

Karakteristik Kimia Biochar Limbah Bonggol Jagung pada Berbagai Durasi Pirolisis: pH, Kapasitas Tukar Kation, dan C-Organik

Dirga Sapta Sara¹⁾, Emma Trinurani Sofyan¹⁾ Ahmad Choibar Tridakusumah²⁾

¹⁾ Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran

²⁾ Departemen Sosial Ekonomi Pertanian, Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran
Jln. Ir. Soekarno km. 21 Jatinangor, Kab. Sumedang 45363 Jawa Barat

Korespondensi : dirga.sapta@unpad.ac.id

ABSTRACT

Biochar is a soil amendment material that can be produced through the pyrolysis of biomass, including corn cobs. This study aimed to determine the effect of pyrolysis duration on the chemical properties of corn cob biochar based on pH, cation exchange capacity (CEC), and organic carbon (C-organic) content. The study was conducted from May to July 2026 using a pyrolysis reactor at a temperature of 400 °C with four pyrolysis durations: 3 h (P1), 4 h (P2), 5 h (P3), and 6 h (P4), with three replications for each treatment. The observed parameters were pH, CEC, and organic carbon content. The data were analyzed using analysis of variance followed by Duncan's Multiple Range Test at the 5% significance level when significant differences were detected. The results showed that increasing the pyrolysis duration increased the pH and organic carbon content of the biochar. The pH values were 8.12, 8.31, 8.53, and 8.66 for P1 to P4, respectively, while the organic carbon content increased from 62.40% to 71.80%. CEC increased from 32.53 cmol kg⁻¹ in P1 to 42.40 cmol kg⁻¹ in P3, followed by a decrease to 40.40 cmol kg⁻¹ in P4. Treatment P4 produced the highest pH and organic carbon content, whereas P3 resulted in the highest CEC. Thus, pyrolysis durations of 5–6 hour produced favorable chemical characteristics of corn cob biochar based on the evaluated parameters.

Keywords: biochar, cation exchange capacity, organic carbon, pH, pyrolysis duration

1. PENDAHULUAN

Limbah bonggol jagung merupakan salah satu residu pertanian yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku untuk menghasilkan produk bernilai tambah. Pemanfaatan residu biomassa menjadi biochar dapat menjadi alternatif pengelolaan limbah sekaligus menghasilkan material kaya karbon yang berpotensi digunakan dalam pengelolaan tanah. Biochar dihasilkan melalui proses konversi termokimia biomassa pada kondisi oksigen terbatas sehingga sebagian karbon dari bahan baku dapat dipertahankan dalam bentuk yang relatif stabil. Karakteristik tersebut menjadikan biochar menarik untuk dimanfaatkan dalam pengelolaan tanah dan penyimpanan karbon (Lehmann *et al.*, 2006).

Bonggol jagung memiliki kandungan bahan organik yang memungkinkan untuk dikonversi menjadi biochar melalui proses pirolisis. Biochar yang berasal dari bonggol jagung telah digunakan dalam penelitian

terkait perbaikan sifat tanah. Amoakwah *et al.* (2020) menunjukkan bahwa aplikasi biochar bonggol jagung pada tanah bertekstur lempung berpasir di lingkungan tropis dapat meningkatkan penyimpanan dan memengaruhi kualitas karbon organik tanah. Penggunaan biochar bonggol jagung juga dilaporkan dapat memengaruhi beberapa sifat tanah dan kondisi pertumbuhan tanaman. Abbas *et al.* (2021) menunjukkan bahwa biochar yang berasal dari bonggol jagung dapat meningkatkan beberapa indikator kualitas tanah dan mendukung pertumbuhan jagung pada kondisi cekaman kekeringan.

Karakteristik biochar tidak hanya ditentukan oleh jenis bahan bakunya, tetapi juga oleh kondisi proses pirolisis. Suhu dan durasi proses merupakan faktor yang dapat memengaruhi tingkat perubahan struktur dan komposisi bahan organik selama pembentukan biochar. Perubahan kondisi pirolisis dapat menghasilkan biochar dengan karakteristik

pH, kandungan karbon, luas permukaan, porositas, dan kapasitas pertukaran kation yang berbeda. Tomczyk *et al.* (2020) menjelaskan bahwa karakteristik fisikokimia biochar dipengaruhi oleh jenis bahan baku dan kondisi pirolisis, sehingga pengendalian kondisi produksi menjadi penting untuk memperoleh biochar dengan karakteristik yang sesuai untuk tujuan penggunaannya.

Selain suhu, durasi pirolisis atau waktu tinggal (*retention time*) merupakan aspek penting dalam proses pembentukan biochar. Perpanjangan waktu proses memberikan kesempatan yang lebih lama bagi biomassa untuk mengalami dekomposisi termal sehingga dapat memengaruhi karakteristik produk akhir. Penelitian pada residu bonggol jagung melalui hidrotermal karbonisasi menunjukkan bahwa perubahan waktu tinggal dapat memengaruhi karakteristik produk karbon yang dihasilkan, meskipun besarnya perubahan bergantung pada kondisi proses yang digunakan (Zhang *et al.*, 2015). Pada proses pirolisis biochar, waktu dan suhu juga dapat berinteraksi dalam menentukan tingkat perubahan sifat fisikokimia material. Oleh karena itu, pengujian durasi pirolisis pada kondisi suhu yang dikendalikan dapat memberikan informasi mengenai perubahan karakteristik biochar yang dihasilkan.

Nilai pH merupakan salah satu parameter penting untuk mengetahui karakteristik kimia biochar. Biochar pada umumnya dapat memiliki sifat netral hingga basa, bergantung pada bahan baku dan kondisi produksinya. Karakteristik tersebut berkaitan dengan kandungan abu dan unsur-unsur basa yang terbentuk atau terkonsentrasi selama proses pirolisis. Martinsen *et al.* (2015) menunjukkan bahwa biochar dapat meningkatkan pH tanah mineral masam di Indonesia, meskipun responsnya berbeda antar jenis biochar. Perubahan pH biochar akibat perbedaan kondisi pirolisis perlu diketahui untuk menilai kesesuaiannya sebagai bahan pembenah tanah.

