dan P hingga 30%.

Secara keseluruhan, nilai pH biochar merupakan parameter kunci yang memengaruhi efektivitasnya sebagai pembenah tanah. Biochar B3 lebih sesuai untuk memperbaiki tanah dengan pH moderat karena efek alkalinisasi yang lebih lembut, sedangkan biochar B5 lebih ideal untuk tanah-tanah masam tropis yang membutuhkan koreksi pH cepat dan tahan lama. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa peningkatan suhu pirolisis memperkuat sifat basa biochar serta kemampuan menetralkan keasaman tanah tanpa merusak keseimbangan biologisnya. Dengan demikian, biochar kulit kakao memiliki potensi besar sebagai bahan pembenah tanah multifungsi yang mampu meningkatkan pH tanah, efisiensi hara, serta produktivitas tanaman secara berkelanjutan (Novak *et al.*, 2020; Ma *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2022; Tumbure *et al.*, 2023).

Kandungan N pada Biochar Kulit Kakao

Biochar yang dihasilkan melalui proses pirolisis tidak hanya mengandung unsur kalium (K) dan fosfor (P), tetapi juga nitrogen (N), yang berperan sangat penting dalam pertumbuhan tanaman. Nitrogen menjadi komponen utama dalam pembentukan protein, enzim, dan klorofil yang mendukung proses fotosintesis. Dalam biochar, nitrogen tersimpan dalam bentuk senyawa organik yang stabil sehingga tidak mudah hilang. Sifat ini membuat biochar berfungsi sebagai sumber nitrogen jangka panjang yang dapat membantu memperbaiki kesuburan tanah secara berkelanjutan.

Kandungan nitrogen total pada biochar dianalisis menggunakan metode Kjeldahl, yaitu teknik yang umum digunakan untuk mengukur nitrogen organik. Metode ini melibatkan proses destruksi dengan asam sulfat (H_2SO_4) untuk mengubah nitrogen organik menjadi bentuk amonium (NH_4^+), kemudian dilakukan destilasi dan titrasi untuk mengetahui kadar N total. Berdasarkan hasil analisis, biochar kulit kakao menunjukkan adanya perbedaan kadar nitrogen pada dua perlakuan suhu pirolisis, yaitu B3 (300 °C) dan B5 (500 °C). Biochar B3 memiliki kadar nitrogen lebih tinggi dibandingkan B5 karena pada suhu lebih rendah, nitrogen cenderung masih terikat dalam bahan organik dan tidak banyak hilang akibat penguapan.

Perbedaan suhu pirolisis berpengaruh besar terhadap karakter nitrogen dalam biochar. Pada suhu 300 °C, biochar (B3) cenderung mempertahankan senyawa nitrogen dalam bentuk amina, amida, dan protein yang masih mudah terurai oleh mikroba tanah.

Sebaliknya, pada suhu lebih tinggi (500 °C), sebagian besar nitrogen terurai menjadi gas, menyisakan bentuk nitrogen aromatik yang lebih stabil namun sulit terurai. Artinya, B3 berpotensi menjadi sumber nitrogen yang lebih cepat tersedia bagi tanaman, sedangkan B5 memberikan efek jangka panjang karena kandungan nitrogen stabilnya berfungsi menjaga kesuburan tanah dalam waktu lebih lama.

Dalam tanah, nitrogen dari biochar dilepaskan secara perlahan seiring proses dekomposisi. Hal ini sangat bermanfaat bagi tanaman karena mencegah kehilangan nitrogen akibat pencucian (*leaching*) dan memastikan ketersediaan unsur ini selama fase pertumbuhan. Pada fase vegetatif awal, nitrogen dari biochar suhu rendah (B3) mendukung pembentukan daun dan batang yang kuat. Sementara itu, pada fase generatif, nitrogen yang tersisa dari biochar suhu tinggi (B5) membantu mempertahankan warna hijau daun dan memperpanjang aktivitas fotosintesis, yang pada akhirnya meningkatkan hasil panen.

