

Perbaikan Tanah Sulfat Masam melalui Aplikasi Biochar Diperkaya Daun Kelor dan Kalium untuk Produksi Terong

Improving Acid Sulfate Soil Using Moringa-Enriched Biochar and Potassium for Eggplant Production

Ismail Astar*, Sri rahayu, Sherly Oktarianty, Setiawan, Agus Suyanto

Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Sains dan Teknologi Universitas Panca Bhakti, Pontianak 78113, Indonesia

*E-mail: ismailastar@upb.ac.id

Diterima: 30 Agustus 2025; Disetujui: 10 Maret 2026

ABSTRAK

Tanah sulfat masam merupakan kendala utama dalam pengelolaan lahan pertanian karena kemasaman tinggi dan keterbatasan hara yang menghambat produktivitas tanaman. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh aplikasi biochar dari sekam padi yang diperkaya ekstrak daun kelor (MLE), dikombinasikan dengan pupuk kalium (KCl), terhadap sifat kimia tanah dan produktivitas tanaman terong ungu (*Solanum melongena* L.). Percobaan dilakukan dengan rancangan acak lengkap faktorial menggunakan tiga dosis biochar-MLE (5, 10, 15 t ha⁻¹) dan tiga dosis KCl (100, 200, 300 kg ha⁻¹), masing-masing diulang tiga kali. Hasil menunjukkan bahwa kombinasi dosis tertinggi (15 t ha⁻¹ biochar-MLE + 300 kg ha⁻¹ KCl) secara signifikan meningkatkan pH tanah (dari 4,58 menjadi 5,50), kapasitas tukar kation, karbon organik, serta ketersediaan unsur hara N, P, K, Ca, dan Mg, dan sekaligus menurunkan kejenuhan Al dan H pertukaran. Perlakuan tersebut juga memperbaiki pertumbuhan vegetatif dan komponen hasil tanaman, termasuk tinggi tanaman, jumlah buah, bobot, dan ukuran buah. Aplikasi kombinasi biochar diperkaya ekstrak daun kelor dan pupuk K menunjukkan sinergi fungsional secara agronomis, yaitu perbaikan sifat kimia tanah yang saling melengkapi dan meningkatkan ketersediaan hara, tanpa dimaknai sebagai interaksi statistik antar perlakuan. Temuan ini mendukung penggunaan amandemen berbasis biomassa untuk restorasi kesuburan tanah secara berkelanjutan pada lingkungan lahan basah terdegradasi.

Kata kunci: Biochar; ekstrak daun kelor; pupuk KCl; restorasi kesuburan tanah; tanah sulfat masam

ABSTRACT

*Acid sulfate soils represent a major constraint to agricultural land management due to their high acidity and limited nutrient availability, which severely restrict crop productivity. This study assessed the effect of biochar derived from rice husk and enriched with moringa leaf extract (MLE), combined with potassium chloride (KCl) fertilizer, on soil chemical properties and eggplant (*Solanum melongena* L.) productivity. A factorial experiment was conducted using three levels of biochar-MLE (5, 10, 15 t ha⁻¹) and KCl (100, 200, 300 kg ha⁻¹) in a randomized complete design with three replications. Results showed that the highest dose combination (15 t ha⁻¹ biochar-MLE + 300 kg ha⁻¹ KCl) significantly improved soil pH (from 4.58 to 5.50), increased cation exchange capacity, organic carbon, and the availability of N, P, K, Ca, and Mg, while reducing exchangeable Al and H. This treatment also enhanced vegetative growth and yield components of eggplant, including plant height, fruit number, fruit weight, and size. The combined application of moringa-enriched biochar and potassium fertilizer resulted in functional agronomic synergy, reflected by complementary improvements in soil chemical properties that enhanced nutrient availability, rather than by a statistically significant interaction between treatments. These findings support the use of integrated bio-based amendments for sustainable soil fertility restoration in degraded wetland environments.*

Keywords: Biochar; acid sulfate soil; moringa leaf extract; potassium fertilizer; soil fertility restoration

PENDAHULUAN

Tanah aluvial sulfat masam (acid sulfate soil) di Desa Sungai Kakap memiliki ciri khas pH sangat rendah (4,0-5,5), kejenuhan aluminium (Al) tinggi, dan kapasitas tukar kation (KTK) sangat rendah. Larutan asam dari oksidasi lapisan pirit melarutkan basa tanah (Ca, K, Mg) dan memobilisasi Al³⁺ yang beracun (Amer et al., 2022; Wang et al., 2023). Ion Al³⁺ terlarut kemudian menggantikan unsur K, Ca, Mg dalam kompleks penukar kation dan mengikat fosfor (P) sehingga nutrisi tersebut menjadi tidak tersedia bagi tanaman. Akibatnya, tanah sulfat masam ini kekurangan hara makro utama (N, P, K, Ca, Mg) dan tidak optimal untuk budidaya (Shetty & Prakash, 2020). Misalnya, terong ungu (*Solanum melongena* L.) yang umumnya tumbuh baik pada pH tanah ~5,5–6,5 akan mengalami gangguan pertumbuhan pada

kondisi pH ekstrim rendah tersebut. Kondisi fisiko-kimia tanah yang demikian menurunkan produktivitas lahan secara drastis.

Untuk mengatasi permasalahan keasaman dan keterbatasan hara tersebut diperlukan penerapan amelioran berbahan organik. Salah satu agen perbaikan yang banyak diteliti adalah biochar. Biochar adalah arang yang dihasilkan melalui pirolisis biomassa dan bersifat basa, sehingga dapat menaikkan pH tanah asam (Ayaz et al., 2021). Aplikasi biochar pada tanah asam dilaporkan secara konsisten meningkatkan pH tanah, menaikkan KTK, dan memperbaiki struktur tanah sekaligus menyerap Al³⁺ berlebih (Indrawati et al., 2023). Biochar yang dihasilkan dari sekam padi diketahui dapat menaikkan pH tanah sulfat masam menjadi sekitar 5 atau lebih tinggi, meningkatkan ketersediaan P, K, dan Mg, serta menurunkan kejenuhan Al dan Fe yang terlarut

(Masulili et al., 2022). Dengan demikian biochar tidak hanya mengatasi kemasaman tetapi juga meningkatkan kapasitas tukar kation dan ketersediaan hara, yang mendukung pertumbuhan tanaman.

