



Efektivitas Biochar dalam Memperbaiki Sifat-Sifat Tanah serta Meningkatkan Pertumbuhan Vegetatif Jagung (*Zea mays* L.) pada Tekstur Tanah yang Berbeda

*Effectiveness of Biochar in Improving Soil Properties and Promoting the Vegetative Growth of Maize (*Zea mays* L.) under Different Soil Textures*

Author(s): Beauty Laras Setia Pertiwi^{1*}; Slamet Supriyadi¹; Erick Yuhardi¹

⁽¹⁾ Universitas Trunodjoyo Madura

*Corresponding author: beauty.laras@trunodjoyo.ac.id

Submitted: 15 Jul 2026

Accepted: 11 Aug 2026

Published: 30 Sep 2026

ABSTRAK

Kabupaten Bangkalan didominasi oleh jenis tanah litosol dan mediteran merah yang berasal dari bahan induk batu pasir dan batu kapur. Dua jenis tanah tersebut mempunyai sifat fisik dan kimia yang menjadi faktor pembatasnya sehingga menghambat pertumbuhan tanaman budidaya. Biochar menjadi pembenah tanah organik yang kompleks dengan kemampuannya memperbaiki porositas, menurunkan bobot isi, memperbaiki pH, meningkatkan karbon tanah hingga kemampuannya dalam mitigasi perubahan iklim. Penelitian ini dilakukan pada bulan September 2025 hingga November 2025, di Lahan Percobaan Program Studi Agroekoteknologi Fakultas Pertanian Universitas Trunodjoyo Madura. Metode penelitian ini menggunakan rancangan acak lengkap non faktorial dengan 8 perlakuan yaitu, PTA (tanah pasir; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 1); PTB (tanah pasir; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 3); PBA (tanah pasir; perlakuan biochar; jumlah tanaman 1); PBB (tanah pasir; perlakuan biochar; jumlah tanaman 3); LTA (tanah liat; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 1); LTB (tanah liat; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 3); LBA (tanah liat; perlakuan biochar; jumlah tanaman 1); LBB (tanah liat; perlakuan biochar; jumlah tanaman 3). Aplikasi biochar efektif memperbaiki sifat tanah berpasir yang ditunjukkan oleh peningkatan pH tanah dan kadar air sehingga meningkatkan pertumbuhan vegetatif jagung, yang tercermin pada peningkatan tinggi tanaman, jumlah daun, biomassa, dan diameter batang.

Kata Kunci:

Biochar;
Tanah Liat;
Tanah Berpasir

ABSTRACT

Keywords:

Biochar;
Clay Soil;
Sandy Soil

Bangkalan Regency is dominated by Lithosol and Red Mediterranean soils derived from sandstone and limestone parent materials. These soils exhibit unfavorable physical and chemical properties that restrict crop growth and productivity. Biochar has attracted considerable attention as an organic soil amendment because of its potential to improve soil structure, enhance water retention, increase soil pH and soil organic carbon, and contribute to climate change mitigation. The experiment was conducted from September to November 2025 at the Experimental Field of the Agroecotechnology Study Program, Faculty of Agriculture, Universitas Trunodjoyo Madura. A non-factorial completely randomized design with 8 treatments consisted of PTA (sandy soil; without biochar treatment; 1 plant); PTB (sandy soil; without biochar treatment; 3 plant); PBA (sandy soil; with biochar treatment; 1 plant); PBB (sandy soil; with biochar treatment; 3 plant); LTA (clay soil; without biochar treatment; 1 plant); LTB (clay soil; without biochar treatment; 3 plant); LBA (clay soil; with biochar treatment; 1 plant); LBB (clay soil; with biochar treatment; 3 plant). Biochar application significantly improved the properties of sandy soil, as indicated by increased soil pH and soil moisture content. These improvements were associated with enhanced vegetative growth of maize, as demonstrated by greater plant height, leaf number, biomass accumulation, and stem diameter. The findings indicate that biochar is an effective soil amendment for improving the quality of coarse-textured soils and enhancing maize growth under suboptimal soil conditions.

PENDAHULUAN

Pulau Madura dikelilingi oleh perairan berupa Selat Madura dan Laut Jawa dengan luas perairan Selat Madura yang dihitung berdasarkan konsep *marine cadaster* dengan menggunakan peta dasar Badan Informasi Geospasial yaitu sekitar 10.962 km² (Badan Informasi Geospasial, 2017). Geografi tersebut mempengaruhi dominasi jenis tanah di pulau Madura terutama daerah pesisir Kabupaten Bangkalan. Jenis tanah di kabupaten bangkalan terdiri atas aluvial, litosol, regosol, grumusol dan mediteran, namun yang paling mendominasi adalah litosol dan mediteran merah yang berasal dari bahan induk batu pasir dan batu kapur (Bangkalan, 2021). Tanah yang berkembang dari bahan induk batu pasir umumnya memiliki tekstur relatif kasar dengan dominasi fraksi pasir dan proporsi makropori yang lebih tinggi. Kondisi tersebut menyebabkan kapasitas menahan air, kapasitas tukar kation, dan kemampuan mengikat unsur hara relatif rendah sehingga tanah lebih rentan mengalami pencucian hara serta umumnya memiliki kandungan bahan organik yang rendah apabila tidak dikelola dengan baik (Schapel et al., 2023). Tanah yang berasal dari bahan induk batu kapur umumnya bersifat alkalis dengan kandungan CaCO₃ dan Ca²⁺ yang tinggi. Karakteristik tersebut menyebabkan rendahnya kandungan bahan organik dan nitrogen serta menurunkan ketersediaan fosfor dan unsur hara mikro (Fe, Zn, Mn, dan Cu) akibat proses presipitasi dan adsorpsi, sehingga menjadi salah satu faktor pembatas kesuburan tanah (Kumar & Kumari, 2025).

Faktor pembatas tersebut mengakibatkan pertumbuhan tanaman pada tanah berpasir tidak optimal. Penelitian yang dilakukan oleh Li et al. (2022) menunjukkan bahwa tinggi tanaman jagung pada tanah berpasir relatif rendah hanya sebesar 35,57 cm, biomassa tanaman 13,47 g/tanaman, kandungan klorofil 14,76 dan rasio fotosintesis 14,03 Mmol H₂O m⁻² s⁻¹. Sementara itu, Alshankiti & Gill (2016) melaporkan bahwa biomasa akar 5,2 g/pot pada tanaman yang tumbuh pada tanah berpasir. Selain tanaman pangan, pertumbuhan tanaman hias *Bougainvillea* juga terhambat pada tanah berpasir dibuktikan dengan hasil penelitian Younas et al. (2022) bahwa tinggi tanaman hanya 33,41 cm, panjang akar 21 cm, berat kering akar 6,06 g, berat kering tanaman 22,27 g, kandungan klorofil 18,73. Penurunan pertumbuhan tanaman pada tanah berpasir disebabkan oleh drainase yang berlebihan serta tingginya tingkat pelindihan (*leaching*) sehingga menyebabkan penurunan kandungan bahan organik, unsur hara serta penurunan pH menjadi lebih masam (Osman, 2018).

Tanah mediteran merah dengan bahan induk batuan kapur yang dimanfaatkan sebagai media pembibitan tanaman tebu menghasilkan tinggi tanaman hanya sebesar 148,27 cm, jumlah daun 9,93 dan diameter batang sebesar 10,3 cm (Pamungkas, 2021). Pertumbuhan tanaman tebu tersebut termasuk dalam katagori rendah jika dibandingkan dengan pertumbuhan tanaman tebu pada jenis tanah yang lain. Penghambatan pertumbuhan pada tanah mediteran merah disebabkan oleh pH tanah netral-basa, C-organik rendah, N-total tanah rendah, K-tersedia rendah (Ramadhani et al., 2023), dan P-tersedia rendah. Rendahnya nitrogen pada tanah dapat menurunkan kandungan asam amino yang diperlukan untuk pembentukan dan pertumbuhan bagian vegetatif tanaman sehingga dapat memperlambat laju pembelahan dan perpanjangan akar, batang dan daun tanaman (Pamungkas, 2021).