Parameter lain yang penting adalah kapasitas tukar kation (KTK). Nilai KTK menggambarkan kemampuan suatu material untuk mempertahankan dan mempertukarkan kation sehingga berkaitan dengan retensi unsur hara. Biochar memiliki permukaan yang dapat menyediakan situs pertukaran kation, tetapi nilai KTK dapat berbeda bergantung pada karakteristik bahan dan proses produksinya. Munera-Echeverri *et al.* (2018) menjelaskan bahwa pengukuran KTK pada biochar memiliki tantangan karena struktur pori dan kandungan abu yang bersifat basa dapat memengaruhi hasil pengukuran. Oleh sebab itu, KTK merupakan parameter penting dalam karakterisasi biochar, terutama ketika material tersebut diarahkan untuk digunakan sebagai pembenah tanah.

Kadar C-organik juga menjadi parameter penting karena karbon merupakan komponen utama biochar. Proses pirolisis mengubah biomassa menjadi material yang memiliki proporsi karbon lebih tinggi dan relatif lebih stabil dibandingkan bahan organik awal. Kandungan karbon dalam biochar menjadi salah satu pertimbangan dalam pemanfaatannya untuk pengelolaan karbon tanah. Pada biochar bonggol jagung, Amoakwah *et al.* (2020) menunjukkan bahwa pemberian biochar berpengaruh terhadap penyimpanan dan kualitas karbon organik pada tanah tropis. Dengan demikian, pengukuran C-organik dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik karbon biochar yang dihasilkan dari perlakuan durasi pirolisis yang berbeda.

Perbedaan durasi pirolisis berpotensi menghasilkan perubahan pada karakteristik kimia biochar. Lama proses yang lebih panjang dapat memberikan waktu yang lebih besar bagi terjadinya dekomposisi komponen biomassa dan perubahan struktur karbon. Namun, perubahan tersebut tidak selalu berlangsung dengan pola yang sama karena dipengaruhi oleh suhu, jenis biomassa, ukuran partikel, dan kondisi reaktor. Penelitian mengenai pengaruh

waktu pirolisis menunjukkan bahwa respons sifat biochar terhadap lama proses dapat berbeda pada kondisi suhu yang berbeda (Lyu *et al.*, 2025). Hal ini menunjukkan pentingnya pengujian secara spesifik pada bahan baku bonggol jagung dengan kondisi proses yang dikendalikan.

Berdasarkan uraian di atas, pemanfaatan limbah bonggol jagung sebagai bahan baku biochar memiliki potensi dalam mendukung pengelolaan residu pertanian sekaligus menghasilkan material yang dapat dimanfaatkan dalam pengelolaan tanah. Namun, karakteristik kimia biochar dapat berubah selama proses pirolisis, termasuk sebagai akibat dari perbedaan lama waktu proses. Informasi mengenai pengaruh durasi pirolisis terhadap pH, KTK, dan C-organik biochar bonggol jagung diperlukan untuk mengetahui kondisi proses yang menghasilkan karakteristik kimia yang sesuai untuk pemanfaatannya sebagai bahan pembenah tanah. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh durasi pirolisis terhadap pH, kapasitas tukar kation, dan C-organik biochar dari limbah bonggol jagung.

2. BAHAN DAN METODE

2.1 Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan pada bulan Mei hingga Juli 2026. Proses pembuatan biochar dari limbah bonggol jagung menggunakan reaktor pirolisis dilaksanakan di Desa Sukaluyu, Kecamatan Pangatikan, Kabupaten Garut, Jawa Barat. Analisis sifat kimia biochar yang meliputi pH, kapasitas tukar kation (KTK), dan C-organik dilakukan di Laboratorium Kimia Tanah dan Nutrisi Tanaman, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran.

2.2 Bahan dan Alat

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian adalah limbah bonggol jagung yang diperoleh dari [sumber/lokasi pengambilan

bahan]. Bahan kimia yang digunakan untuk analisis sifat kimia biochar meliputi bahan yang diperlukan dalam analisis pH, C-organik dengan metode Walkley-Black, dan KTK dengan metode ekstraksi dan destilasi mengacu kepada Eviati dkk. (2023).

Alat yang digunakan meliputi reaktor pirolisis, termokopel atau alat pengukur suhu, timbangan, oven, grinder atau alat penghancur, ayakan, wadah sampel, pH meter, serta peralatan laboratorium untuk analisis C-organik dan KTK.

2.3 Rancangan Percobaan

Penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan satu faktor perlakuan, yaitu durasi pirolisis. Proses pirolisis dilakukan pada suhu tetap 400 °C (Rambhatla *et al.* 2025), sedangkan waktu pirolisis terdiri atas empat taraf perlakuan, yaitu 3, 4, 5, dan 6 jam. Setiap perlakuan dilakukan sebanyak lima ulangan sehingga diperoleh 20 unit percobaan. Adapun perlakuan yang digunakan adalah sebagai berikut:

P1 = pirolisis 3 jam

P2 = pirolisis 4 jam

P3 = pirolisis 5 jam

P4 = pirolisis 6 jam

2.4 Pelaksanaan Penelitian

2.4.1 Persiapan bahan baku

Limbah bonggol jagung dikumpulkan dan dibersihkan dari tanah, debu, sisa biji, serta bahan pengotor lainnya. Bonggol jagung kemudian dikeringkan hingga kadar airnya berkurang. Bahan yang telah kering selanjutnya dicacah menjadi ukuran yang relatif seragam untuk memperoleh kondisi bahan baku yang lebih homogen selama proses pirolisis.