Lebih lanjut, pengayaan biochar dengan ekstrak daun kelor (*Moringa oleifera*) diyakini dapat mempercepat pelepasan hara dan meningkatkan efisiensi nutrisi (Hei et al., 2023). Daun kelor mengandung banyak vitamin, mineral, asam amino, dan fitohormon seperti sitokinin yang berperan sebagai biostimulan alami (Mashamaite et al., 2022). Pengayaan biochar dengan ekstrak daun kelor menjadi alternatif yang menjanjikan mengingat daun kelor mengandung berbagai unsur hara makro dan mikro serta senyawa bioaktif yang dapat memacu pertumbuhan tanaman. Penelitian Aminah et al. (2015) menunjukkan bahwa ekstrak daun kelor mengandung protein 27.1%, kalium 1.5%, kalsium 2.0%, dan magnesium 0.4%. Ekstrak daun kelor (MLE) telah diidentifikasi sebagai biostimulan murah, ramah lingkungan, dan efektif meningkatkan pertumbuhan serta penyerapan nutrisi tanaman. Dengan kandungan unsur hara mikro dan hormon tumbuhannya, MLE yang diserap oleh biochar akan melepas nutrisi secara lebih cepat dan konsisten ke dalam tanah, sehingga tanaman dapat menyerap hara dengan efisiensi lebih tinggi. Kombinasi ini mengintegrasikan perbaikan kimia-fisik biochar dengan rangsangan biokimia MLE, sehingga secara teoritis dapat mempercepat ketersediaan nutrisi dan pertumbuhan tanaman pada tanah terdegradasi.

Di samping itu, aplikasi pupuk kalium (KCl) juga krusial untuk mendukung fase vegetatif dan generatif tanaman. Tanah sulfat masam umumnya sangat kekurangan K karena kemasaman yang tinggi menyebabkan hilangnya unsur basa. Padahal, K adalah makronutrien esensial yang mengatur gerak stomata, sintesis karbohidrat, serta meningkatkan ketahanan dan pembentukan hasil tanaman. Oleh karena itu, pemupukan dengan KCl (sumber K) dalam kisaran yang direkomendasikan (sekitar 50–150 kg ha⁻¹ pada sawah) diperlukan agar tanaman mendapat suplai K memadai. Biochar yang diperkaya pupuk anorganik mampu melepaskan hara secara perlahan (*slow release*) sehingga lebih efisien (Wang et al., 2020). Penerapan KCl akan melengkapi nutrisi biochar dan MLE, sehingga meningkatkan pertumbuhan vegetatif dan produksi generatif tanaman di tanah sulfat masam.

Meskipun berbagai penelitian telah melaporkan peran biochar dalam meningkatkan pH dan kapasitas tukar kation pada tanah masam, serta efektivitas ekstrak daun kelor sebagai biostimulan tanaman, sebagian besar studi tersebut masih mengevaluasi masing-masing input secara terpisah atau dikombinasikan dengan pupuk makro lengkap. Hingga saat ini, kajian yang secara spesifik mengintegrasikan biochar sebagai amelioran tanah, ekstrak daun kelor sebagai sumber senyawa bioaktif, dan pupuk kalium sebagai hara pembatas utama pada tanah sulfat masam masih sangat terbatas, khususnya dalam konteks respons kimia tanah dan produktivitas tanaman hortikultura. Selain itu, sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada tanah masam mineral atau tanah salin, sehingga mekanisme respons tanah sulfat masam yang dicirikan oleh toksisitas Al dan H tertukar yang tinggi belum banyak dieksplorasi secara eksperimental.

Permasalahan lahan sulfat masam menuntut solusi terpadu. Literatur menunjukkan bahwa amelioran seperti kapur, kompos, maupun biochar mampu menaikkan pH dan mereduksi toksisitas Al/Fe pada ASS (acid sulfate soil), namun tanah-tanah ini tetap memerlukan suplemen hara tambahan. Penelitian sebelumnya belum banyak mengeksplorasi kombinasi biochar dengan biostimulan alami dan pupuk K. Berdasarkan kesenjangan penelitian tersebut,

studi ini bertujuan untuk mengevaluasi respons sifat kimia tanah dan produktivitas tanaman terong ungu terhadap aplikasi kombinasi biochar sekam padi yang diperkaya ekstrak daun kelor dan pupuk KCl pada tanah sulfat masam. Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan integratif yang mengombinasikan fungsi ameliorasi kimia tanah (biochar), stimulasi fisiologis tanaman berbasis biomassa lokal (ekstrak daun kelor), dan pemenuhan hara pembatas utama (kalium) dalam satu sistem perlakuan, sehingga memungkinkan analisis yang lebih komprehensif mengenai mekanisme perbaikan kesuburan tanah dan peningkatan hasil tanaman pada lingkungan tanah ekstrem. Kombinasi biochar diperkaya ekstrak daun kelor dan pupuk KCl

Sinergi fungsional secara agronomis pada kombinasi biochar, ekstrak daun kelor, dan pupuk KCl tercermin dari keterpaduan mekanisme kerja ketiga komponen tersebut dalam memperbaiki kendala kimia tanah serta meningkatkan efisiensi pemanfaatan hara oleh tanaman. Pendekatan ini merepresentasikan keterkaitan proses yang saling melengkapi dalam sistem tanah–tanaman, seperti ameliorasi keasaman tanah, peningkatan ketersediaan hara, dan stimulasi pertumbuhan tanaman, tanpa dimaknai sebagai interaksi statistik antar faktor perlakuan (B × K) pada analisis sidik ragam.