Dua jenis tanah tersebut mempunyai sifat fisik dan kimia yang menjadi faktor pembatasnya sehingga menghambat pertumbuhan tanaman budidaya, maka perlu adanya perbaikan kondisi tanah melalui pemanfaatan bahan pembenah tanah. Pembenah tanah merupakan bahan alami ataupun sintetik, organik maupun anorganik yang dapat meningkatkan kualitas tanah dan tanaman sehingga dapat memperbaiki kesehatan tanah, meningkatkan pertumbuhan tanaman dan revegetasi. Klasifikasi pembenah tanah berdasarkan senyawanya terdiri atas pembenah tanah organik yang berasal dari bahan alami

dan mengandung karbon organik sedangkan pembenah tanah anorganik berasal dari bahan mineral (Rashmi et al., 2022). Pembenah tanah organik menjadi alternatif terbaik untuk meningkatkan kualitas dan kesehatan tanah karena kemampuannya yang optimal namun tidak memberikan efek negatif bagi lingkungan (Hoque et al., 2022). Biochar menjadi pembenah tanah organik yang kompleks dengan kemampuannya memperbaiki porositas, menurunkan bobot isi, memperbaiki pH, meningkatkan karbon tanah hingga kemampuannya dalam mitigasi perubahan iklim (Hussain et al., 2017).

Biochar mempunyai karakteristik fisik berpori dengan luas permukaan yang besar sehingga dapat meningkatkan makroporositas dan mesoporositas tanah mengakibatkan peningkatan aerasi dan ketersediaan air untuk akar tanaman (Bhat et al., 2022). Aplikasi biochar sebanyak 4% mampu menurunkan bobot isi tanah hingga 28,3% menjadi 1,29 g cm⁻³. Partikel biochar yang lebih halus umumnya memiliki luas permukaan spesifik yang lebih besar sehingga lebih mudah berinteraksi dengan partikel tanah dan memengaruhi struktur pori serta sifat fisik tanah. Namun, respons terhadap bobot isi tanah tetap bergantung pada karakteristik biochar, jenis tanah, dan dosis aplikasi (Blanco-Canqui, 2021). Ukuran partikel biochar berpengaruh juga pada total porositas tanah, pada partikel biochar >500 µm mampu meningkatkan total porositas tanah hingga 36,2% jika dibandingkan dengan kontrol. Aplikasi biochar juga dapat meningkatkan volume pori mikro tanah. Ukuran partikel biochar, laju aplikasi dan jenis bahan baku biochar mempengaruhi besaran peningkatan retensi air tanah. Partikel biochar yang lebih halus (500-1000 µm) menghasilkan nilai titik layu permanen yang lebih rendah. Ketersediaan air tanah meningkat pada ukuran partikel biochar yang lebih halus (0-500 µm) (Singh et al., 2022). Aplikasi biochar dapat direkomendasikan sebagai bahan pembenah tanah yang efektif dalam meningkatkan sifat hidrolik zona akar tanaman karena dapat meningkatkan volume air yang tersimpan di dalam tanah terutama pada tanah berpasir dan mediteran merah. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh aplikasi biochar dalam memperbaiki sifat fisik, kimia dan pertumbuhan tanaman pada lahan marjinal.

METODOLOGI

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan September 2025 hingga November 2025, di Lahan Percobaan Program Studi Agroekoteknologi dan Laboratorium Tanah dan Sumberdaya Lahan Fakultas Pertanian Universitas Trunodjoyo Madura. Bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu benih jagung, biochar sekam padi, tanah berpasir, tanah mediteran merah, pupuk urea, pupuk Sp-36, pupuk KCl, aquadest, KCl. Alat yang digunakan yaitu pot ukuran 35x30 cm, ring sampel, timbangan, plastik sampel, oven, pH meter, penggaris, kamera, alat tulis, gembor.

Penelitian ini menggunakan rancangan acak lengkap non faktorial dengan 8 perlakuan dan 6 ulangan. Analisis data menggunakan *Analysis of Variance* (ANOVA) dengan taraf 5%, jika hasil analisis berpengaruh nyata maka akan dilakukan uji lanjut *Duncan's Multiple Range Test* (DMRT) taraf 5%.

Rancangan Penelitian

Perlakuan penelitian terdiri atas :

PTA = tanah pasir; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 1

PTB = tanah pasir; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 3

PBA = tanah pasir; perlakuan biochar; jumlah tanaman 1

PBB = tanah pasir; perlakuan biochar; jumlah tanaman 3

LTA = tanah liat; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 1

LTB = tanah liat; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 3

LBA = tanah liat; perlakuan biochar; jumlah tanaman 1

LBB = tanah liat; perlakuan biochar; jumlah tanaman 3

Pelaksanaan Penelitian

Pelaksanaan penelitian diawali dengan persiapan media tanam. Media tanam pada penelitian ini menggunakan dua jenis tanah yaitu tanah berpasir dan tanah liat. Dua jenis tanah tersebut ditimbang masing-masing sebanyak 8 kg/pot. Selanjutnya, dilakukan aplikasi biochar 7 hari sebelum tanah dengan dosis 10 ton/ha atau sebesar 40 g/pot. Aplikasi biochar dengan cara disebar dipermukaan tanah kemudian diaduk secara merata. Penanaman dilakukan setelah masa inkubasi media tanam selama 7 hari sebelum tanam. Penanaman menggunakan benih jagung varietas lokal Madura dengan jumlah benih perlubang sesuai dengan perlakuan.

Pemeliharaan tanaman diawali dengan pemupukan pertama pada 7 HST dengan mengaplikasikan pupuk urea dosis 300 kg/ha setara dengan 1 g/polybag, pupuk SP-36 dosis 125 kg/ha setara dengan 0,42 g/polybag dan pupuk KCl 100 kg/ha setara dengan 0,33 g/polybag. Pupuk diletakkan pada lubang pupuk yang telah dibuat dengan jarak sebesar 3-5 cm dari tanaman. Selain pemupukan, dilakukan pemeliharaan tanaman berupa penyiraman setiap hari sesuai dengan kapasitas lapangnya. Pengendalian hama dan penyakit dilakukan menggunakan prinsip pengendalian secara terpadu. Tanaman dipanen pada umur 42 HST.

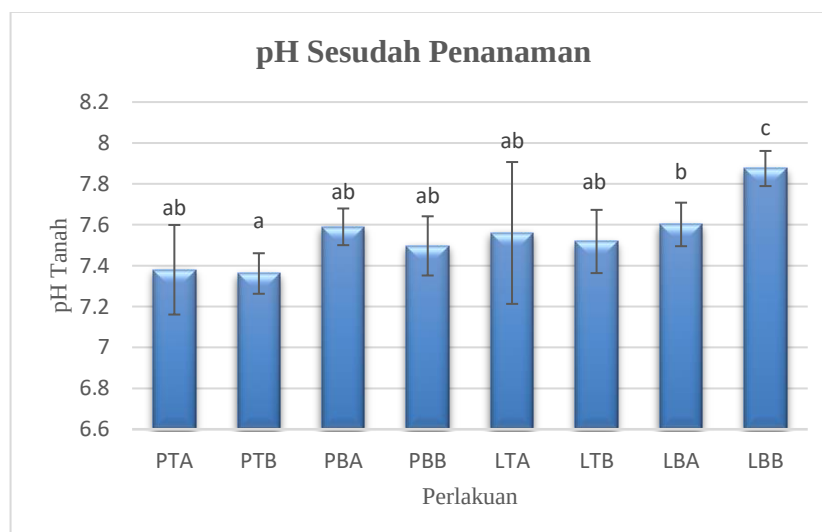
Parameter pengamatan pada penelitian ini terdiri atas parameter tanaman dan parameter tanah. Parameter tanaman yaitu tinggi tanaman, jumlah daun, panjang akar, berat basah tanaman, berat kering tanaman, diameter tanaman. Parameter tanah yaitu pH, bobot isi tanah dan kadar air.