2.4.2 Proses pirolisis

Bonggol jagung yang telah dipersiapkan dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis. Proses pirolisis dilakukan pada kondisi oksigen

terbatas dengan suhu 400 °C. Setelah suhu reaktor mencapai suhu perlakuan, proses dipertahankan sesuai durasi pirolisis masing-masing perlakuan, yaitu 3 jam (P1), 4 jam (P2), 5 jam (P3), dan 6 jam (P4). Setelah waktu pirolisis tercapai, proses pemanasan dihentikan dan biochar dibiarkan hingga dingin pada kondisi yang terkendali. Biochar yang telah dingin kemudian dikeluarkan dari reaktor dan dipisahkan dari material yang belum mengalami karbonisasi secara sempurna.

2.4.3 Preparasi sampel biochar

Biochar hasil pirolisis dihancurkan dan diayak untuk memperoleh ukuran partikel yang relatif seragam. Sampel kemudian dimasukkan ke dalam wadah tertutup dan diberi kode sesuai dengan perlakuan dan ulangan. Sampel tersebut selanjutnya digunakan untuk analisis sifat kimia biochar.

2.5 Analisis Laboratorium

Parameter yang diamati dalam penelitian meliputi pH, C-organik, dan kapasitas tukar kation (KTK). Analisis dilakukan di Laboratorium Kimia Tanah dan Nutrisi Tanaman, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran.

Analisis pH biochar dilakukan menggunakan pH meter berdasarkan metode pengukuran pH suspensi. Analisis C-organik dilakukan menggunakan metode Walkley-Black, sedangkan KTK dianalisis menggunakan metode ekstraksi dan destilasi. Prosedur analisis mengacu Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air, dan Pupuk (Eviati et al., 2023). Hasil analisis pH dinyatakan sebagai nilai pH, C-organik dinyatakan dalam persen (%), sedangkan KTK dinyatakan dalam cmol kg^{-1} .

2.6 Analisis Data

Data hasil pengamatan pH, C-organik, dan KTK ditabulasi dan dihitung nilai rata-rata serta standar deviasi. Data selanjutnya dianalisis menggunakan analisis ragam (ANOVA) pada taraf 5% untuk mengetahui

pengaruh durasi pirolisis terhadap karakteristik kimia biochar.

Apabila hasil ANOVA menunjukkan adanya pengaruh nyata, analisis dilanjutkan dengan Duncan Multiple Range Test (DMRT) pada taraf 5% untuk mengetahui perbedaan antarperlakuan. Hasil pengamatan disajikan dalam bentuk nilai rata-rata $\pm$ standar deviasi dan tabel.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Nilai pH Biochar

Pengukuran pH dilakukan untuk mengetahui karakteristik kemasaman atau kebasaaan biochar yang dihasilkan dari proses pirolisis limbah bonggol jagung pada durasi pirolisis yang berbeda. Nilai pH menjadi salah satu parameter penting dalam karakterisasi biochar karena berkaitan dengan sifat kimia biochar dan potensinya sebagai bahan pembenah tanah. Hasil pengukuran pH biochar pada berbagai durasi pirolisis disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Nilai pH biochar bonggol jagung pada berbagai durasi pirolisis

Durasi pirolisis	pH
P1 (3 jam)	8,12 $\pm$ 0,05 a
P2 (4 jam)	8,31 $\pm$ 0,07 b
P3 (5 jam)	8,53 $\pm$ 0,05 c
P4 (6 jam)	8,66 $\pm$ 0,05 d

Keterangan: Angka rerata yang diikuti huruf kecil yang sama tidak berbeda nyata berdasarkan Uji Jarak Berganda Duncan pada taraf 5%.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa durasi pirolisis berpengaruh terhadap pH biochar bonggol jagung. Nilai pH meningkat secara bertahap dari 8,12 pada perlakuan P1 (3 jam) menjadi 8,31 pada P2 (4 jam), 8,53 pada P3 (5 jam), dan 8,66 pada P4 (6 jam). Berdasarkan hasil uji Duncan pada taraf 5%, seluruh perlakuan menunjukkan perbedaan nyata, sehingga peningkatan durasi pirolisis dari 3 hingga 6 jam menghasilkan peningkatan pH biochar secara signifikan. Pola tersebut menunjukkan bahwa pada suhu pirolisis

400 °C, waktu tinggal yang lebih lama mendorong terbentuknya biochar dengan karakter yang semakin alkalis.

Peningkatan pH selama pirolisis dapat dikaitkan dengan semakin intensifnya dekomposisi komponen organik yang mudah terurai selama pemanasan. Proses tersebut menyebabkan senyawa volatil dan komponen organik yang lebih mudah terdekomposisi semakin banyak terlepas, sementara sebagian unsur mineral dan kation basa menjadi lebih terkonsentrasi pada fraksi padat biochar. Campos *et al.* (2020) melaporkan bahwa kondisi pirolisis, termasuk suhu dan waktu tinggal, memengaruhi sifat kimia biochar yang dihasilkan dari residu pertanian. Dalam penelitian tersebut, kombinasi suhu dan waktu pirolisis yang lebih tinggi menghasilkan biochar dengan pH yang lebih tinggi. Penulis juga menunjukkan bahwa waktu tinggal berperan dalam perubahan karakteristik kimia dan struktur karbon biochar.

Kecenderungan tersebut juga terlihat pada penelitian Makavana *et al.* (2020) menggunakan limbah batang kapas. Biochar yang dihasilkan pada berbagai kombinasi suhu dan waktu tinggal menunjukkan rentang pH yang cukup luas, dan kondisi pirolisis yang lebih intensif menghasilkan biochar dengan karakteristik yang berbeda dibandingkan bahan awal. Nilai pH biochar dalam penelitian tersebut berada pada kisaran 5,85–9,86, menunjukkan bahwa kondisi proses, termasuk waktu tinggal, dapat berkontribusi terhadap perubahan sifat kimia biochar.