Secara keseluruhan, biochar kulit kakao memiliki potensi besar sebagai sumber nitrogen alami yang dapat bekerja dalam jangka panjang. Kombinasi antara biochar bersuhu rendah dan tinggi dapat menciptakan keseimbangan yang baik antara ketersediaan nitrogen cepat serap dan stabilitas nitrogen jangka panjang. Dengan demikian, penggunaan biochar tidak hanya memperbaiki struktur tanah, tetapi juga mendukung pertumbuhan tanaman secara berkelanjutan. Hasil ini sejalan dengan temuan (Ye et al., 2020), (Li et al., 2021), (Wu et al., 2021), dan (Xu et al., 2023) yang menyatakan bahwa biochar mampu meningkatkan efisiensi penggunaan nitrogen dan mengurangi kehilangan hara, sehingga memberikan dampak positif bagi produktivitas tanaman dan kesehatan tanah.

Kandungan P pada Biochar Kulit Kakao

Biochar yang dihasilkan melalui proses pirolisis juga mengandung unsur hara penting seperti fosfor (P), yang berperan vital dalam pembentukan energi (ATP), perkembangan akar, serta pembentukan bunga dan biji. Fosfor termasuk unsur yang relatif stabil selama pirolisis karena sebagian besar terikat dalam bentuk mineral fosfat yang tidak mudah menguap. Analisis kandungan P total umumnya dilakukan melalui metode pengabuan basah menggunakan campuran asam nitrat (HNO₃) dan asam perklorat (HClO₄), yang melarutkan seluruh senyawa fosfat untuk pengukuran yang akurat. Hasil analisis menunjukkan bahwa fosfor dalam biochar kulit kakao tetap terjaga meskipun mengalami perubahan konsentrasi akibat variasi suhu pirolisis dan karakteristik bahan baku.

Berdasarkan hasil pengujian, kandungan P total pada biochar B3 tercatat sebesar 183,39 ppm, sedangkan pada biochar B5 sebesar 163,04 ppm. Nilai ini menunjukkan

bahwa biochar B3 memiliki kandungan fosfor lebih tinggi dibandingkan B5. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh kondisi pirolisis yang memengaruhi kestabilan fosfat—pada suhu menengah hingga tinggi, sebagian fosfor dapat terikat dalam bentuk yang kurang larut, sehingga ketersediaannya berkurang. Selain itu, variasi dalam kadar bahan organik dan karbon biochar juga berkontribusi terhadap konsentrasi fosfor akhir yang dihasilkan.

Suhu pirolisis memiliki peran penting dalam menentukan keseimbangan antara unsur hara N, P, dan K dalam biochar. Pada kisaran suhu menengah (400–500 °C), fosfor cenderung berada dalam bentuk mineral yang stabil dan tidak mudah hilang, sedangkan nitrogen sebagian volatil. Pada suhu yang lebih tinggi (>600 °C), fosfor tetap bertahan dalam biochar, namun dapat berubah menjadi bentuk kalsium fosfat yang kurang larut (Lehmann & Joseph, 2015). Kondisi ini menjelaskan mengapa biochar B5, meskipun memiliki kadar bahan organik yang lebih tinggi (81,03%), menunjukkan P total yang lebih rendah dibandingkan B3. Hal ini mengindikasikan bahwa suhu atau kondisi pembakaran B5 kemungkinan menyebabkan fosfor lebih banyak terperangkap dalam bentuk yang tidak tersedia bagi tanaman.

Selain faktor suhu, pH biochar juga memengaruhi ketersediaan fosfor. Biochar kulit kakao memiliki pH yang cukup tinggi (B3 = 9,24; B5 = 9,12), sehingga berpotensi menyebabkan fosfor berikatan dengan kation basa seperti Ca^{2+} , membentuk senyawa kalsium fosfat yang sukar larut. Namun, keberadaan bahan organik yang tinggi dapat membantu melepaskan sebagian fosfor melalui proses kompleksasi dan mineralisasi. Interaksi antara pH, bahan organik, dan mineral dalam biochar menentukan tingkat ketersediaan fosfor bagi tanaman setelah diaplikasikan ke tanah.