HASIL DAN PEMBAHASAN

pH Tanah

Aplikasi biochar pada tanah liat menunjukkan respon yang berbeda nyata dibandingkan dengan kontrol (tanpa biochar). Tanah berpasir mempunyai pH tanah lebih rendah dibandingkan dengan tanah liat. Kandungan koloid pada tanah liat menyumbang muatan negatif yang besar sedangkan tanah berpasir tidak mengandung koloid tanah. Koloid tanah berperan dalam menyerap kation nutrisi dengan kuat dan melepaskan ion hidrogen pada larutan tanah sehingga pH tanah akan meningkat. Penambahan biochar berperan dalam peningkatan kandungan bahan organik pada tanah liat dan tanah berpasir. Bahan organik mengandung koloid tanah yang lebih besar sehingga aplikasi biochar pada tanah liat dan berpasir dapat meningkatkan kapasitas tukar kation tanah yang mengakibatkan pH tanah meningkat.

Peningkatan pH tanah setelah aplikasi biochar berkaitan dengan karakteristik kimia biochar yang bersifat alkalis akibat dari tingginya kandungan abu (ash), karbonat, oksida dan hidroksida logam alkali maupun alkali tanah. Senyawa tersebut melepaskan kation basa seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , dan Na^{+} kedalam larutan tanah sehingga ion H^{+} dan Al^{3+} pada kompleks jerapan (Khan et al., 2024). Selain itu, gugus fungsi karboksilat ($-\text{COO}^{-}$), hidroksil ($-\text{OH}$), dan fenolik pada permukaan biochar berperan sebagai tempat pertukaran kation yang meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) dan kapasitas penyangga pH tanah. Akibatnya, aktivitas ion H^{+} menurun dan pH tanah meningkat (Rizwan et al., 2023).



Gambar 1. Pengaruh Pemberian Biochar terhadap pH Tanah.

Figure 1. Effect of biochar application on soil pH.

Keterangan: PTA = tanah pasir; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; PTB = tanah pasir; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 3; PBA = tanah pasir; perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; PBB = tanah pasir; perlakuan biochar; jumlah tanaman 3; LTA = tanah liat; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; LTB = tanah liat; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 3; LBA = tanah liat; perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; LBB = tanah liat; perlakuan biochar; jumlah tanaman 3.

Note: PTA = sandy soil; without biochar application; 1 plant; PTB = sandy soil; without biochar application; 3 plants; PBA = sandy soil; with biochar application; 1 plant; PBB = sandy soil; with biochar application; 3 plants; LTA = clay soil; without biochar application; 1 plant; LTB = clay soil; without biochar application; 3 plants; LBA = clay soil; with biochar application; 1 plant; LBB = clay soil; with biochar application; 3 plants.

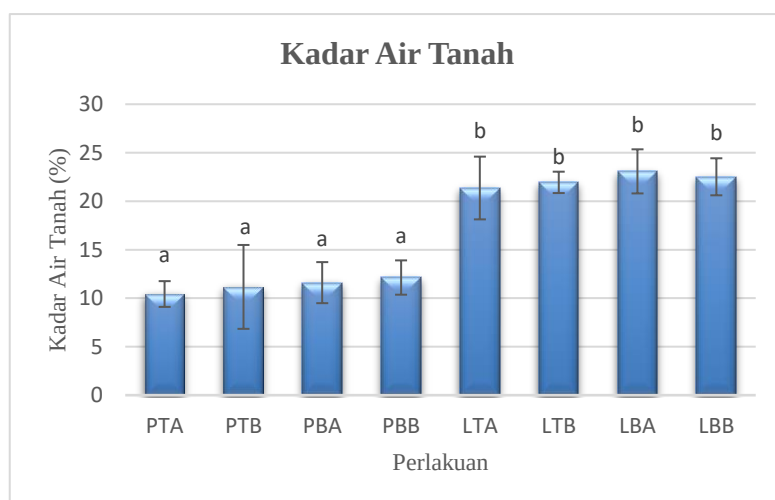
Respon peningkatan pH yang lebih besar pada tanah liat dibandingkan tanah berpasir menunjukkan bahwa tekstur tanah berperan penting dalam menentukan efektivitas biochar. Tanah liat memiliki luas permukaan spesifik, kandungan mineral liat, dan kapasitas tukar kation yang lebih tinggi dibandingkan tanah berpasir sehingga mampu mempertahankan kation basa yang dilepaskan biochar dalam jumlah lebih besar (Pandian et al., 2024). Sebaliknya, dominasi fraksi pasir menyebabkan kemampuan adsorpsi dan retensi unsur hara relatif rendah sehingga sebagian kation basa lebih mudah tercuci. Oleh karena itu, peningkatan pH pada tanah berpasir relatif lebih kecil dibandingkan tanah liat.

Selain tekstur tanah, jumlah tanaman juga memengaruhi perubahan pH tanah. Pada penelitian ini, perlakuan dengan tiga tanaman per lubang tanam cenderung menghasilkan pH yang lebih tinggi dibandingkan satu tanaman, terutama pada tanah yang diberi biochar. Peningkatan tersebut diduga berkaitan dengan meningkatnya aktivitas rizosfer akibat eksudat akar yang lebih banyak. Eksudat akar menyediakan sumber karbon bagi mikroorganisme sehingga meningkatkan dekomposisi bahan organik, mineralisasi unsur hara, dan pelepasan kation basa ke dalam tanah (Fan et al., 2023). Interaksi antara biochar dan rizosfer juga diketahui meningkatkan kolonisasi mikroorganisme pada pori-pori biochar sehingga memperkuat fungsi biochar sebagai habitat mikroba dan memperbaiki proses siklus hara di sekitar perakaran (Singh et al., 2022). Dengan demikian, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa efektivitas biochar tidak hanya ditentukan oleh karakteristik biochar itu sendiri, tetapi juga dipengaruhi oleh tekstur tanah dan aktivitas biologis di daerah perakaran.

Kadar Air Tanah

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar air tanah berbeda nyata antar perlakuan. Perlakuan pada tanah liat menghasilkan kadar air jauh lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan tanah berpasir. Namun, aplikasi biochar dan perbedaan jumlah tanaman menunjukkan interaksi tidak nyata terhadap kadar air tanah pada semua perlakuan jika dibandingkan dengan kontrol. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tekstur tanah memiliki pengaruh yang lebih dominan terhadap retensi air dibandingkan aplikasi biochar.

Kadar air pada tanah liat lebih tinggi disebabkan oleh karakteristik fisik yang didominasi oleh fraksi liat dan pori mikro. Luas permukaan pada partikel liat sangat tinggi sehingga meningkatkan kemampuan absorpsi molekul air melalui gaya kapilaritas dan gaya elektrostatis. Pori mikro pada tanah liat dapat memperlambat laju infiltrasi dan perkolasi air tanah sehingga air lebih lama dipertahankan didalam tanah. Sedangkan, tanah berpasir didominasi oleh pori makro sehingga kemampuannya dalam menahan air rendah yang mengakibatkan terjadinya pergerakan air akibat gravitasi lebih cepat (Acharya et al., 2024).



Gambar 2. Pengaruh Pemberian Biochar terhadap Kadar Air Tanah.

Figure 2. Effect of biochar application on soil moisture content.

Keterangan : PTA = tanah pasir; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; PTB = tanah pasir; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 3; PBA = tanah pasir; perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; PBB = tanah pasir; perlakuan biochar; jumlah tanaman 3; LTA = tanah liat; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; LTB = tanah liat; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 3; LBA = tanah liat; perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; LBB = tanah liat; perlakuan biochar; jumlah tanaman 3.

Note: PTA = sandy soil; without biochar application; 1 plant; PTB = sandy soil; without biochar application; 3 plants; PBA = sandy soil; with biochar application; 1 plant; PBB = sandy soil; with biochar application; 3 plants; LTA = clay soil; without biochar application; 1 plant; LTB = clay soil; without biochar application; 3 plants; LBA = clay soil; with biochar application; 1 plant; LBB = clay soil; with biochar application; 3 plants.