Hasil penelitian Wang *et al.* (2020) yang menggunakan beberapa residu pertanian, yaitu batang jagung, jerami rapa, batang gandum, dan kulit kacang tanah menunjukkan bahwa pH biochar berkaitan dengan kondisi produksi dan cenderung meningkat seiring meningkatnya suhu serta diperpanjangnya waktu tinggal. Meskipun pengaruh suhu dilaporkan lebih kuat dibandingkan pengaruh waktu tinggal, hasil tersebut memperlihatkan

bahwa *residence time* tetap dapat berkontribusi terhadap perubahan sifat kimia biochar.

Penelitian Cárdenas-Aguilar *et al.* (2024) memberikan bukti yang lebih baru mengenai hubungan antara waktu tinggal dan sifat biochar. Penelitian tersebut mengevaluasi pengaruh jenis bahan baku, suhu pirolisis, dan *residence time* terhadap biochar yang berasal dari limbah broom dan gorse. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketiga faktor tersebut dapat memengaruhi karakteristik biochar, sehingga kondisi waktu tinggal perlu diperhatikan dalam menentukan sifat akhir biochar yang akan digunakan sebagai pembenah tanah.

Pada bahan baku yang berbeda, Zhang *et al.* (2022) juga menunjukkan bahwa durasi pirolisis dapat memengaruhi pH biochar. Penelitian terhadap biochar dari *Taxodium ascendens* menggunakan beberapa suhu dan waktu pirolisis menunjukkan bahwa *residence time* memberikan pengaruh signifikan terhadap pH pada biochar yang berasal dari bagian tertentu tanaman. Namun, pengaruh waktu tidak selalu sama pada seluruh bahan dan suhu, sehingga respons pH terhadap durasi pirolisis bersifat spesifik terhadap kombinasi bahan baku dan kondisi proses.

Hasil penelitian di atas menjadi dasar untuk menjelaskan hasil penelitian bonggol jagung. Dalam penelitian ini, suhu pirolisis dibuat tetap pada 400 °C, sehingga perubahan pH dari 8,12 menjadi 8,66 lebih tepat dikaitkan dengan perbedaan durasi pirolisis daripada perubahan suhu. Perpanjangan waktu pemanasan dari 3 menjadi 6 jam mengakibatkan bahan mengalami paparan panas lebih lama sehingga proses transformasi termokimia berlangsung lebih lanjut. Hal tersebut memungkinkan terjadinya perubahan komposisi bahan organik dan konsentrasi relatif komponen mineral pada biochar, yang pada akhirnya dapat meningkatkan sifat alkalinitasnya.

Peningkatan pH juga memiliki arti penting dalam penilaian biochar sebagai bahan pem-

benah tanah. Biochar dengan pH alkalis berpotensi meningkatkan pH tanah masam ketika diaplikasikan ke tanah. Namun, besarnya efek tersebut tidak hanya ditentukan oleh pH biochar, tetapi juga oleh dosis aplikasi, kapasitas penyangga tanah, kandungan mineral biochar, dan karakteristik tanah yang digunakan. Oleh karena itu, nilai pH biochar sebesar 8,12–8,66 pada penelitian ini menunjukkan bahwa biochar bonggol jagung memiliki karakter alkalis, tetapi efektivitasnya sebagai bahan pengapuran atau pembenah tanah tetap perlu diuji melalui penelitian aplikasi pada tanah.

Jika dibandingkan antar perlakuan, peningkatan pH terbesar terjadi antara P1 dan P4, yaitu sebesar 0,54 unit pH, atau sekitar 6,65% berdasarkan nilai P1. Peningkatan tersebut menunjukkan adanya perubahan karakter kimia biochar selama waktu pirolisis diperpanjang. P1 dengan durasi pirolisis 3 jam menghasilkan pH terendah, sedangkan P4 dengan durasi pirolisis 6 jam menghasilkan pH tertinggi. Berdasarkan uji Duncan 5%, perbedaan tersebut signifikan sehingga pola peningkatan pH dapat dikatakan bukan hanya variasi antarulangan, tetapi berkaitan dengan perlakuan durasi pirolisis.

3.2 Kapasitas Tukar Kation (KTK) Biochar

Kapasitas tukar kation (KTK) merupakan salah satu parameter penting dalam karakterisasi sifat kimia biochar karena menunjukkan kemampuan biochar dalam menyerap dan mempertukarkan kation pada permukaan material. Nilai KTK berkaitan dengan karakteristik permukaan dan gugus fungsional biochar yang dapat berperan dalam mempertahankan unsur hara ketika biochar diaplikasikan ke tanah. Hasil pengukuran KTK biochar bonggol jagung pada berbagai durasi pirolisis disajikan pada Tabel 2.

Berdasarkan Tabel 2, nilai KTK biochar bonggol jagung menunjukkan pola peningkatan hingga durasi pirolisis 5 jam, kemudian

mengalami penurunan pada durasi pirolisis 6 jam. Nilai KTK berturut-turut sebesar 32,53 cmol kg^{-1} pada P1 (3 jam), 37,80 cmol kg^{-1} pada P2 (4 jam), 42,40 cmol kg^{-1} pada P3 (5 jam), dan 40,40 cmol kg^{-1} pada P4 (6 jam). Hasil uji Duncan 5% menunjukkan bahwa seluruh perlakuan berbeda nyata. Dengan demikian, durasi pirolisis memberikan pengaruh nyata terhadap KTK biochar bonggol jagung, dengan nilai tertinggi diperoleh pada perlakuan P3 dengan durasi pirolisis 5 jam.

Tabel 2 Nilai KTK biochar bonggol jagung pada durasi pirolisis yang berbeda

Durasi pirolisis	KTK (cmol kg^{-1})
P1 (3 jam)	32,53 $\pm$ 0,45 a
P2 (4 jam)	37,80 $\pm$ 0,90 b
P3 (5 jam)	42,40 $\pm$ 0,60 d
P4 (6 jam)	40,40 $\pm$ 0,60 c

Keterangan: Angka rerata yang diikuti huruf kecil yang sama tidak berbeda nyata berdasarkan Uji Jarak Berganda Duncan pada taraf 5%.