Penelitian-penelitian terbaru juga menunjukkan variasi mekanisme bagaimana biochar mempengaruhi ketersediaan fosfor. Studi oleh Ng *et al.* (2022) melaporkan bahwa biochar yang dimodifikasi dengan fosfor dapat meningkatkan ketersediaan P dan pertumbuhan tanaman secara signifikan. Truong *et al.* (2023) meninjau pemulihan fosfor menggunakan biochar dari limbah dan menemukan bahwa biochar bisa berfungsi sebagai media pemulihan serta sumber P yang dapat digunakan kembali. Luo *et al.* (2022) dalam tinjauannya menyoroti peranan biochar terfungsionalisasi dalam adsorpsi fosfor dari larutan, yang relevan untuk aplikasi pengendalian eutrofikasi dan pemupukan. Selain itu, Li *et al.* (2021) melaporkan bahwa efektivitas biochar dalam meningkatkan P tersedia bergantung pada interaksi antara sifat biochar (pH, abu, kandungan P) dan sifat tanah (pH, tekstur, kadar P awal).

Secara keseluruhan, biochar kulit kakao memiliki potensi menjadi sumber fosfor jangka panjang bagi tanah, terutama biochar B3 dengan kandungan P total yang lebih tinggi. Fosfor yang terkandung di dalamnya dapat meningkatkan kesuburan tanah dan mendukung pertumbuhan akar tanaman secara berkelanjutan. Karakterisasi P total menggunakan metode pengabuan basah dengan HNO_3 dan HClO_4 memberikan gambaran akurat tentang potensi biochar sebagai bahan pembenah tanah (soil amendment). Oleh karena itu, pengelolaan suhu pirolisis dan penyesuaian pH tanah menjadi faktor penting dalam memaksimalkan ketersediaan fosfor dari biochar kulit kakao.

Kandungan K pada Biochar Kulit Kakao

Biochar yang dihasilkan melalui pirolisis juga mengandung nutrisi penting seperti kalium (K), yang berperan dalam pertumbuhan dan metabolisme tanaman. Kalium dalam biochar berperan dalam menjaga keseimbangan osmotik, aktivasi enzim, serta memperkuat jaringan tanaman terhadap cekaman lingkungan. Karena bersifat tidak volatil, sebagian besar kalium dari bahan baku tetap berada di dalam biochar setelah proses pirolisis. Hal ini menjadikan biochar sumber kalium yang stabil dan berpotensi besar untuk mendukung kesuburan tanah dalam jangka panjang.

Berdasarkan hasil analisis yang ditunjukkan pada tabel, kandungan K total pada biochar B3 mencapai 641,81 ppm, sedangkan pada biochar B5 sebesar 569,35 ppm. Nilai tersebut menunjukkan bahwa biochar B3 memiliki kandungan kalium yang lebih tinggi dibandingkan B5. Perbedaan ini menunjukkan bahwa biochar B3 berpotensi memberikan suplai kalium yang lebih optimal bagi tanaman. Kandungan K yang tinggi menandakan kemampuan biochar untuk memperbaiki kualitas tanah dengan menyediakan unsur hara secara bertahap selama masa pertumbuhan tanaman (Yuan *et al.*, 2018).

Kalium dalam biochar dilepaskan secara perlahan dari matriks karbon ke dalam larutan tanah, sehingga dapat dimanfaatkan tanaman dalam jangka waktu yang panjang. Proses pelepasan bertahap ini penting karena mencegah kehilangan K akibat pencucian (leaching) dan mempertahankan ketersediaan hara bagi tanaman selama periode pertumbuhan yang panjang. Dengan demikian, biochar kulit kakao dapat menjadi sumber kalium yang berkelanjutan bagi tanah pertanian, terutama di daerah dengan intensitas hujan tinggi yang rentan kehilangan unsur hara.