Berdasarkan hasil statistika aplikasi biochar tidak meningkatkan kadar air secara signifikan pada masing-masing jenis tanah. Namun, terdapat peningkatan kadar air tanah pada perlakuan yang diaplikasikan biochar jika dibandingkan dengan kontrol. Hasil ini menunjukkan bahwa respons biochar terhadap retensi air kemungkinan masih dipengaruhi oleh karakteristik biochar, dosis aplikasi, lama inkubasi, dan sifat awal tanah. Biochar diketahui memiliki struktur berpori dengan luas permukaan yang tinggi sehingga mampu meningkatkan porositas total, memperbaiki distribusi ukuran pori, dan meningkatkan kapasitas tanah dalam menyimpan air (Qi et al., 2024).

Jumlah tanaman juga tidak memberikan pengaruh nyata terhadap kadar air tanah. Hal ini mengindikasikan bahwa perbedaan satu dan tiga tanaman per lubang tanam belum cukup untuk mengubah keseimbangan antara penyerapan air oleh akar dan kemampuan tanah mempertahankan kelembapan selama periode penelitian. Meskipun tanaman dengan populasi lebih tinggi berpotensi meningkatkan penyerapan air melalui transpirasi, keberadaan biochar dan karakteristik fisik tanah diduga mampu mempertahankan kelembapan tanah sehingga perbedaan tersebut tidak terdeteksi secara statistik (Fan et al., 2023).

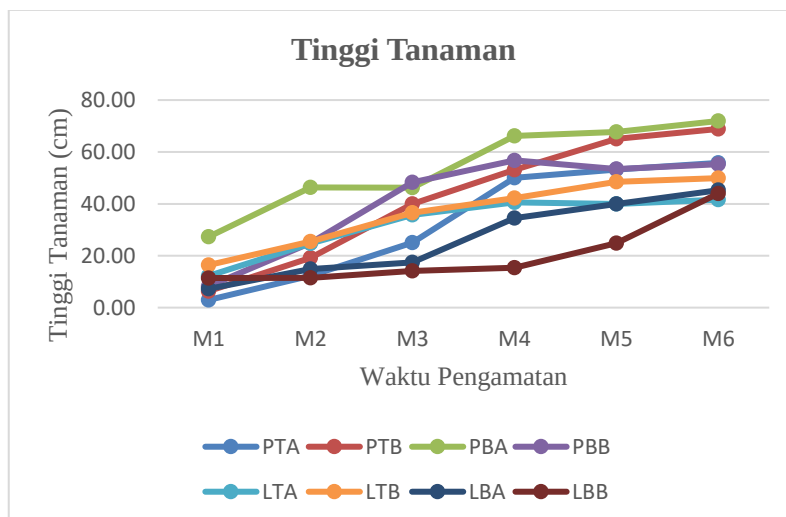
Tinggi Tanaman

Aplikasi biochar menunjukkan respon berbeda nyata terhadap tinggi tanaman jagung. Pemberian biochar pada tanah berpasir menunjukkan beda nyata jika dibandingkan dengan kontrol pada M3 dan M7 sedangkan pada tanah liat aplikasi biochar menunjukkan interaksi tidak nyata terhadap tinggi tanaman jagung.

Peningkatan tinggi tanaman pada tanah berpasir diakibatkan oleh kemampuan biochar dalam meningkatkan kemampuan tanah dalam menahan air, meningkatkan kandungan bahan organik serta kapasitas tukar kation tanah. Struktur biochar yang berpori mampu meningkatkan retensi air, memperbaiki aerasi tanah, serta meningkatkan kemampuan tanah mempertahankan unsur hara seperti nitrogen, fosfor, dan kalium di zona perakaran. Kondisi tersebut menciptakan lingkungan yang lebih mendukung bagi perkembangan akar sehingga penyerapan air dan unsur hara berlangsung lebih efisien (Wan et al., 2023). Ketersediaan unsur hara dapat mendukung pembelahan dan pemanjangan sel pada jaringan meristem batang sehingga pertumbuhan tanaman menjadi lebih cepat. Biochar mampu meningkatkan pertumbuhan vegetatif jagung melalui perbaikan sifat fisik tanah, peningkatan efisiensi pemanfaatan unsur hara, serta stimulasi aktivitas mikroorganisme di daerah perakaran.

Aplikasi biochar pada tanah liat tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap pertumbuhan tanaman yang disebabkan oleh kemampuan tanah liat yang relatif baik dalam menyediakan air dan mempertahankan unsur hara. Tanah liat memiliki kapasitas tukar kation, kandungan mikropori, dan kemampuan retensi air yang lebih tinggi dibandingkan tanah berpasir sehingga tambahan biochar belum memberikan perubahan lingkungan tumbuh yang cukup besar untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman secara signifikan (Premalatha et al., 2023).

Efek dari aplikasi biochar baru terlihat signifikan pada fase pertumbuhan pertengahan hingga akhir (M3–M6), sedangkan pada fase awal pertumbuhan (M1–M2) peningkatannya relatif kecil. Hal tersebut menunjukkan bahwa biochar bekerja secara bertahap (*slow-release effect*). Setelah diaplikasikan ke dalam tanah, biochar memerlukan waktu untuk berinteraksi dengan partikel tanah, membentuk agregat yang lebih stabil, meningkatkan aktivitas mikroorganisme, serta mengadsorpsi dan melepaskan unsur hara secara perlahan. Seiring meningkatnya perkembangan sistem perakaran, tanaman mampu memanfaatkan perbaikan kondisi tanah tersebut secara lebih efektif sehingga pertumbuhan tinggi tanaman meningkat pada pengamatan berikutnya. Penelitian pada tanaman jagung juga melaporkan bahwa peningkatan tinggi tanaman akibat biochar lebih nyata setelah kondisi tanah mengalami perbaikan secara bertahap, terutama melalui peningkatan biomassa akar, kandungan klorofil, efisiensi fotosintesis, dan serapan nitrogen serta fosfor (Cong et al., 2023).



Gambar 3. Pengaruh Pemberian Biochar terhadap Tinggi Tanaman.

Figure 3. Effect of biochar application on plant height.

Keterangan : PTA = tanah pasir; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; PTB = tanah pasir; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 3; PBA = tanah pasir; perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; PBB = tanah pasir; perlakuan biochar; jumlah tanaman 3; LTA = tanah liat; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; LTB = tanah liat; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 3; LBA = tanah liat; perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; LBB = tanah liat; perlakuan biochar; jumlah tanaman 3.

Note: PTA = sandy soil; without biochar application; 1 plant; PTB = sandy soil; without biochar application; 3 plants; PBA = sandy soil; with biochar application; 1 plant; PBB = sandy soil; with biochar application; 3 plants; LTA = clay soil; without biochar application; 1 plant; LTB = clay soil; without biochar application; 3 plants; LBA = clay soil; with biochar application; 1 plant; LBB = clay soil; with biochar application; 3 plants.

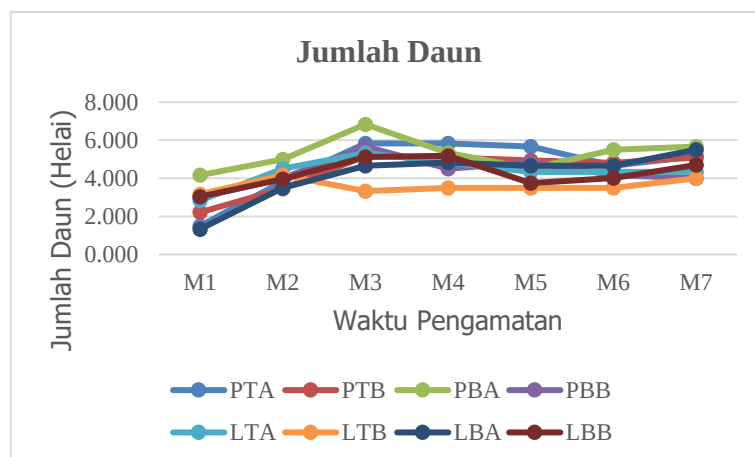
Jumlah tanaman per lubang tanam juga berpotensi memengaruhi tinggi tanaman melalui tingkat kompetisi terhadap cahaya, air, dan unsur hara. Pada penelitian ini, pengaruh jumlah tanaman tampak lebih kecil dibandingkan pengaruh jenis tanah dan aplikasi biochar. Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan biochar dalam memperbaiki kondisi tanah lebih menentukan pertumbuhan tinggi tanaman dibandingkan variasi populasi tanaman pada kondisi percobaan ini (Chi et al., 2024).