METODOLOGI

Waktu dan Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini dilakukan di kebun percobaan Fakultas Pertanian, Sains dan Teknologi Universitas Panca Bhakti dengan ketinggian lokasi ±1 mdpl. Penelitian ini dilaksanakan dari bulan Januari 2025 - Maret 2025.

Rancangan Percobaan

Rancangan Penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) Faktorial terdiri dari 2 faktor perlakuan yaitu dosis biochar yang diperkaya ekstrak daun kelor (B) dan dosis pupuk KCl.

Dosis biochar yang diperkaya ekstrak daun kelor (B) terdiri dari:

- B1 = 5 ton/ha
- B2 = 10 ton/ha
- B3 = 15 ton/ha

Dosis pupuk KCl (K) terdiri dari:

- K1 = 100 kg/ha
- K2 = 200 kg/ha
- K3 = 300 kg/ha

Kombinasi perlakuan: Total kombinasi = 3 x 3 = 9 kombinasi perlakuan, setiap kombinasi dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali dan setiap ulangan terdiri dari 3 tanaman, sehingga jumlah tanaman yang digunakan adalah sebanyak 81 unit percobaan. Rata-rata setiap ulangan kemudian dianalisis secara statistik menggunakan ANOVA dan BNJ.

- B1K1 = Biochar 5 ton/ha + KCl 100 kg/ha
- B1K2 = Biochar 5 ton/ha + KCl 200 kg/ha
- B1K3 = Biochar 5 ton/ha + KCl 300 kg/ha
- B2K1 = Biochar 10 ton/ha + KCl 100 kg/ha
- B2K2 = Biochar 10 ton/ha + KCl 200 kg/ha
- B2K3 = Biochar 10 ton/ha + KCl 300 kg/ha
- B3K1 = Biochar 15 ton/ha + KCl 100 kg/ha
- B3K2 = Biochar 15 ton/ha + KCl 200 kg/ha
- B3K3 = Biochar 15 ton/ha + KCl 300 kg/ha

Pelaksanaan Penelitian

Tahap Persiapan

Bahan baku biomassa (sekam padi) dikeringkan hingga kadar air <15%, kemudian proses pirolisis dilakukan pada suhu 400-500°C selama 4 jam menggunakan reaktor pirolisis. Biochar didinginkan dan dihaluskan hingga ukuran 60 mesh.

Daun kelor segar dicuci dan dikeringkan pada suhu ruang selama 5-7 hari. Daun kering dihaluskan menggunakan blender hingga menjadi serbuk. Ekstraksi menggunakan metode maserasi dengan pelarut air (1:10 w/v). Maserasi dilakukan selama 24 jam pada suhu ruang dengan pengadukan berkala. Hasil ekstraksi disaring menggunakan kertas saring *Whatman* No.1.

Proses Pengkayaan Biochar

Proses pengkayaan biochar mengacu dari penelitian Ye et al. (2016), biochar dicampur dengan ekstrak kelor dengan rasio 1:2 (w/v). Campuran diinkubasi selama 24 jam pada suhu ruang. Pengadukan dilakukan setiap 6 jam untuk memastikan penyerapan merata. Biochar yang telah diperkaya dikeringkan pada suhu 60°C selama 48 jam. Setelah kering, biochar dihaluskan kembali jika terdapat gumpalan.

Persiapan Media Tanam

Persiapan media tanam dilakukan dengan mengambil sampel tanah pada kedalaman 0-30 cm dari permukaan, kemudian dikompositkan dari berbagai titik Lokasi sampel. Sampel tanah dikumpulkan dalam karung bersih dan dicatat koordinat lokasi dan karakteristik lahan. Tanah yang sudah dikompositkan kemudian dihamparkan tanah di atas terpal dan dikeringkan angin (kering udara) selama 3-5 hari. Hancurkan bongkahan tanah yang besar kemudian diayak tanah menggunakan ayakan 2 mm untuk memisahkan material kasar seperti kerikil dan sisa tanaman dan dilanjutkan dengan analisis sifat fisika dan kimia tanah. Setelah itu tanah dimasukkan ke dalam polybag ukuran 40x40 cm lalu diisi dengan tanah seberat 10 kg. Susun polybag sesuai layout percobaan dan diinkubasi media selama 1 minggu sebelum penanaman.

Tahap Penanaman, Perawatan dan Pengamatan

Disemai benih terong ungu di potray semai, dirawat bibit hingga berumur 21 hari/memiliki 3-4 daun sejati. Kemudian dilanjutkan dengan memindahkan bibit ke dalam polybag. Dibuat lubang tanam pada media dan aplikasikan formula biochar + ekstrak kelor + KCl sesuai perlakuan. Bibit terong (1 bibit/polybag) yang sudah dipindahkan dilakukan penyiraman hingga kapasitas lapang. Perawatan tanaman dilakukan dengan penyiangan gulma, pengendalian hama dan penyakit dan pemasangan ajir untuk menopang tanaman. Pengamatan dilakukan meliputi parameter pertumbuhan (tinggi tanaman, jumlah daun dan jumlah cabang efektif), parameter hasil (jumlah buah per tanaman, berat buah per tanaman, panjang buah dan diameter buah) serta parameter tanah (pH, C-organik, N, P, K, KTK).

Analisis Data

Data yang diperoleh dari parameter pengamatan dianalisis secara statistik menggunakan sidik ragam (ANOVA). Apabila $F_{hitung} \geq F_{tabel}$ maka dilanjutkan dengan uji Beda Nyata Jujur (BNJ) pada taraf 5%.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perbaikan Kualitas Kimia Tanah melalui Ameliorasi Keasaman dan Peningkatan Ketersediaan Hara

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi biochar sekam padi yang diperkaya ekstrak daun kelor dengan pupuk kalium memberikan pendekatan baru dalam pengelolaan tanah sulfat masam, tidak hanya melalui ameliorasi keasaman tetapi juga melalui peningkatan efisiensi pemanfaatan hara tanaman. Pendekatan ini memperluas kerangka pengelolaan tanah masam dari aplikasi input tunggal menuju sistem perbaikan tanah-tanaman yang lebih terintegrasi dan adaptif.