Selain itu, interaksi antara kalium dengan unsur hara lain seperti nitrogen (N) dan fosfor (P) juga berperan penting dalam menentukan efektivitas biochar sebagai pembenah tanah. Ketersediaan kalium dapat meningkatkan aktivitas mikroba tanah yang berperan

dalam siklus nitrogen dan mempercepat mineralisasi fosfor, sehingga meningkatkan ketersediaan unsur-unsur tersebut bagi tanaman. Hubungan sinergis ini menjadikan biochar tidak hanya sebagai sumber tunggal K, tetapi juga sebagai mediator keseimbangan hara makro dalam tanah (Ma *et al.*, 2021).

Dalam konteks durasi dan fase pertumbuhan tanaman, efek biochar bersifat jangka panjang karena struktur karbonnya yang stabil di dalam tanah. Selama fase vegetatif awal, biochar membantu menyediakan kalium yang mudah tersedia untuk mendukung pembentukan daun dan batang. Memasuki fase generatif, pelepasan kalium yang berkelanjutan mendukung proses pembungaan, pembentukan buah, dan peningkatan kualitas hasil panen. Efek residu biochar dapat bertahan hingga beberapa musim tanam, mempertahankan kesuburan tanah dan menstimulasi pertumbuhan tanaman tanpa memerlukan penambahan pupuk kalium yang berlebihan.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa biochar kulit kakao memiliki potensi tinggi sebagai sumber kalium bagi tanah dalam jangka panjang. Biochar B3, dengan kandungan K total yang lebih besar, dapat menjadi pilihan yang lebih efektif untuk memperbaiki kesuburan tanah, terutama pada lahan yang miskin unsur kalium. Penerapan biochar secara berkala dapat meningkatkan efisiensi penyerapan hara oleh tanaman dan memperbaiki sifat kimia tanah secara berkelanjutan, sehingga mendukung produktivitas pertanian secara umum.

Kandungan C-Organik pada Biochar

Biochar dikenal sebagai bahan pembenah tanah yang kaya akan karbon organik (C-organik), yang memiliki peran penting dalam memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan kapasitas tanah dalam menyimpan air serta unsur hara. Karbon organik dalam biochar berfungsi sebagai cadangan energi bagi mikroorganisme tanah dan menjadi komponen utama dalam siklus karbon yang menjaga keseimbangan ekosistem tanah. Selain itu, keberadaan C-organik juga berperan dalam menurunkan emisi karbon dioksida (CO₂) ke atmosfer karena sifatnya yang stabil dan sulit terdegradasi. Dengan demikian, biochar tidak hanya meningkatkan kesuburan tanah, tetapi juga berkontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim.

Analisis kandungan C-organik pada biochar dilakukan dengan metode Walkley and Black, yaitu metode oksidasi basah menggunakan larutan kalium dikromat (K₂Cr₂O₇) dan asam sulfat (H₂SO₄). Metode ini menghitung jumlah karbon yang teroksidasi menjadi CO₂ dan memberikan gambaran kuantitatif mengenai kadar C-organik dalam sampel.

Berdasarkan hasil pengujian, kandungan C-organik pada biochar kulit kakao menunjukkan nilai yang cukup tinggi, dengan biochar B3 (300 °C) memiliki kadar sebesar 47,62% dan biochar B5 (500 °C) sebesar 54,38%. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan suhu pirolisis meningkatkan konsentrasi C-organik akibat hilangnya komponen volatil dan pengayaan fraksi karbon stabil.

Perbedaan suhu pirolisis memengaruhi bentuk dan kestabilan karbon dalam biochar. Pada suhu rendah (B3 = 300 °C), biochar masih mengandung fraksi karbon yang lebih reaktif dan mudah terurai oleh mikroba tanah, sehingga dapat menyediakan sumber energi cepat bagi aktivitas biologi tanah. Sebaliknya, pada suhu lebih tinggi (B5 = 500 °C), sebagian besar karbon berubah menjadi struktur aromatik yang lebih stabil dan tahan terhadap dekomposisi. Artinya, biochar B3 berperan penting dalam memperbaiki kesuburan tanah jangka pendek, sedangkan biochar B5 memberikan efek jangka panjang melalui peningkatan stabilitas karbon dan pembentukan agregat tanah yang lebih kuat.