Jumlah Daun

Aplikasi biochar menunjukkan interaksi berbeda nyata terhadap jumlah daun tanaman jagung. Pemberian biochar pada tanah berpasir menunjukkan peningkatan sejak awal pertumbuhan (M1) hingga fase vegetatif (M4) kemudian terjadi pertumbuhan yang stabil hingga penurunan pertumbuhan pada pengamatan berikutnya. Pola tersebut menunjukkan bahwa pembentukan daun berlangsung intensif selama fase vegetatif dan mulai melambat ketika tanaman memasuki fase reproduktif, sehingga penambahan daun baru menjadi semakin terbatas.

Pada tanah berpasir, aplikasi biochar cenderung meningkatkan jumlah daun dibandingkan perlakuan tanpa biochar, terutama pada perlakuan PBA. Sebaliknya, pada tanah liat peningkatan jumlah daun akibat aplikasi biochar relatif kecil sehingga sebagian besar perlakuan tidak menunjukkan perbedaan nyata dengan kontrol. Peningkatan jumlah daun pada tanah berpasir diduga terjadi karena biochar memperbaiki lingkungan perakaran melalui peningkatan retensi air, aerasi, kapasitas tukar kation, dan efisiensi penggunaan unsur hara (Qayyum et al., 2024). Struktur biochar yang berpori menyediakan ruang bagi

kolonisasi mikroorganisme menguntungkan serta mengurangi kehilangan nitrogen akibat pencucian. Kondisi tersebut meningkatkan ketersediaan nitrogen, fosfor, dan kalium yang berperan penting dalam pembentukan jaringan vegetatif, termasuk perkembangan daun (Cong et al., 2023).



Gambar 4. Pengaruh Pemberian Biochar terhadap Jumlah Daun Tanaman.

Figure 4. Effect of biochar application on the number of leaves.

Keterangan : PTA = tanah pasir; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; PTB = tanah pasir; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 3; PBA = tanah pasir; perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; PBB = tanah pasir; perlakuan biochar; jumlah tanaman 3; LTA = tanah liat; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; LTB = tanah liat; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 3; LBA = tanah liat; perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; LBB = tanah liat; perlakuan biochar; jumlah tanaman 3.

Note: PTA = sandy soil; without biochar application; 1 plant; PTB = sandy soil; without biochar application; 3 plants; PBA = sandy soil; with biochar application; 1 plant; PBB = sandy soil; with biochar application; 3 plants; LTA = clay soil; without biochar application; 1 plant; LTB = clay soil; without biochar application; 3 plants; LBA = clay soil; with biochar application; 1 plant; LBB = clay soil; with biochar application; 3 plants.

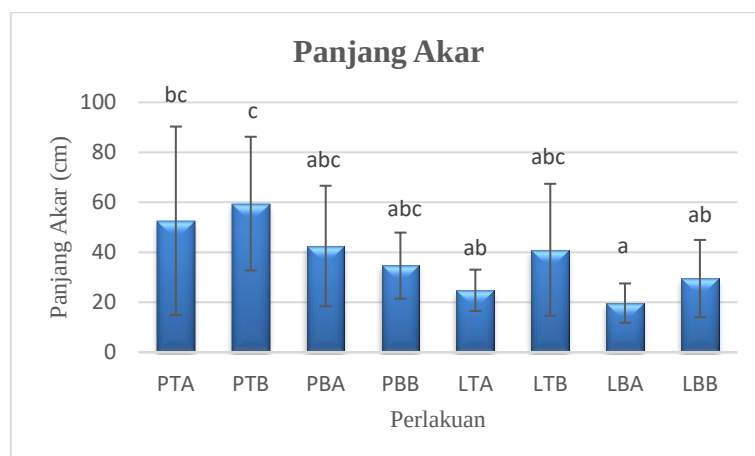
Nitrogen merupakan komponen utama penyusun klorofil, asam amino, dan protein sehingga kecukupannya akan meningkatkan aktivitas pembelahan sel pada titik tumbuh serta mempercepat pembentukan daun baru. Selain itu, peningkatan luas sistem perakaran akibat perbaikan struktur tanah memungkinkan tanaman menyerap air dan unsur hara secara lebih efisien sehingga pertumbuhan tajuk menjadi lebih baik. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa biochar mampu meningkatkan pertumbuhan vegetatif jagung melalui perbaikan sifat fisik tanah, peningkatan aktivitas mikroba, dan efisiensi serapan hara, terutama pada tanah bertekstur kasar (Bekchanova et al., 2024).

Aplikasi biochar pada tanah liat menunjukkan hasil yang tidak signifikan dikarenakan tanah tersebut telah memiliki kapasitas retensi air dan unsur hara yang relatif tinggi sebelum perlakuan. Hasil penelitian menyebutkan bahwa respons tanaman terhadap biochar umumnya lebih besar pada tanah yang memiliki tingkat kesuburan rendah, kandungan bahan organik rendah, atau tekstur kasar dibandingkan tanah yang telah memiliki kondisi fisik dan kimia yang baik.

Panjang Akar

Aplikasi biochar menunjukkan interaksi tidak nyata terhadap panjang akar tanaman jagung. Aplikasi biochar pada perlakuan PTB menghasilkan panjang akar terpanjang dibandingkan dengan perlakuan yang lain. Pada tanah liat, aplikasi biochar menghasilkan

panjang akar paling besar pada perlakuan LTB jika dibandingkan dengan perlakuan yang lain. Tidak signifikkannya perbedaan antarperlakuan menunjukkan bahwa aplikasi biochar pada kondisi penelitian ini belum mampu mengubah pola pertumbuhan akar secara nyata.



Gambar 5. Pengaruh Pemberian Biochar terhadap Panjang Akar Tanaman.

Figure 5. Effect of biochar application on plant root length.

Keterangan : PTA = tanah pasir; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; PTB = tanah pasir; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 3; PBA = tanah pasir; perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; PBB = tanah pasir; perlakuan biochar; jumlah tanaman 3; LTA = tanah liat; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; LTB = tanah liat; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 3; LBA = tanah liat; perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; LBB = tanah liat; perlakuan biochar; jumlah tanaman 3.

Note: PTA = sandy soil; without biochar application; 1 plant; PTB = sandy soil; without biochar application; 3 plants; PBA = sandy soil; with biochar application; 1 plant; PBB = sandy soil; with biochar application; 3 plants; LTA = clay soil; without biochar application; 1 plant; LTB = clay soil; without biochar application; 3 plants; LBA = clay soil; with biochar application; 1 plant; LBB = clay soil; with biochar application; 3 plants.

Pada penelitian ini, meskipun biochar telah memperbaiki beberapa sifat tanah seperti pH, kadar air, dan bobot isi, perubahan tersebut tampaknya belum cukup besar untuk menghasilkan respons pertumbuhan akar yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa perkembangan sistem perakaran kemungkinan lebih dipengaruhi oleh kondisi lingkungan tumbuh secara keseluruhan dibandingkan oleh aplikasi biochar saja. Tidak signifikkannya pengaruh biochar juga dapat dijelaskan oleh karakteristik akar tanaman jagung yang memiliki plastisitas tinggi terhadap kondisi lingkungan (Ruan & Wang, 2024). Pada tanah berpasir yang memiliki kapasitas menahan air dan unsur hara lebih rendah, akar cenderung memanjang untuk mengeksplorasi volume tanah yang lebih luas sehingga memperoleh air dan nutrisi yang cukup. Sebaliknya, pada tanah liat yang memiliki retensi air dan kapasitas tukar kation lebih tinggi, kebutuhan eksplorasi akar menjadi lebih kecil karena sumber daya lebih mudah tersedia di sekitar daerah perakaran. Oleh karena itu, panjang akar tidak selalu meningkat meskipun kondisi tanah mengalami perbaikan akibat aplikasi biochar (Qayyum et al., 2024).