Peningkatan KTK dari P1 hingga P3 menunjukkan bahwa pemanjangan waktu pirolisis pada suhu 400 °C dapat meningkatkan kemampuan biochar dalam mempertukarkan kation sampai mencapai kondisi optimum. KTK biochar berkaitan dengan keberadaan muatan negatif pada permukaan biochar yang memungkinkan terjadinya adsorpsi dan pertukaran kation. Lago *et al.* (2021) menunjukkan bahwa karakteristik gugus fungsi permukaan biochar memiliki hubungan dengan nilai KTK. Gugus fungsi yang bersifat polar dan mengandung oksigen dapat berkontribusi terhadap pembentukan muatan permukaan yang berperan dalam kemampuan biochar mempertahankan kation.

Peningkatan KTK pada P1 sampai P3 dapat dikaitkan dengan perubahan sifat permukaan biochar selama proses pirolisis. Pada suhu 400 °C, pemanasan yang berlangsung lebih lama dapat menyebabkan transformasi komponen organik dan perubahan struktur permukaan, sehingga situs

pertukaran kation menjadi lebih tersedia. Kondisi tersebut dapat meningkatkan kemampuan biochar untuk menyerap kation pada permukaannya. Namun, hubungan antara durasi pirolisis dan KTK tidak selalu bersifat linear karena karakteristik akhir biochar juga ditentukan oleh bahan baku dan kondisi pirolisis.

Hasil penelitian Lataf *et al.* (2022) menunjukkan bahwa karakteristik agronomis biochar, termasuk KTK, dipengaruhi oleh jenis bahan baku dan kondisi pirolisis. Penelitian tersebut menghasilkan biochar dari berbagai bahan baku dan menunjukkan bahwa parameter produksi perlu dipertimbangkan dalam menentukan karakteristik akhir biochar. Dengan demikian, perbedaan durasi pirolisis pada penelitian ini dapat menghasilkan perubahan sifat permukaan yang pada akhirnya memengaruhi kemampuan pertukaran kation.

Nilai KTK tertinggi pada P3 sebesar 42,40 cmol kg^{-1} , kemudian menurun menjadi 40,40 cmol kg^{-1} pada P4. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa perpanjangan waktu pirolisis dari 5 menjadi 6 jam tidak selalu meningkatkan kemampuan pertukaran kation. Salah satu kemungkinan penyebabnya adalah perubahan atau berkurangnya sebagian gugus fungsi permukaan yang berkontribusi terhadap muatan negatif biochar akibat pemanasan yang lebih lama. Lago *et al.* (2021) menunjukkan bahwa karakter gugus fungsi permukaan berkaitan dengan variasi KTK biochar, sehingga perubahan kimia permukaan selama proses termal dapat memengaruhi kapasitas pertukaran kation.

Pola peningkatan kemudian penurunan KTK juga memperlihatkan bahwa terdapat kondisi proses tertentu yang menghasilkan kombinasi paling sesuai antara tingkat karbonisasi dan keberadaan situs pertukaran pada permukaan biochar. Hasil penelitian Tu *et al.* (2022) pada biochar yang berasal dari bahan tanaman menunjukkan bahwa

perubahan suhu pirolisis dapat menghasilkan perubahan KTK yang tidak selalu mengikuti pola peningkatan terus-menerus. Pada biochar berbahan herba, misalnya, nilai KTK dapat mengalami penurunan ketika intensitas pirolisis semakin tinggi. Hal tersebut menunjukkan bahwa peningkatan derajat karbonisasi tidak secara otomatis meningkatkan KTK.

Pada penelitian ini, kondisi tersebut tercermin pada perlakuan P4. Meskipun waktu pirolisis diperpanjang dari 5 menjadi 6 jam, KTK justru menurun sebesar 2,00 cmol kg^{-1} atau sekitar 4,72% dibandingkan P3. Penurunan tersebut signifikan berdasarkan uji Duncan 5%. Dengan demikian, berdasarkan kondisi penelitian yang digunakan, durasi pirolisis 5 jam menghasilkan KTK optimum, sedangkan pemanjangan waktu hingga 6 jam tidak memberikan peningkatan KTK.

Nilai KTK biochar yang diperoleh dalam penelitian ini, yaitu 32,53–42,40 cmol kg^{-1} , menunjukkan adanya kemampuan pertukaran kation yang cukup baik. Sebagai pembanding, penelitian Pradhan *et al.* (2020) terhadap biochar yang berasal dari beberapa limbah sayuran, termasuk residu bonggol jagung, menunjukkan bahwa karakteristik biochar sangat dipengaruhi oleh bahan baku dan kondisi produksi. Penelitian tersebut memperlihatkan bahwa limbah pertanian dapat dikonversi menjadi biochar dengan karakteristik yang berpotensi digunakan untuk aplikasi tanah.

Perbedaan nilai KTK antarperlakuan juga perlu dipahami sebagai hasil interaksi antara karakteristik bahan baku dan proses pirolisis. Lataf *et al.* (2022) menunjukkan bahwa jenis bahan baku merupakan salah satu faktor penting yang menentukan sifat agronomis biochar, sementara kondisi pirolisis turut memengaruhi karakteristik produk akhirnya. Oleh karena itu, pola KTK pada penelitian bonggol jagung tidak dapat digeneralisasi untuk semua jenis biochar karena setiap bahan

baku memiliki komposisi mineral dan struktur organik yang berbeda.

Pada perspektif pemanfaatan sebagai bahan pembenah tanah, KTK merupakan parameter penting karena berhubungan dengan kemampuan material dalam mempertahankan kation hara. Biochar dengan KTK lebih tinggi berpotensi menyediakan lebih banyak situs pertukaran bagi kation seperti K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan NH_4^+ . Lago *et al.* (2021) menegaskan bahwa KTK merupakan salah satu sifat penting dalam menentukan fungsi biochar sebagai bahan pembenah tanah dan berkaitan dengan karakteristik kimia permukaannya.