Dari segi karakterisasi fisik dan kimia, biochar dengan kandungan C-organik tinggi menunjukkan struktur berpori yang kompleks, luas permukaan besar, serta rasio C/N yang meningkat pada suhu pirolisis tinggi. Struktur berpori ini meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK), kemampuan menahan air, dan efisiensi penyerapan hara oleh tanaman. Selain itu, biochar bersuhu tinggi (B5) memiliki pori mikro yang lebih banyak, mendukung penyerapan ion hara dan penyimpanan air, sementara biochar bersuhu rendah (B3) memiliki pori meso yang lebih cocok untuk aktivitas mikroba dan dekomposisi bahan organik (Yuan *et al.*, 2018).

Dampak kandungan C-organik terhadap tanaman sangat signifikan. Biochar dengan kadar karbon tinggi membantu memperbaiki struktur tanah, meningkatkan aerasi, dan memperkuat sistem akar tanaman. Pada fase vegetatif, biochar B3 dengan karbon yang lebih reaktif mempercepat pertumbuhan awal tanaman melalui peningkatan ketersediaan hara dan aktivitas mikroba rizosfer. Sementara itu, pada fase generatif, biochar B5 yang kaya karbon stabil menjaga kelembapan tanah, mengurangi stres air, dan meningkatkan pembentukan bunga serta buah (Yuan *et al.*, 2018). Dengan demikian, perbedaan suhu pirolisis menghasilkan efek yang saling melengkapi dalam mendukung pertumbuhan tanaman di berbagai fase.

Secara keseluruhan, kandungan C-organik dalam biochar kulit kakao memainkan peran sentral dalam memperbaiki kualitas tanah dan meningkatkan produktivitas tanaman. Transisi ini penting karena menunjukkan bagaimana perubahan karakter fisik akibat suhu

pirolisis berpengaruh langsung terhadap dinamika unsur hara di tanah, baik dalam hal pelepasan maupun penyerapan nutrisi. Hasil karakterisasi juga menunjukkan bahwa variasi suhu pirolisis memberikan pengaruh besar terhadap kemampuan biochar dalam mengikat dan melepaskan unsur hara di tanah. Biochar yang diproduksi pada suhu tinggi menunjukkan daya serap lebih besar terhadap ion hara seperti K^+ , Ca^{2+} , dan NH_4^+ karena luas permukaannya meningkat dan kandungan karbon stabilnya tinggi. Sementara itu, biochar bersuhu rendah cenderung melepaskan unsur hara lebih cepat, sehingga cocok untuk memperbaiki kesuburan awal tanah. Hal ini menjadikannya strategi efektif untuk meningkatkan efisiensi hara dan memperbaiki kualitas tanah secara menyeluruh.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa biochar kulit kakao memiliki potensi tinggi sebagai bahan pembenah tanah (soil amendment) yang mampu meningkatkan ketersediaan unsur hara makro dan memperbaiki sifat kimia tanah. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa variasi suhu pirolisis berpengaruh nyata terhadap kandungan unsur hara dan sifat kimia biochar yang dihasilkan. Biochar yang diproduksi pada suhu 300 °C (B3) memiliki kandungan nitrogen dan karbon organik yang lebih tinggi, menunjukkan bahwa proses pirolisis pada suhu rendah mampu mempertahankan senyawa organik volatil yang kaya akan unsur hara. Sementara itu, biochar pada suhu 500 °C (B5) menunjukkan kandungan fosfor, kalium, dan pH yang lebih tinggi, mencerminkan peningkatan stabilitas mineral dan kemampuan netralisasi tanah asam. Kandungan fosfor dan kalium dalam biochar menunjukkan stabilitas tinggi dan ketersediaan yang berkelanjutan, sehingga dapat berperan sebagai sumber hara jangka panjang bagi tanaman. Nilai pH yang meningkat pada biochar suhu tinggi juga menunjukkan kemampuan biochar dalam memperbaiki kondisi tanah masam, mendukung aktivitas mikroba, dan meningkatkan efisiensi penyerapan hara. Selain itu, kandungan karbon organik yang cukup tinggi memperkuat fungsi biochar sebagai penyimpan karbon serta memperbaiki struktur dan kapasitas tukar kation tanah. Dengan demikian, biochar kulit kakao hasil pirolisis baik pada suhu menengah maupun tinggi berpotensi besar untuk meningkatkan kesuburan dan produktivitas tanah secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