Selain itu, respons akar terhadap biochar sangat dipengaruhi oleh karakteristik biochar, dosis aplikasi, lama inkubasi, kondisi kelembapan tanah, dan genotipe tanaman. Biochar lebih sering meningkatkan karakteristik sistem perakaran seperti volume akar, luas permukaan akar, jumlah akar lateral, dan diameter akar dibandingkan hanya meningkatkan panjang akar (Chi et al., 2024). Dengan demikian, tidak adanya perbedaan nyata pada panjang akar bukan berarti biochar tidak memberikan manfaat terhadap perkembangan

sistem perakaran, tetapi kemungkinan perubahan terjadi pada parameter morfologi akar lainnya yang tidak diamati dalam penelitian ini. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa biochar dapat memperbaiki struktur pori tanah, menurunkan hambatan penetrasi akar, serta meningkatkan volume dan luas permukaan akar sehingga efisiensi penyerapan air dan unsur hara meningkat meskipun panjang akar tidak selalu berubah secara signifikan.

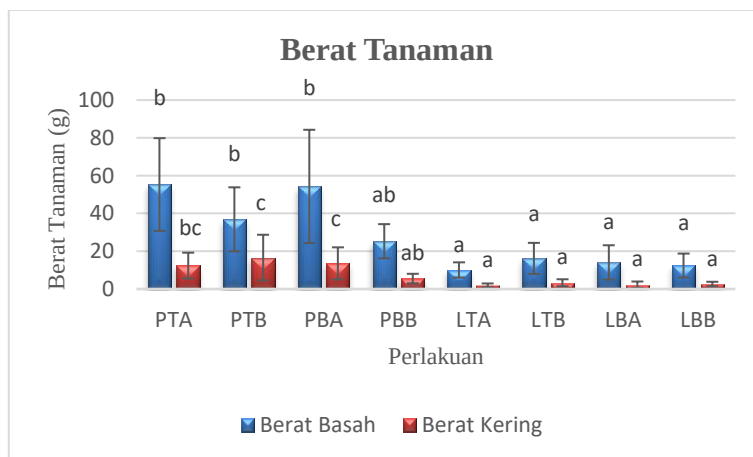
Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tinggi tanaman dan jumlah daun pada beberapa perlakuan tidak selalu diikuti oleh peningkatan panjang akar. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa perbaikan pertumbuhan tajuk lebih banyak dipengaruhi oleh meningkatnya efisiensi penyerapan air dan unsur hara akibat perbaikan sifat fisik dan kimia tanah, bukan oleh pemanjangan akar. Dengan kata lain, biochar kemungkinan meningkatkan kualitas lingkungan perakaran sehingga tanaman mampu memanfaatkan sumber daya tanah secara lebih efisien tanpa harus memperpanjang sistem perakaran secara signifikan.

Berat Tanaman

Aplikasi biochar, dan jumlah tanaman memberikan pengaruh terhadap berat tanaman jagung (Gambar 6). Tanaman yang ditanam pada tanah berpasir menghasilkan berat basah dan berat kering yang lebih tinggi dibandingkan tanaman pada tanah liat. Perlakuan PBA menghasilkan berat basah tertinggi serta berat kering tertinggi. Sebaliknya, seluruh perlakuan pada tanah liat menghasilkan biomassa yang relatif lebih rendah dan tidak menunjukkan perbedaan nyata. Hasil ini mengindikasikan bahwa biochar lebih efektif meningkatkan akumulasi biomassa tanaman pada tanah berpasir dibandingkan pada tanah liat.

Peningkatan berat tanaman pada tanah berpasir diduga merupakan konsekuensi dari perbaikan sifat fisik, kimia, dan biologi tanah akibat aplikasi biochar. Struktur biochar yang berpori meningkatkan kemampuan tanah dalam menyimpan air dan unsur hara, memperbaiki aerasi, serta meningkatkan kapasitas tukar kation sehingga kehilangan hara akibat pencucian dapat dikurangi. Kondisi tersebut menciptakan lingkungan perakaran yang lebih mendukung bagi penyerapan air dan unsur hara, terutama nitrogen, fosfor, dan kalium yang berperan penting dalam pembentukan biomassa tanaman. Selain itu, biochar menyediakan habitat bagi mikroorganisme tanah yang berkontribusi terhadap mineralisasi bahan organik dan peningkatan ketersediaan hara di daerah perakaran (Liu et al., 2025). Perbaikan sifat tanah tersebut meningkatkan laju fotosintesis dan akumulasi hasil asimilasi sehingga berat basah maupun berat kering tanaman meningkat. Hasil penelitian Khan et al. (2024) menyebutkan bahwa biochar mampu meningkatkan biomassa jagung melalui perbaikan kualitas tanah dan efisiensi pemanfaatan unsur hara.

Jumlah tanaman per lubang tanam juga memengaruhi akumulasi biomassa. Pada perlakuan dengan satu tanaman per lubang tanam, biomassa cenderung lebih tinggi dibandingkan tiga tanaman per lubang tanam, terutama pada tanah berpasir yang diberi biochar. Kondisi ini diduga disebabkan oleh rendahnya kompetisi antar tanaman terhadap cahaya, air, ruang tumbuh, dan unsur hara sehingga setiap tanaman memperoleh sumber daya yang lebih optimal untuk mendukung pertumbuhan vegetatif. Sebaliknya, peningkatan jumlah tanaman meningkatkan kompetisi sehingga sebagian hasil fotosintesis digunakan untuk mempertahankan pertumbuhan dasar, bukan untuk akumulasi biomassa. Peningkatan berat tanaman pada perlakuan biochar sejalan dengan meningkatnya tinggi tanaman, jumlah daun, pH tanah, serta membaiknya sifat fisik tanah seperti penurunan bobot isi dan peningkatan kadar air.



Gambar 6. Pengaruh Pemberian Biochar terhadap Berat Tanaman.

Figure 6. Effect of biochar application on plant weight.

Keterangan : PTA = tanah pasir; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; PTB = tanah pasir; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 3; PBA = tanah pasir; perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; PBB = tanah pasir; perlakuan biochar; jumlah tanaman 3; LTA = tanah liat; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; LTB = tanah liat; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 3; LBA = tanah liat; perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; LBB = tanah liat; perlakuan biochar; jumlah tanaman 3.

Note: PTA = sandy soil; without biochar application; 1 plant; PTB = sandy soil; without biochar application; 3 plants; PBA = sandy soil; with biochar application; 1 plant; PBB = sandy soil; with biochar application; 3 plants; LTA = clay soil; without biochar application; 1 plant; LTB = clay soil; without biochar application; 3 plants; LBA = clay soil; with biochar application; 1 plant; LBB = clay soil; with biochar application; 3 plants.