3.3 Kadar C-organik

Kadar C-organik merupakan salah satu parameter penting dalam karakterisasi biochar karena menunjukkan kandungan karbon yang tersisa setelah proses pirolisis dan berkaitan dengan tingkat karbonisasi bahan. Perubahan durasi pirolisis dapat memengaruhi transformasi komponen organik bonggol jagung selama proses pemanasan, sehingga berpotensi menghasilkan perbedaan kandungan C-organik pada biochar yang dihasilkan. Hasil analisis C-organik biochar bonggol jagung pada berbagai durasi pirolisis disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Kandungan C-organik biochar bonggol jagung pada berbagai durasi pirolisis

Durasi pirolisis	C-organik (%)
P1 (3 jam)	62,40 ± 0,60 a
P2 (4 jam)	66,47 ± 0,70 b
P3 (5 jam)	69,80 ± 0,70 c
P4 (6 jam)	71,80 ± 0,60 d

Keterangan: Angka rerata yang diikuti huruf kecil yang sama tidak berbeda nyata berdasarkan Uji Jarak Berganda Duncan pada taraf 5%.

Pada Tabel 3, kandungan C-organik biochar bonggol jagung meningkat secara konsisten seiring dengan bertambahnya durasi pirolisis. Nilai C-organik berturut-turut sebesar 62,40% pada P1 (3 jam), 66,47% pada P2 (4 jam), 69,80% pada P3 (5 jam), dan

71,80% pada P4 (6 jam). Hasil uji Duncan pada taraf 5% menunjukkan bahwa setiap perlakuan memiliki perbedaan yang nyata. Dengan demikian, pada suhu pirolisis 400 °C, perpanjangan durasi pirolisis dari 3 hingga 6 jam menghasilkan peningkatan kandungan C-organik biochar bonggol jagung.

Peningkatan C-organik tersebut dapat dikaitkan dengan berlangsungnya proses dekomposisi termal komponen organik selama pirolisis. Biomassa lignoselulosa tersusun terutama atas selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang mengalami perubahan selama pemanasan. Komponen yang lebih mudah terdekomposisi akan mengalami pemutusan struktur dan menghasilkan senyawa volatil, sedangkan fraksi karbon yang lebih tahan terhadap degradasi termal cenderung tertinggal pada fase padat. Proses tersebut menyebabkan karbon menjadi semakin terkonsentrasi pada biochar. Mukherjee *et al.* (2022) menjelaskan bahwa kondisi pirolisis, termasuk suhu dan waktu tinggal, berperan dalam menentukan perubahan struktur dan karakteristik kimia biochar yang dihasilkan dari biomassa lignoselulosa.

Kecenderungan peningkatan kandungan karbon dengan meningkatnya intensitas proses termal juga dilaporkan oleh Wystalska dan Kwarciak-Kozłowska (2021). Penelitian tersebut menggunakan beberapa limbah tanaman dan menunjukkan bahwa peningkatan suhu pirolisis menghasilkan biochar dengan kandungan karbon yang lebih tinggi, disertai penurunan kandungan hidrogen. Peningkatan suhu juga meningkatkan nilai total organic carbon (TOC), yang menunjukkan terjadinya pengayaan karbon pada produk padat selama proses pirolisis.

Meskipun penelitian Wystalska dan Kwarciak-Kozłowska (2021) memvariasikan suhu, bukan durasi pirolisis, hasil tersebut relevan untuk menjelaskan mekanisme yang terjadi pada penelitian ini. Dalam penelitian sekarang, suhu dipertahankan pada 400 °C

sehingga perbedaan C-organik terutama diamati berdasarkan lama pemanasan. Semakin lama bahan berada pada suhu tersebut, semakin lama pula proses dekomposisi dan penghilangan senyawa volatil berlangsung. Oleh karena itu, peningkatan C-organik dari P1 hingga P4 dapat menunjukkan semakin intensifnya proses karbonisasi pada bonggol jagung.

Pengaruh lama pemanasan terhadap peningkatan fraksi karbon juga dilaporkan pada penelitian yang secara langsung mengevaluasi waktu tinggal. Santos *et al.* (2023) menemukan bahwa peningkatan waktu pirolisis menyebabkan peningkatan kandungan karbon pada char dan peningkatan *fixed carbon*, sementara kandungan volatil mengalami penurunan. Waktu pirolisis yang lebih panjang mendorong berlangsungnya reaksi pemutusan struktur dan deoksigenasi sehingga menghasilkan material karbon yang lebih terkondensasi (Santos *et al.*, 2023).

Pada bahan baku yang lebih dekat dengan penelitian ini, Oluk *et al.* (2021) menghasilkan biochar dari bonggol jagung melalui pirolisis lambat pada kisaran suhu 300–600 °C dengan waktu tinggal 120 menit. Biochar yang dihasilkan memiliki *fixed carbon* sebesar 71,28%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa bonggol jagung dapat menghasilkan material biochar dengan fraksi karbon yang tinggi setelah mengalami proses pirolisis.

Hasil penelitian Štefanko dan Leszczynska (2020) juga memperlihatkan bahwa kondisi proses berpengaruh terhadap pembentukan karbon pada biochar. Penelitian tersebut membandingkan biochar dari beberapa jenis biomassa pada suhu 400 dan 700 °C serta waktu tinggal 2 dan 5 jam. Hasilnya menunjukkan bahwa peningkatan suhu menghasilkan peningkatan *fixed carbon*, sedangkan waktu tinggal yang lebih lama bersama kondisi termal yang lebih intensif menghasilkan struktur karbon yang lebih stabil dan aromatik.