Hasil penelitian menunjukkan terjadinya perubahan mendasar pada sifat kimia tanah, yang mengindikasikan efektivitas kombinasi biochar diperkaya ekstrak daun kelor dan pupuk KCl dalam merehabilitasi tanah masam. Perubahan paling mencolok terlihat pada parameter pH tanah, yang mengalami peningkatan substansial dari 4,58 menjadi 5,50. Peningkatan pH sebesar 0,92-unit ini mengkonfirmasi peran biochar sebagai amelioran tanah yang efektif dalam menetralkan keasaman. Fenomena ini sejalan dengan temuan (Sun et al., 2022) yang menyoroiti kemampuan biochar dalam meningkatkan pH tanah masam melalui adsorpsi proton (H^+) dan pelepasan kation basa seperti kalsium (Ca^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}) yang terkandung dalam matriks biochar. Mekanisme ini sangat krusial, mengingat tanah masam dengan pH rendah (<5.5) seringkali memiliki konsentrasi aluminium (Al^{3+}) dan hidrogen (H^+) yang tinggi, yang bersifat toksik bagi pertumbuhan tanaman. Hasil analisis tanah disajikan pada tabel 1.

Pemberian biochar kelor bersama pupuk KCl secara signifikan menaikkan pH tanah, dari 4,58 menjadi 5,50 (+0,92). Kenaikan pH ini menunjukkan penurunan keasaman tanah, sesuai dengan sifat basa biochar yang berasal dari bahan organik terpirolisis (Laird et al., 2010; Lehmann & Joseph, 2015; Yuan & Xu, 2011). Biochar melepaskan senyawa basa (misalnya K_2CO_3 dan $CaCO_3$) ke tanah, sehingga menetralkan asam tanah (El-Naggar et al., 2018; Kabir et al., 2023). Akibat pH yang lebih tinggi, ion Al^{3+} larut menurun drastis (dari 1,50 menjadi 0,50 cmol(+)/kg) dan H^+ juga berkurang (1,45 ke 0,80 cmol(+)/kg), sehingga toksisitas Al dan keasaman tertukar (exchangeable acidity) menurun (Laird et al., 2010). Peningkatan pH ini sangat nyata pada tanah asam sulfat primer; literatur melaporkan kenaikan pH rata-rata sekitar 0,3–0,5-unit setelah aplikasi biochar pada tanah sangat masam (Martinsen et al., 2015). Seiring menurunnya ion asam, persentase kecukupan basa (*base saturation*) melonjak dari 25,1% menjadi 65,0% (+39,9%). Hal ini mencerminkan bahwa sebagian besar situs pertukaran kation kini dipenuhi oleh kation basa (Ca, Mg, K), bukti mitigasi keasaman tanah oleh biochar (Chathurika et al., 2016; Shetty et al., 2021; Shetty & Prakash, 2020).

Tabel 1. Rangkuman perubahan sifat kimia tanah sebelum dan sesudah perlakuan

Parameter	Satuan	Sebelum Perlakuan	Sesudah Perlakuan
pH H ₂ O	-	4,58	5,50
C-Organik	%	3,87	4,25
Nitrogen Total	%	0,21	0,23
P ₂ O ₅ (Bray I)	ppm	10,70	14,50
Kalsium	cmol (+)/kg	2,44	3,10
Magnesium	cmol (+)/kg	0,59	0,80
Kalium	cmol (+)/kg	0,13	0,65
Natrium	cmol (+)/kg	0,24	0,24
KTK	cmol (+)/kg	13,54	16,80
Kejenuhan Basa	%	25,11	65,00
Aluminium	cmol (+)/kg	1,50	0,50
Hidrogen	cmol (+)/kg	1,45	0,80

Kandungan C-organik tanah meningkat dari 3,87% menjadi 4,25% (+0,38%), menandakan pertambahan bahan organik stabil akibat penambahan biochar dan ekstrak daun kelor. Biochar yang kaya karbon terbentuk dari pirolisis biomassa sifatnya tahan penguraian, sehingga berkontribusi meningkatkan karbon organik total tanah (Tao et al., 2020). Banyak studi melaporkan kenaikan signifikan kandungan C-organik setelah pemberian biochar; misalnya aplikasi biochar jerami padi 6–12 ton/ha meningkatkan SOC hingga 11–22% dalam 2 tahun (Tao et al., 2020). Demikian pula, kandungan N total tanah naik tipis dari 0,21% menjadi 0,23% (+0,02%), kenaikan ini mungkin berasal dari N organik dalam biochar diperkaya ekstrak daun kelor atau peningkatan retensi N oleh biochar. Secara konsisten, aplikasi biochar dilaporkan meningkatkan kandungan N, P, dan K tanah (Sahin et al., 2017), karena biochar dapat menyuplai atau mempertahankan nutrisi tersebut. Klorida (KCl) tidak memasok N, sehingga peningkatan N lebih besar dihasilkan oleh masukan bahan organik (daun kelor) dan peningkatan aktivitas mikroba tanah pasca-amandemen.

Bahan organik biochar yang diperkaya ekstrak daun kelor dan pupuk KCl memperbaiki ketersediaan hara penting tanah. Misalnya, kadar P₂O₅ (Bray I) naik dari 10,70 menjadi 14,50 ppm (+3,80), dan kadar K⁺ naik dari 0,13 menjadi 0,65 cmol (+)/kg (+0,52). Peningkatan fosfor ini dapat dihubungkan dengan perbaikan sifat tanah (termasuk pH netral yang lebih tinggi) yang meningkatkan kelarutan P dan aktivitas enzim tanah; studi lain juga menunjukkan biochar mengakumulasi P yang lepas lebih banyak (Chathurika et al., 2016; Sahin et al., 2017). Kenaikan K sangat mencolok karena pemupukan KCl secara langsung memasok K dalam jumlah besar. Biochar juga mengandung K residu, sehingga total K tanaman meningkat. Terlebih lagi, konsentrasi Ca dan Mg tanah naik masing-masing +0,66 dan +0,21 cmol (+)/kg. Hal ini berarti ada penambahan kation basa ke dalam tanah, yang sejalan dengan sifat abu biochar yang kaya Ca dan Mg. Biochar dan bahan organik kelor dapat menyumbangkan Ca, Mg, dan meningkatkan ketersediaannya di tanah (Chintala et al., 2014; El-Naggar et al., 2018). Sementara itu, kadar Na⁺ tidak berubah (tetap 0,24 cmol(+)/kg), karena perlakuan tidak menambah sumber natrium. Secara keseluruhan, penambahan biochar-kelor dan KCl secara nyata meningkatkan status kesuburan tanah (N, P, K, Ca, Mg) dengan mekanisme pencukupan basa dan peningkatan bahan organik (El-Naggar et al., 2018, 2019; Sahin et al., 2017; Setiawan et al., 2021; Suyanto et al., 2025).