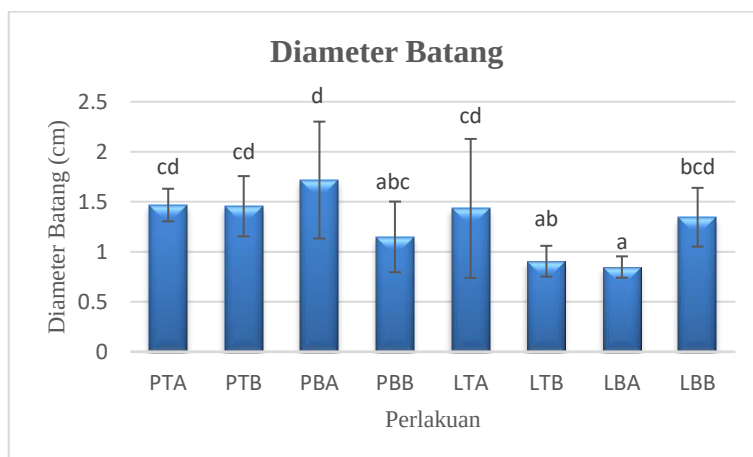
Perbaikan kondisi tersebut meningkatkan efisiensi fotosintesis karena luas tajuk yang lebih besar mampu menghasilkan lebih banyak fotosintat. Fotosintat kemudian ditranslokasikan dan disimpan sebagai biomassa, yang tercermin pada peningkatan berat basah dan berat kering tanaman. Dengan demikian, peningkatan biomassa pada penelitian ini merupakan hasil sinergi antara perbaikan sifat fisik tanah, meningkatnya ketersediaan unsur hara, serta efisiensi penggunaan air akibat aplikasi biochar (Zenebe et al., 2024), terutama pada tanah berpasir. Berat kering merupakan indikator yang lebih mencerminkan akumulasi bahan kering hasil fotosintesis dibandingkan berat basah karena tidak dipengaruhi oleh kandungan air tanaman. Oleh karena itu, peningkatan berat kering pada perlakuan PBA menunjukkan bahwa biochar tidak hanya meningkatkan status air tanaman, tetapi juga meningkatkan pembentukan biomassa melalui peningkatan efisiensi serapan hara dan aktivitas fisiologis tanaman.

Diameter Batang Tanaman

Hasil penelitian menunjukkan bahwa diameter batang tanaman jagung bervariasi antarperlakuan (Gambar 7). Secara deskriptif, diameter batang terbesar diperoleh pada perlakuan PBA (tanah berpasir dengan aplikasi biochar dan satu tanaman per lubang tanam), sedangkan diameter batang terendah terdapat pada perlakuan LBA (tanah liat dengan aplikasi biochar dan satu tanaman per lubang tanam).

Pada tanah berpasir, aplikasi biochar cenderung menghasilkan diameter batang yang lebih besar, terutama pada perlakuan PBA. Kondisi ini diduga disebabkan oleh kemampuan biochar memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah berpasir yang pada awalnya memiliki kapasitas menahan air, kandungan bahan organik, dan kapasitas tukar kation yang rendah. Struktur biochar yang berpori meningkatkan retensi air, memperbaiki aerasi tanah, serta

meningkatkan efisiensi pemanfaatan unsur hara sehingga aktivitas fotosintesis berlangsung lebih optimal (Bekchanova et al., 2024). Akumulasi hasil fotosintesis tersebut selanjutnya mendukung pembelahan dan pembesaran sel pada jaringan batang sehingga diameter batang meningkat. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang melaporkan bahwa biochar dapat meningkatkan pertumbuhan vegetatif jagung melalui perbaikan sifat tanah dan peningkatan efisiensi serapan nitrogen serta kalium (Cong et al., 2023).



Gambar 7. Pengaruh Pemberian Biochar terhadap Diameter Batang.

Figure 7. Effect of biochar application on stem diameter.

Keterangan : PTA = tanah pasir; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; PTB = tanah pasir; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 3; PBA = tanah pasir; perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; PBB = tanah pasir; perlakuan biochar; jumlah tanaman 3; LTA = tanah liat; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; LTB = tanah liat; tanpa perlakuan biochar; jumlah tanaman 3; LBA = tanah liat; perlakuan biochar; jumlah tanaman 1; LBB = tanah liat; perlakuan biochar; jumlah tanaman 3.

Note: PTA = sandy soil; without biochar application; 1 plant; PTB = sandy soil; without biochar application; 3 plants; PBA = sandy soil; with biochar application; 1 plant; PBB = sandy soil; with biochar application; 3 plants; LTA = clay soil; without biochar application; 1 plant; LTB = clay soil; without biochar application; 3 plants; LBA = clay soil; with biochar application; 1 plant; LBB = clay soil; with biochar application; 3 plants.

Sebaliknya, pada tanah liat, aplikasi biochar tidak selalu meningkatkan diameter batang. Tanah liat telah memiliki kapasitas retensi air dan kapasitas tukar kation yang relatif tinggi sehingga tambahan biochar tidak memberikan perubahan lingkungan tumbuh yang sebesar pada tanah berpasir. Selain itu, struktur tanah liat yang lebih padat dapat membatasi aerasi dan perkembangan akar apabila kadar air tinggi, sehingga sebagian manfaat biochar terhadap pertumbuhan batang menjadi kurang optimal. Berbagai kajian menyebutkan bahwa efektivitas biochar sangat dipengaruhi oleh tekstur tanah, kondisi kesuburan awal, dosis aplikasi, dan karakteristik biochar yang digunakan. Pada tanah yang telah memiliki sifat fisik dan kimia yang baik, peningkatan pertumbuhan vegetatif akibat biochar sering kali lebih kecil dibandingkan pada tanah bertekstur kasar (Wei et al., 2023).

Jumlah tanaman per lubang tanam juga diduga memengaruhi perkembangan diameter batang melalui tingkat kompetisi terhadap cahaya, air, dan unsur hara. Pada perlakuan dengan satu tanaman per lubang tanam, setiap individu memperoleh ruang tumbuh dan sumber daya yang lebih besar sehingga akumulasi biomassa batang berlangsung lebih optimal (Postma et al., 2021). Sebaliknya, meningkatnya populasi tanaman menyebabkan kompetisi antar tanaman semakin tinggi sehingga sebagian hasil fotosintesis digunakan untuk mempertahankan pertumbuhan tanaman secara keseluruhan, bukan untuk pembesaran

batang. Kondisi tersebut menjelaskan mengapa diameter batang pada perlakuan tiga tanaman cenderung lebih kecil dibandingkan satu tanaman pada beberapa kombinasi perlakuan.

KESIMPULAN

Aplikasi biochar efektif memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah, terutama pada tanah berpasir, yang ditunjukkan oleh peningkatan pH tanah. Perbaikan kondisi tanah tersebut meningkatkan pertumbuhan vegetatif jagung, yang tercermin pada peningkatan tinggi tanaman, jumlah daun, biomassa, dan diameter batang, sedangkan panjang akar tidak menunjukkan respons yang nyata. Perlakuan tanah berpasir dengan biochar dan satu tanaman per lubang tanam (PBA) memberikan pertumbuhan tanaman terbaik. Dengan demikian, biochar lebih direkomendasikan sebagai amelioran pada tanah berpasir dibandingkan tanah liat karena memberikan perbaikan kualitas tanah yang lebih besar dan mendukung pertumbuhan tanaman jagung secara lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Acharya, B. S., Dodla, S., Wang, J. J., Pavuluri, K., Darapuneni, M., Dattamudi, S., Maharjan, B., & Kharel, G. (2024). Biochar impacts on soil water dynamics: knowns, unknowns, and research directions. *Biochar*, 6(34).
- Alshankiti, A., & Gill, S. (2016). Integrated Plant Nutrient Management for Sandy Soil Using Chemical Fertilizers, Compost, Biochar and Biofertilizers - Case Study in UAE - and Biofertilizers. *Journal of Arid Land Studies*, 26(3), 101–106.
- Badan Informasi Geospasial. (2017). Luas Perairan dan Panjang Garis Pantai. In *Badan Informasi Geospasial*.
- Bangkalan, P. K. (2021). *Perubahan Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah (P-RP JMD) Tahun 2018-2023 Kabupaten Bangkalan*.
- Bekchanova, M., Campion, L., Bruns, S., Kuppens, T., Lehmann, J., Jozefczak, M., Cuypers, A., & Malina, R. (2024). Biochar improves the nutrient cycle in sandy-textured soils and increases crop yield: a systematic review. *Environmental Evidence* 2024 13:1, 13(3).
- Bhat, A. S., Kuriqi, A., Dar, M. U. D., Bhat, O., Sammen, S. S., Towfiqul Islam, A. R. M., Elbeltagi, A., Shah, O., Al-Ansari, N., Ali, R., & Heddad, S. (2022). Application of Biochar for Improving Physical, Chemical, and Hydrological Soil Properties: A Systematic Review. *Sustainability*, 14(17), 11104.
- Blanco-Canqui, H. (2021). Does biochar application alleviate soil compaction? Review and data synthesis. *Geoderma*, 404(115317).
- Chi, W., Nan, Q., Liu, Y., Dong, D., Qin, Y., Li, S., & Wu, W. (2024). Stress resistance enhancing with biochar application and promotion on crop growth. *Biochar*, 6(43).
- Cong, M., Hu, Y., Sun, X., Yan, H., Yu, G., Tang, G., Chen, S., Xu, W., & Jia, H. (2023). Long-term effects of biochar application on the growth and physiological characteristics of maize. *Frontiers in Plant Science*, 14(1172425).