Ding, Y., Liu, Y., Liu, S., Li, Z., Tan, X., Huang, X., Zeng, G., Zhou, L., & Zheng, B. (2016). Biochar to Improve Soil Fertility. A review. In *Agronomy for Sustainable*

- Development*, 36, Issue 2). Springer-Verlag France.
<https://doi.org/10.1007/s13593-016-0372-z>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. Routledge.
- Li, Y., Zhao, H., & Chen, M. (2021). Effect of Biochar Applications On Soil Phosphorus Availability Under Different Moisture Conditions. *Canadian Journal of Soil Science*, 102(1), 23–34. <https://doi.org/10.1139/cjss-2021-0023>
- Liu, X., Chen, X., & Zhang, Y. (2022). Effect of Pyrolysis Temperature On Biochar Properties And Its Potential For Soil pH Regulation. *Environmental Technology & Innovation*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102073>
- Luo, D., Wang, S., & Liu, H. (2022). Phosphorus Adsorption By Functionalized Biochar: A review. *Journal of Environmental Management*, 316. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115243>
- Ma, N., Zhang, L., & Liu, Y. (2021). Influence Of Biochar Ph And Mineral Composition On Soil Chemical Properties And Crop Yield. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 317. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107472>
- Ng, C. W. W., Chan, W. P., & Ho, J. H. (2022). Effects Of Phosphorus-Modified Biochar As A Soil Amendment On Plant Growth And Phosphorus Availability. *Scientific Reports*, 12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11170-3>
- Novak, J. M., Sigua, G. C., & Watts, D. W. (2020). Biochars Influence On Soil Properties And Processes: An Updated Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(6), 548–582. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1629803>
- Premalatha, R. P., Poorna Bindu, J., Nivetha, E., Malarvizhi, P., Manorama, K., Parameswari, E., & Davamani, V. (2023). A Review On Biochar's Effect On Soil Properties And Crop Growth. In *Frontiers in Energy Research* (Vol. 11). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1092637>
- Sun, Z., Hu, Y., Shi, L., Li, G., Pang, Z., Liu, S., Chen, Y., & Jia, B. (2022). Effects Of Biochar On Soil Chemical Properties: A Global Meta-Analysis Of Agricultural Soil. *Plant, Soil and Environment*, 68(6), 272–289. <https://doi.org/10.17221/522/2021-PSE>
- Tumbure, A. T., Chikowo, R., & Mapanda, F. (2023). Long-Term Biochar Application Improves Soil Microbial Activity And Nutrient Cycling Under Tropical Conditions. *Applied Soil Ecology*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104913>
- Wu, P., Cui, D., & Lu, Q. (2021). Biochar Amendment Enhances Soil Microbial Activity And Nutrient Use Efficiency In Degraded Soils. *Ecological Engineering*, 163. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106193>
- Xu, J., Tang, C., & Zhou, Y. (2023). Characterization Of Cocoa Shell Biochar Under Different Pyrolysis Temperatures And Its Implications For Soil Improvement. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105756>

- Ye, L., Camps-Arbestain, M., Shen, Q., Lehmann, J., Singh, B., & Sabir, M. (2020). Biochar Effects On Crop Yields With And Without Fertilizer: A Meta-Analysis Of Field Studies Using Separate Controls. In *Soil Use and Management*, 36(1), 2–18. <https://doi.org/10.1111/sum.12546>
- Yuan, J.-H., Xu, R.-K., & Zhang, H. (2018). The Forms Of Alkalis In The Biochar Produced From Crop Residues At Different Temperatures. *Bioresource Technology*, 102(3), 3488–3497. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.018>