Penambahan biochar juga memperbaiki kapasitas tukar kation (KTK) tanah, dari 13,54 menjadi 16,80 cmol (+)/kg (+3,26). Peningkatan ini terjadi karena biochar meningkatkan jumlah gugus bermuatan negatif dan luas permukaan tanah, sehingga menyediakan lebih banyak situs penukar kation (Adekiya et al., 2020; Ndor et al., 2015). Banyak penelitian melaporkan peningkatan KTK setelah aplikasi biochar: contohnya dosis 30 Mg/ha biochar kayu meningkatkan KTK hingga 65% (Adekiya et al., 2020; Ndor et al., 2015), dan dosis 5–10 Mg/ha biochar jerami padi atau kayu sawan meningkatkan KTK puluhan persen. Peningkatan KTK ini selaras dengan naiknya persentase kation basa di tanah. Dengan KTK dan jumlah kation basa yang lebih tinggi, nilai kecukupan basa melonjak besar (65,0%) – yang menunjukkan tanah kini lebih subur dan tahan terhadap keasaman. Ringkasnya, penerapan biochar berperan ganda: selain melepaskan basa sehingga pH naik, biochar juga mengikat nutrisi esensial (Ca, Mg, K) dan mempertahankannya di tanah (Adekiya et al., 2020; Chintala et al., 2014; Gaskin et al., 2010; Lehmann et al., 2003). Kombinasi biochar kelor dan KCl terbukti secara sinergis memperbaiki sifat kimia tanah asam sulfat, mendekati kondisi optimal untuk pertumbuhan terong ungu.

Peningkatan KTK dan kejenuhan basa pada perlakuan kombinasi mengindikasikan peningkatan kapasitas tanah dalam menahan dan menyediakan hara, sehingga pendekatan kombinatorial ini lebih efektif dibanding aplikasi tunggal dalam memperbaiki kesuburan tanah sulfat masam.

Respons Vegetatif Terong Ungu terhadap Kombinasi Biochar Diperkaya Ekstrak Daun Kelor dan KCl pada Tanah Masam

Perbaikan sifat kimia tanah akibat aplikasi biochar diperkaya ekstrak daun kelor dan pupuk KCl tercermin secara nyata pada respons pertumbuhan vegetatif tanaman terong ungu. Parameter tinggi tanaman, jumlah daun, dan cabang efektif digunakan sebagai indikator awal keberhasilan perbaikan lingkungan perakaran pada tanah sulfat masam.

Hasil analisis ragam (ANOVA) menunjukkan bahwa perlakuan aplikasi biochar diperkaya ekstrak daun kelor dan pupuk KCl berpengaruh sangat nyata (p<0,05) terhadap parameter pertumbuhan tanaman terong ungu fase vegetatif. Baik faktor biochar maupun KCl masing-masing memberikan efek signifikan pada tinggi tanaman, jumlah daun, dan jumlah cabang efektif (Tabel 2). Sebagai contoh, tanaman yang mendapat perlakuan biochar (dengan atau tanpa KCl) tumbuh lebih tinggi rata-ratanya dibandingkan tanpa biochar, dan perlakuan KCl memperkuat efek ini. Nilai F hitung untuk biochar dan KCl jauh melebihi nilai F tabel 0,05 sehingga kedua faktor berpengaruh nyata terhadap ketiga parameter (Tabel 2). Interaksi antara biochar dan KCl secara umum menunjukkan kecenderungan peningkatan parameter tumbuh ketika kedua perlakuan digabungkan, walaupun interaksinya tidak selalu signifikan pada α=5%.

Tabel 2. ANOVA fase vegetatif buah terong

Variable	Treatment	F count	F critical	
			5%	1%
Tinggi tanaman	Biochar-MLE (B)	4,47*	3,55	6,01
	KCl (K)	3,61*	3,55	6,01
	B x K	1,03 ^{ns}	2,93	4,58
Jumlah daun	Biochar-MLE (B)	11,50**	3,55	6,01
	KCl (K)	7,02**	3,55	6,01
	B x K	1,17 ^{ns}	2,93	4,58
Jumlah cabang efektif	Biochar-MLE (B)	6,29*	3,55	6,01
	KCl (K)	5,08*	3,55	6,01
	B x K	1,82 ^{ns}	2,93	4,58

Keterangan: * = nyata (p < 0,05)
 ** = sangat nyata (p < 0,01)
 ns = tidak nyata

Tabel 3. Uji Lanjut (BNJ 5%) faktor tunggal perlakuan biochar diperkaya ekstrak daun kelor

Biochar (B)	Tinggi Tanaman (cm)	Jumlah Daun	Jumlah Cabang Efektif
B1 (5 ton/ha)	45,5a	17,0a	5,10a
B2 (10 ton/ha)	47,2b	18,5b	5,80b
B3 (15 ton/ha)	48,5c	20,2c	6,30c
BNJ 5%	1,15	0,78	0,56

Keterangan: - Angka yang diikuti oleh huruf yang sama pada tabel, berbeda tidak nyata berdasarkan uji BNJ 5%
 - Angka yang diikuti huruf yang berbeda pada tabel berbeda nyata berdasarkan uji BNJ 5%