Pada penelitian ini, peningkatan C-organik sebesar 9,40 poin persentase dari P1 ke P4 menunjukkan bahwa durasi pirolisis memberikan perubahan yang cukup besar terhadap kandungan karbon pada biochar. Peningkatan terbesar terjadi dari P1 ke P2, yaitu sebesar 4,07 poin persentase, kemudian 3,33 poin persentase dari P2 ke P3 dan 2,00 poin persentase dari P3 ke P4. Dengan demikian, meskipun C-organik terus meningkat, kenaikan antarperlakuan cenderung semakin kecil pada durasi pirolisis yang lebih panjang. Pola tersebut dapat mengindikasikan bahwa proses pengayaan karbon mulai mendekati kondisi yang lebih stabil setelah pemanasan berlangsung lebih lama. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Nath *et al.* (2024) pada pelet jerami gandum dalam reaktor skala pilot. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa karakteristik biochar dipengaruhi oleh suhu dan waktu tinggal, sedangkan peningkatan intensitas pirolisis menyebabkan penurunan bahan volatil dan peningkatan fraksi karbon tetap. Proses yang lebih intensif menghasilkan biochar dengan kandungan karbon dan nilai energi yang lebih tinggi.

Wijitkosum (2023) juga melaporkan bahwa suhu dan lama penahanan (*holding time*) berinteraksi dalam menentukan karakteristik biochar dari limbah sumpit bambu. Peningkatan suhu dan waktu penahanan menghasilkan peningkatan persentase C dan *fixed carbon* serta penurunan kandungan volatil. Biochar yang dihasilkan pada kondisi yang lebih intensif menunjukkan kandungan C yang lebih tinggi dan struktur yang lebih stabil. Temuan tersebut memperkuat dugaan bahwa semakin lama biomassa mengalami perlakuan termal, semakin besar proporsi karbon yang bertahan dalam produk padat.

Pengaruh parameter proses terhadap kandungan karbon juga ditunjukkan oleh Aman *et al.* (2023) pada biochar dari cangkang inti sawit. Penelitian tersebut menggunakan pendekatan *response surface methodology*

dengan suhu, laju pemanasan, dan waktu tinggal sebagai faktor proses. Hasilnya menunjukkan bahwa suhu dan waktu tinggal termasuk parameter yang berpengaruh terhadap karakteristik fisikokimia biochar, sedangkan kandungan karbon meningkat dengan kondisi pirolisis yang lebih intensif.

Mariyam *et al.* (2024) menegaskan bahwa karakteristik biochar ditentukan oleh kombinasi bahan baku dan kondisi operasional, termasuk suhu, laju pemanasan, waktu tinggal, serta karakteristik awal bahan. Penelitian tersebut menggunakan pendekatan *response surface methodology* untuk mengevaluasi hubungan kondisi operasi dan karakteristik karbon bahan terhadap produksi biochar. Hasilnya menunjukkan bahwa kandungan fixed carbon bahan baku dan kondisi operasi merupakan faktor penting dalam menentukan hasil proses pirolisis.

Selain waktu dan suhu, karakteristik awal biomassa juga perlu dipertimbangkan dalam menjelaskan variasi C-organik. Dayoub *et al.* (2024) menunjukkan bahwa jenis bahan baku dan kondisi pirolisis menghasilkan karakteristik biochar yang berbeda. Perubahan kondisi pirolisis dapat mengubah kandungan karbon, abu, pH, dan sifat fisik biochar. Dengan demikian, peningkatan C-organik pada bonggol jagung dalam penelitian ini merupakan hasil dari interaksi antara karakteristik awal bahan dan kondisi termal selama proses pirolisis.

Berdasarkan mekanismenya, peningkatan C-organik pada penelitian ini dapat dipahami sebagai pengayaan relatif karbon pada fraksi padat biochar, bukan berarti jumlah karbon absolut yang tersisa dari bahan awal meningkat. Selama pirolisis, sebagian massa biomassa diubah menjadi gas dan senyawa volatil sehingga massa total biochar berkurang. Akibatnya, karbon yang tersisa menjadi lebih terkonsentrasi secara proporsional dalam produk padat. Literatur mengenai produksi biochar juga menunjukkan bahwa peningkatan waktu tinggal dapat menurunkan rendemen

biochar karena semakin banyak komponen volatil yang terlepas, sementara fraksi karbon tetap meningkat (Mukherjee *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2023).

Kandungan C-organik yang meningkat juga memiliki implikasi terhadap potensi biochar sebagai bahan pembenah tanah. Biochar merupakan material yang kaya karbon dan memiliki struktur karbon yang relatif lebih stabil dibandingkan biomassa segar. Namun, tingginya C-organik tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya indikator kualitas biochar. Parameter lain seperti pH, KTK, kadar abu, kandungan unsur hara, dan stabilitas karbon perlu dipertimbangkan secara bersama-sama. Dayoub *et al.* (2024) menegaskan bahwa karakteristik biochar sangat bervariasi bergantung pada bahan baku dan kondisi pirolisis sehingga penggunaannya perlu disesuaikan dengan tujuan aplikasinya.

4. KESIMPULAN

Durasi pirolisis pada suhu 400 °C memberikan pengaruh nyata terhadap pH, kapasitas tukar kation (KTK), dan C-organik biochar bonggol jagung. Durasi pirolisis 3–6 jam pada suhu 400 °C meningkatkan pH dan C-organik biochar bonggol jagung, dengan nilai tertinggi pada P4 (6 jam), masing-masing 8,66 dan 71,80%. KTK meningkat hingga 42,40 cmol kg⁻¹ pada P3 (5 jam), kemudian menurun menjadi 40,40 cmol kg⁻¹ pada P4. Dengan demikian, pirolisis 6 jam menghasilkan pH dan C-organik tertinggi, sedangkan 5 jam menghasilkan KTK tertinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Aman, N. A. M., Selvarajoo, A., Lau, T. L., & Chen, W.-H. 2023. *Optimization via response surface methodology of palm kernel shell biochar for supplementary cementitious replacement*. Chemosphere, 313: 137477.
- Amoakwah, E., Arthur, E., Frimpong, K. A., Parikh, S. J., & Islam, R. 2020. *Soil*