- Fan, C., Cui, Y., Zhang, Q., Yin, N., Cai, X., Yuan, X., Senadheera, S., Cho, Y., & Ok, Y. S. (2023). A critical review of the interactions between rhizosphere and biochar during the remediation of metal(loid) contaminated soils. *Biochar* 2023 5:1, 5(87).
- Hoque, Md. N., Imran, S., Hannan, A., Paul, N. C., Mahamud, Md. A., Chakroborty, J., Sarker, P., Irin, I. J., Brestic, M., & Rhaman, M. S. (2022). Organic Amendments for Mitigation of Salinity Stress in Plants: A Review. *Life*, 12(10), 1632.
- Hussain, M., Farooq, M., Nawaz, A., Al-Sadi, A. M., Solaiman, Z. M., Alghamdi, S. S., Ammara, U., Ok, Y. S., & Siddique, K. H. M. (2017). Biochar for crop production: potential benefits and risks. *Journal of Soils and Sediments*, 17(3), 685–716.
- Khan, S., Irshad, S., Mehmood, K., Hasnain, Z., Nawaz, M., Rais, A., Gul, S., Wahid, M. A., Hashem, A., Abd_Allah, E. F., & Ibrar, D. (2024). Biochar Production and Characteristics, Its Impacts on Soil Health, Crop Production, and Yield Enhancement: A Review. *Plants*, 13(2), 166.
- Kumar, Y., & Kumari, R. (2025). Exploring Calcareous Soils: Advantage, Disadvantage & Their Managements. *Just Agriculture*, 5(5), 97–101.
- Li, D., Li, X., Tao, Y., Yan, Z., & Ao, Y. (2022). Deciphering the bacterial microbiome in response to long-term mercury contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 229, 113062.
- Liu, C., Wang, C., Shang, S., Ma, J., Shan, S., Yue, Q., Li, L., & Pan, G. (2025). Biochar-Assisted Agriculture: From Healthy Soil to Healthy Plants. *Plants*, 14(21), 3273.
- Osman, K. T. (2018). *Management of Soil Problems*. Springer.
- Pamungkas, S. S. T. (2021). Pemanfaatan Tanah Mediteranian Sebagai Media Pembibitan Budset Tebu (*Saccharum officinarum* L.) Varietas Bululawang dengan Penambahan Pupuk Kandang pada Dosis yang Berbeda. *MEDIAGRO: Journal of Agricultural Sciences*, 17(2), 107–119.
- Pandian, K., Vijayakumar, S., Mustaffa, M. R. A. F., Subramanian, P., & Chitraputhirapillai, S. (2024). Biochar – a sustainable soil conditioner for improving soil health, crop production and environment under changing climate: a review. *Frontiers in Soil Science*, 4, 1376159.
- Postma, J. A., Hecht, V. L., Hikosaka, K., Nord, E. A., Pons, T. L., & Poorter, H. (2021). Dividing the pie: A quantitative review on plant density responses. *Plant, Cell & Environment*, 44(4), 1072–1094.
- 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. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1092637.
- Qayyum, M. F., Khan, D. E. S. Ee., Alghanem, S. M. S., Sakit Alhaithloul, H. A., Alsudays, I. M., Rizwan, M., & Yong, J. W. H. (2024). Agricultural waste-based modified

biochars differentially affected the soil properties, growth, and nutrient accumulation by maize (*Zea mays* L.) plants. *BMC Plant Biology* 2024 24:1, 24(498).

 Qi, S., Degen, A., Wang, W., Huang, M., Li, D., Luo, B., Xu, J., Dang, Z., Guo, R., & Shang, Z. (2024). Systemic review for the use of biochar to mitigate soil degradation. *GCB Bioenergy*, 16(6).

 Ramadhani, R. W. S., Afany, M. R., & Mulyanto, D. (2023). Kajian Pertumbuhan Tanaman dan Produktivitas Biomassa Daun Pohon Kayu Putih Pada Jenis Tanah Yang Berbeda di BDH Playen Balai KPH Yogyakarta. *Jurnal Tanah Dan Air (Soil and Water Journal)*, 20(1), 32–41.

 Rashmi, I., Kumawat, A., Munawery, A., Karthika, K. S., Sharma, G. K., Kala, S., Pal, R., Rashmi, I., Kumawat, A., Munawery, A., Karthika, K. S., Sharma, G. K., Kala, S., & Pal, R. (2022). Soil Amendments: An Ecofriendly Approach for Soil Health Improvement and Sustainable Oilseed Production. In *Oilseed Crops - Uses, Biology and Production*. IntechOpen.

 Rizwan, M., Murtaza, G., Zulfiqar, F., Moosa, A., Iqbal, R., Ahmed, Z., Irshad, S., Khan, I., Li, T., Chen, J., Zhang, M., Siddique, K. H. M., Leng, L., & Li, H. (2023). Sustainable manufacture and application of biochar to improve soil properties and remediate soil contaminated with organic impurities: a systematic review. *Frontiers in Environmental Science*, 11.

 Ruan, R., & Wang, Y. (2024). Effects of biochar amendment on root growth and plant water status depend on maize genotypes. *Agricultural Water Management*, 293(108688).

 Schapel, A., Bell, R., Yeap, S., & Hall, D. (2023). Sandy Soil Constraints: Organic and Clay Amendments to Improve the Productivity of Sandy Soils. In *Soil Constraints and Productivity*. CRC Press.

 Singh, H., Northup, B. K., Rice, C. W., & Prasad, P. V. V. (2022). Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis. *Biochar*, 4(1), 8-.

 Wan, H., Liu, X., Shi, Q., Chen, Y., Jiang, M., Zhang, J., Cui, B., Hou, J., Wei, Z., Hossain, M. A., & Liu, F. (2023). Biochar amendment alters root morphology of maize plant: Its implications in enhancing nutrient uptake and shoot growth under reduced irrigation regimes. *Frontiers in Plant Science*, 14.

 Wei, B., Peng, Y., Lin, L., Zhang, D., Ma, L., Jiang, L., Li, Y., He, T., & Wang, Z. (2023). Drivers of biochar-mediated improvement of soil water retention capacity based on soil texture: A meta-analysis. *Geoderma*, 437(116591).

 Younas, T., Cabello, G. G. C., Taype, M. A., Cardenas, J. A. L., Trujillo, P. D. C., Salas-Contreras, W. H., Yaulilahua-Huacho, R., Areche, F. O., Rodriguez, A. R., Cruz Nieto, D. D., Chirre, E. T. C., & Gondal, A. H. (2022). Conditioning of desert sandy soil and investigation of the ameliorative effects of poultry manure and bentonite treatment rate on plant growth. *Brazilian Journal of Biology*, 82(e269137), 1–10.

Zenebe, B., Dobo, B., & Woliy, K. (2024). The Influence of Biochar, Organic and Inorganic Fertilizers, and Arbuscular Mycorrhizal Fungi Inoculation on Maize Crop Performance Under Normal and Water-Stressed Conditions. *Advances in Agriculture*, 2024(1).