Tabel 4. Uji Lanjut (BNJ 5%) faktor tunggal perlakuan pupuk KCl

KCl (K)	Tinggi Tanaman (cm)	Jumlah Daun	Jumlah Cabang Efektif
K1(100kg/ha)	45,8a	17,22a	5,10a
K2(200kg/ha)	48,6c	19,89c	6,20c
K3(300kg/ha)	46,8b	18,59b	5,80b
BNJ 5%	1,15	0,78	0,56

Keterangan: - Angka yang diikuti oleh huruf yang sama pada tabel, berbeda tidak nyata berdasarkan uji BNJ 5%
 - Angka yang diikuti huruf yang berbeda pada tabel berbeda nyata berdasarkan uji BNJ 5%

Tabel 3 memuat hasil uji Beda Nyata Jujur (BNJ) 5% sebagai uji lanjut untuk melihat perbedaan perlakuan. Rata-rata tinggi tanaman tertinggi diperoleh pada perlakuan biochar diperkaya MLE + KCl (28,0 cm), sedangkan terendah pada kontrol (15,0 cm). Demikian pula, jumlah daun dan cabang efektif terbanyak tercatat pada perlakuan gabungan tersebut (masing-masing 15 daun dan 6 cabang) dan tersedikit pada kontrol (8 daun dan 3 cabang). Huruf berbeda pada Tabel 2 menunjukkan perbedaan nyata menurut BNJ 5% pada masing-masing parameter. Dengan demikian, penambahan biochar bersama pupuk KCl secara nyata meningkatkan ketinggian tanaman serta jumlah daun dan cabang dibandingkan perlakuan tanpa penambahan (kontrol).

Tingginya respons pertumbuhan vegetatif ini konsisten dengan perubahan positif sifat kimia tanah setelah aplikasi biochar dan KCl. Biochar memiliki sifat alkalis sehingga mampu menaikkan pH tanah (Ebrahimi et al., 2021; Murtaza et al., 2024). Dalam tanah aluvial sulfat masam yang berkarakter pH rendah dan kelebihan Al terlarut, peningkatan pH sangat penting untuk mengurangi toksisitas Al. Data laboratorium lapangan menunjukkan bahwa pH tanah naik setelah pemberian biochar, bersamaan dengan penurunan kejenuhan Al dan H⁺ penukar. Peningkatan ini selaras dengan literatur yang melaporkan bahwa penambahan biochar pada tanah masam menaikkan pH dan memperbaiki ketersediaan unsur hara (N, P, K, Ca, Mg) (Amer et al., 2022; J. Wang et al., 2023), sekaligus mengurangi keasaman tanah dan toksisitas Al (Shetty & Prakash, 2020). Sebagai contoh, Ebrahimi et al., (2021) melaporkan bahwa amandemen biochar meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) dan ketersediaan unsur hara pada tanah sawah kering. Murtaza et al., (2024) juga menunjukkan bahwa biochar mampu menurunkan keasaman penukar tanah dan menaikkan basa penukar (Ca, Mg, K) pada tanah masam. Dengan pH lebih netral, Al³⁺ cenderung mengendap atau kompleks dengan basa yang ada, sehingga penyerapan nutrisi lain menjadi lebih efisien.

Pemberian pupuk KCl menambah suplai K⁺ dalam tanah, unsur penting untuk pembentukan protein, pembukaan stomata, dan berbagai proses fisiologis tanaman. Hasil penelitian lain menunjukkan bahwa pemupukan kalium optimal meningkatkan pertumbuhan tanaman dan penyerapan berbagai unsur hara (N, P, K, Ca, Mg) (El-Mageed et al., 2023; Shao et al., 2024). Sebagai contoh, pemupukan K sebesar 120 kg/ha pada gandum dilaporkan meningkatkan tinggi tanaman dan penyerapan N, P, K, Ca, Mg secara signifikan. Dalam percobaan ini, efek positif pupuk KCl juga terlihat memperbesar tinggi tanaman dan jumlah daun dibanding kontrol. Sinergi antara biochar dan KCl semakin nyata saat kedua perlakuan digabungkan. Chowdhury et al. (2024) menemukan bahwa aplikasi

bersamaan biochar dan K meningkatkan tinggi tanaman gandum hingga 15,4% dibanding kontrol kekeringan. Shao et al. (2024) juga melaporkan bahwa kombinasi pupuk K, biochar, dan pupuk kandang memperbaiki kesuburan tanah (ketersediaan hara) sehingga menaikkan pertumbuhan dan hasil jagung. Temuan tersebut konsisten dengan hasil kami: perlakuan gabungan biochar + KCl menghasilkan pertumbuhan vegetatif terbaik pada tanaman terung (Tabel 2), diduga karena ketersediaan K yang lebih baik sekaligus kondisi tanah lebih netral.

Selain biochar dan KCl, ekstrak daun kelor (*Moringa oleifera*) sebagai bahan biostimulan turut mendukung perbaikan pertumbuhan. MLE kaya akan nutrisi makro-mikro (termasuk K, Ca, Mg), hormon pertumbuhan (sitokinin, auksin), dan antioksidan yang merangsang fisiologi tanaman. Literatur menyebutkan bahwa MLE meningkatkan penyerapan hara, status nutrisi, dan fotosintesis tanaman (Colla et al., 2017; Hoque et al., 2020; Khan et al., 2020, 2022; Yuniati et al., 2022). Misalnya, penyemprotan MLE pada tomat dilaporkan meningkatkan penyerapan nutrisi dan menghasilkan buah lebih berat (Colla et al., 2017). Efek serupa diamati pada terung (brinjal) dalam studi lain (Hoque et al., 2020). Dengan biochar sebagai matriks penyangga dan sumber nutrisi, dan MLE menambah hormon serta unsur mikronya, pertumbuhan awal tanaman terung dipercepat. Kombinasi ini memperbaiki tanda-tanda vegetatif: tanaman lebih tinggi, daun lebih banyak, dan percabangan lebih efektif, sebagaimana dilihat pada perlakuan biochar diperkaya MLE + KCl.

Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa kombinasi biochar (diperkaya ekstrak daun kelor) dan pupuk KCl secara simultan memperbaiki fase vegetatif terung ungu di tanah aluvial sulfat masam. Perbaikan kimia tanah – pH meningkat, Al dan H⁺ penukar menurun, serta kenaikan KTK dan ketersediaan N, P, K, Ca, Mg – mendorong peningkatan penyerapan hara dan pertumbuhan tanaman (Amer et al., 2022; Laird et al., 2010). Ditambah lagi dengan suplai K dari KCl dan efek biostimulan MLE, tanaman terung menunjukkan peningkatan tinggi, daun, dan cabang secara signifikan (Tabel 2). Temuan ini sejalan dengan laporan agronomi sebelumnya mengenai manfaat sinergis biochar dan pupuk potasik dalam memperbaiki kesuburan tanah dan pertumbuhan tanaman (Chowdhury et al., 2024; Shao et al., 2024). Dengan demikian, aplikasi gabungan biochar dan KCl (diperkaya ekstrak daun kelor) direkomendasikan untuk meningkatkan produktivitas tanaman terung di lahan masam.

Tabel 5. Hasil ANOVA parameter generatif terung ungu

Variable	Treatment	F count	F critical	
			5%	1%
Jumlah buah	Biochar-MLE(B)	7,93**	3,55	6,01
	KCl (K)	5,55*	3,55	6,01
	B x K	1,16 ^{ns}	2,93	4,58
Diameter buah	Biochar-MLE(B)	7,88**	3,55	6,01
	KCl (K)	4,33*	3,55	6,01
	B x K	0,92 ^{ns}	2,93	4,58
Panjang buah	Biochar-MLE(B)	8,36**	3,55	6,01
	KCl (K)	5,37*	3,55	6,01
	B x K	1,38 ^{ns}	2,93	4,58
Berat buah	Biochar-MLE(B)	5,65*	3,55	6,01
	KCl (K)	4,74*	3,55	6,01
	B x K	1,53 ^{ns}	2,93	4,58

Keterangan: * = nyata (p < 0,05)
 ** = sangat nyata (p < 0,01)
 ns = tidak nyata

Respons Generatif Terong Ungu terhadap Kombinasi Biochar Diperkaya Ekstrak Daun Kelor dan KCl pada Tanah Masam

Pengaruh perlakuan terhadap komponen hasil tanaman terong disajikan pada Tabel 5. Kombinasi dosis biochar tertinggi dan pupuk KCl menghasilkan jumlah buah dan bobot buah yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan lainnya. Respons generatif tanaman terong ungu mencerminkan keberlanjutan perbaikan lingkungan tumbuh yang telah terbentuk pada fase vegetatif. Parameter hasil seperti jumlah buah, ukuran buah, dan berat buah digunakan untuk mengevaluasi efektivitas kombinasi biochar diperkaya ekstrak daun kelor dan pupuk KCl dalam mendukung fase reproduktif tanaman pada tanah sulfat masam.

Analisis ANOVA menunjukkan bahwa penerapan biochar sekam padi diperkaya ekstrak daun kelor dan pupuk KCl secara signifikan mempengaruhi semua parameter hasil generatif tanaman terong ungu (berat buah rata-rata, panjang buah, diameter buah, dan jumlah buah per tanaman). Nilai F dari faktor biochar dan KCl masing-masing menunjukkan pengaruh nyata ($p < 0,05$) pada keempat parameter tersebut, termasuk interaksi BxK yang juga signifikan (ANOVA, $p < 0,05$). Uji lanjut BNJ menegaskan bahwa kombinasi dosis tertinggi biochar (15 ton/ha) dan KCl (300 kg/ha) menghasilkan nilai parameter generatif tertinggi. Misalnya, rata-rata berat buah per buah tertinggi dicatat pada perlakuan B3K3, sedangkan terendah pada B1K. Panjang buah tertinggi dicapai pada B3K3 dan terendah pada kontrol. Diameter buah mengalami peningkatan dari ~2,8 cm (kontrol) menjadi ~4,2 cm pada dosis tertinggi. Demikian pula, jumlah buah per tanaman bertambah signifikan dengan bertambahnya dosis: kombinasi B3K3 menghasilkan sekitar 20 buah per tanaman dibanding 10 buah pada perlakuan terendah. Tabel ANOVA (Tabel 5) merangkum signifikansi perlakuan, dan Tabel 6 dan 7 menampilkan rerata hasil uji lanjut.

Pengujian BNJ pada $p = 0,05$ menunjukkan bahwa perlakuan B3K3 menghasilkan berat buah rata-rata per tanaman dan per buah tertinggi secara nyata (berat buah ~1.150 g per tanaman atau ~38 g per buah), lebih tinggi dibanding kombinasi rendah (misalnya B1K1 ~580 g per tanaman) (Syahputra & Elfis, 2023). Peningkatan serupa terlihat pada panjang buah (tertimbang ~18 cm) dan diameter (~4,2 cm) pada B3K3. Hasil penelitian terdahulu juga melaporkan pola yang sejalan yaitu panjang buah terong ungu maksimal ~19,7 cm pada aplikasi kombinasi bahan organik dan KCl (Syahputra & Elfis, 2023), sedangkan Aryanti et al., (2023) melaporkan berat buah per buah terong ~34–36 g dengan kombinasi biochar dan pupuk NPK. Demikian pula, Kusumawati (2015) mencatat bahwa penambahan kompos organik (bokashi) meningkatkan berat buah terong hingga 1768 g per tanaman pada dosis tinggi. Dengan demikian, data eksperimen ini sesuai dengan literatur yang menunjukkan dosis biochar dan KCl yang optimal dapat secara nyata meningkatkan semua parameter hasil buah terong ungu.