- organic carbon storage and quality are impacted by corn cob biochar application on a tropical sandy loam.* Journal of Soils and Sediments, 20(4): 1960–1969.
- Cárdenas-Aguilar, E., Méndez, A., Gascó, G., Lado, M., & Paz-González, A. 2024. *The effects of feedstock, pyrolysis temperature, and residence time on the properties and uses of biochar from broom and gorse wastes.* Applied Sciences, 14(10): 4283.
- Campos, P., Miller, A. Z., Knicker, H., Costa-Pereira, M. F., Merino, A., & De la Rosa, J. M. 2020. *Chemical, physical and morphological properties of biochars produced from agricultural residues: Implications for their use as soil amendment.* Waste Management, 105, 256–267.
- Tu, P., Zang, G., Wei, G., Li, J., Li, Y., Deng, L., Yuan, H. 2022. *Influence of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of biochars obtained from herbaceous and woody plants.* Bioresources and Bioproducts, 9: 131.
- Dayoub, E. B., Tóth, Z., Soós, G., & Anda, A. 2024. *Chemical and physical properties of selected biochar types and a few application methods in agriculture.* Agronomy, 14(11): 2540.
- Eviati, & Herawaty, L. 2023. Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air dan Pupuk (Edisi ke-3). Balai Pengujian Standar Instrumen Tanah dan Pupuk, Badan Standardisasi Instrumen Pertanian, Kementerian Pertanian. Bogor.
- Lago, B. C., Silva, C. A., Melo, L. C. A., & Morais, E. G. de. 2021. *Predicting biochar cation exchange capacity using Fourier transform infrared spectroscopy combined with partial least square regression.* Science of the Total Environment, 794: 148762.
- Lataf, A., Jozefczak, M., Vandecasteele, B., Viaene, J., Schreurs, S., Carleer, R., Yperman, J., Marchal, W., Cuypers, A., & Vandamme, D. 2022. *The effect of pyrolysis temperature and feedstock on biochar agronomic properties.* Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 168: 105728.
- Lehmann, J., Gaunt, J., & Rondon, M. 2006. *Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review.* Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 11(2): 395–419.
- Makavana, J. M., Sarsavadia, P. N., & Chauhan, P. M. 2020. *Effect of pyrolysis temperature and residence time on bio-char obtained from pyrolysis of shredded cotton stalk.* International Research Journal of Pure and Applied Chemistry, 21(13): 10–28.
- Mariyam, S., Alherbawi, M., Pradhan, S., Al-Ansari, T., & McKay, G. 2024. *Biochar yield prediction using response surface methodology: Effect of fixed carbon and pyrolysis operating conditions.* Biomass Conversion and Biorefinery, 14: 28879–28892.
- Martinsen, V., Alling, V., Nurida, N. L., Mulder, J., Hale, S. E., Ritz, C., Rutherford, D. W., Heikens, A., Breedveld, G. D., & Cornelissen, G. 2015. *pH effects of the addition of three biochars to acidic Indonesian mineral soils.* Soil Science and Plant Nutrition, 61(5): 821–834.
- Mukherjee, A., Patra, B. R., Podder, J., & Dalai, A. K. 2022. *Synthesis of biochar from lignocellulosic biomass for diverse industrial applications and energy harvesting: Effects of pyrolysis conditions on the physicochemical properties of biochar.* Frontiers in Materials, 9: 870184.
- Munera-Echeverri, J. L., Martinsen, V., Strand, L. T., Zivanovic, V., Cornelissen, G., & Mulder, J. 2018. *Cation exchange capacity of biochar: an urgent method modification.* Science of the Total Environment, 642: 190–197.
- Nath, B., Chen, G., Bowtell, L., & Nguyen-Huy, T. 2024. *Pyrolysis of wheat straw pellets in a pilot-scale reactor: Effect of temperature and residence time.* Energy Science & Engineering, 12(8): 3524–3539.
- Oluk, I., Nagawa, C. B., Banadda, N., Tumutegyreize, P., & Owusu, P. A. 2021. *Development of maize cob-*

- based biochar filter for water purification*. Water and Environment Journal, 35(1): 349–358.
- Pradhan, S., Abdelaal, A. H., Mroue, K., Al-Ansari, T., Mackey, H. R., & McKay, G. 2020. *Biochar from vegetable wastes: Agro-environmental characterization*. Biochar, 2: 439–453.
- Rambhatla, N., Panicker, T. F., Mishra, R. K., Manjeshwar, S. K., & Sharma, A. (2025). Biomass pyrolysis for biochar production: Study of kinetics parameters and effect of temperature on biochar yield and its physicochemical properties. *Results in Engineering*, 25, 103679.
- Santos, J. L., Centeno, M. A., & Odriozola, J. A. 2023. Biochar production from cellulose under reductant atmosphere: Influence of the total pyrolysis time. *RSC Advances*, 13: 21071–21079.
- Štefanko, U. A., & Leszczynska, D. 2020. *Impact of biomass source and pyrolysis parameters on physicochemical properties of biochar manufactured for innovative applications*. Frontiers in Energy Research, 8: 138.
- Wang, S., Zhang, H., Huang, H., Xiao, R., Li, R., & Zhang, Z. 2020. *Influence of temperature and residence time on characteristics of biochars derived from agricultural residues: a comprehensive evaluation*. Process Safety and Environmental Protection, 139: 218–229.
- Wijitkosum, S. 2023. *Influence of pyrolysis temperature and time on biochar properties and its potential for climate change mitigation*. Journal of Human, Earth, and Future, 4(4): 472–485.
- Wystalska, K., & Kwarciak-Kozłowska, A. 2021. The effect of biodegradable waste pyrolysis temperatures on selected biochar properties. *Materials*, 14(7): 1644.
- Zhang, Y., Li, Z., & Mahmood, I. B. 2014. *Recovery of NH_4^+ by corn cob produced biochars and its potential application as soil conditioner*. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 8(6): 825–834.