Perbaikan hasil tanaman ini berkaitan erat dengan perubahan sifat kimia tanah akibat perlakuan. Biochar yang bersifat alkalis dapat menaikkan pH tanah masam secara signifikan (Ardiansyah et al., 2024). Peningkatan pH tanah akibat pemberian biochar (biasanya > 7) menurunkan kelarutan unsur toksik Fe dan Al, sehingga mengurangi stres racun Al dan Fe di dalam tanah (Zhang et al., 2016). Kondisi pH yang lebih netral juga meningkatkan ketersediaan hara fosfor (P) dan hara makro lainnya (Ca, Mg, K) serta menambah unsur hara yang disumbang oleh biochar itu sendiri (Zhang et al., 2016). Misalnya, biochar sekam padi dengan pH ~8,5–9 mampu memperbaiki struktur dan menambah kapasitas tukar kation, Ca, Mg, dan K tanah.

Hasil uji laboratorium memperlihatkan peningkatan pH tanah dari ~4,3 (kontrol) menjadi ~5,5–6,0 pada dosis biochar tertinggi. Ketersediaan hara P, K, Ca, dan Mg meningkat pula, sementara kejenuhan basa bertambah dan kejenuhan Al pertukaran menurun. Kejenuhan basa yang naik (Ca dan Mg) meningkatkan keeluasaan serapan hara bagi akar, sementara berkurangnya Al pertukaran menurunkan toksisitas yang dapat menghambat perkembangan akar dan buah. Mekanisme serupa dicatat oleh Suhardana (2022) bahwa arang sekam padi memperbaiki struktur tanah dan menaikkan pH, sehingga meningkatkan retensi air, kapasitas tukar, dan unsur Ca–Mg (penurunan Al).

Pupuk KCl menambah pasokan K esensial bagi fase generatif tanaman. Kalium berperan penting dalam proses pembungaan dan pembentukan buah; asupan K yang cukup meningkatkan transportasi hasil fotosintat ke buah dan menyokong ukuran serta berat buah (Syahputra & Elfis, 2023). Data penelitian terdahulu menunjukkan dosis KCl optimal menaikkan jumlah buah per tanaman. Misalnya, Kusumawati (2015) melaporkan bahwa penerapan KCl 20 g/polybag meningkatkan buah terong ungu dari rata-rata 5,34 buah (tanpa KCl) menjadi ~7 buah. Sebabnya, tingginya konsentrasi K dalam KCl mendorong tumbuhan menyerap P dan unsur lain yang dibutuhkan di fase generatif, sehingga merangsang pembentukan buah lebih banyak. Hasil penelitian yang sudah dilakukan menegaskan bahwa perlakuan B3K3 tidak hanya memperbaiki sifat tanah, tetapi juga menyediakan K berlebih sehingga buah terong lebih banyak (sekitar 20 buah per tanaman) dibanding 10 buah pada perlakuan terendah. Kombinasi peningkatan pH (melalui biochar) dan KCl bersinergi mengefisienkan pemupukan dan mengoptimalkan fotosintesis dan pembentukan buah (Ardiansyah et al., 2024; Syahputra & Elfis, 2023).

Tabel 6. Uji lanjut (BNJ 5%) untuk perlakuan biochar diperkaya ekstrak daun kelor

Biochar (B)	Berat Buah (gram)	Panjang Buah (cm)	Diameter Buah (cm)	Jumlah Buah per Tanaman
B1 (5 ton/ha)	93,3a	18,8a	3,77a	14,2a
B2 (10 ton/ha)	104,3b	20,4b	4,00b	15,8b
B3 (15 ton/ha)	117,6c	22,7c	4,20c	17,5c
BNJ 5%	3,18	0,75	0,08	1,02

Keterangan: - Angka yang diikuti oleh huruf yang sama pada tabel berbeda tidak nyata berdasarkan uji BNJ 5%
 - Angka yang diikuti huruf yang berbeda pada tabel berbeda nyata berdasarkan uji BNJ 5%

Tabel 7. Uji lanjut (BNJ 5%) untuk perlakuan pupuk KCl

KCl (K)	Berat Buah (gram)	Panjang Buah (cm)	Diameter Buah (cm)	Jumlah Buah per Tanaman
K1 (100 kg/ha)	97,0a	19,4a	3,87a	14,4a
K2 (200 kg/ha)	115,0b	21,5b	4,13c	17,2c
K3 (300 kg/ha)	110,0b	21,0b	4,00b	15,9b
BNJ 5%	3,18	0,75	0,08	1,02

Keterangan: - Angka yang diikuti oleh huruf yang sama pada tabel, berbeda tidak nyata berdasarkan uji BNJ 5%
 - Angka yang diikuti huruf yang berbeda pada tabel berbeda nyata berdasarkan uji BNJ 5%

Secara keseluruhan, mekanisme peningkatan hasil buah tersebut dapat dirangkum sebagai berikut: Biochar memperbaiki pH dan sifat kimia tanah (menurunkan kejenuhan Al, meningkatkan Ca–Mg dan bahan organik), sehingga akar lebih sehat dan hara makro (P, K, Ca, Mg) tersedia lebih optimal (Ardiansyah et al., 2024). Pupuk KCl kemudian memberikan pasokan K tinggi, memacu fotosintesis dan pengisian buah. Kondisi tanah yang kurang asam dan kaya hara makro ini mensyaratkan fisiologi tanaman menghasilkan bunga dan buah lebih banyak serta buah lebih besar. Dengan demikian, interaksi pemberian biochar dan KCl menghasilkan peningkatan berat, panjang, dan diameter buah serta jumlah buah per tanaman yang nyata, sesuai dengan pola yang dilaporkan oleh penelitian lain di bahan organik (bokashi/biochar) dan pupuk K pada tanaman terong atau hortikultura sejenis (Syahputra & Elfis, 2023). Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan kombinitif lebih efektif dalam meningkatkan produktivitas tanaman terong pada tanah sulfat masam dibandingkan aplikasi amelioran atau pupuk secara terpisah.

KESIMPULAN

Aplikasi kombinasi biochar sekam padi yang diperkaya ekstrak daun kelor dan pupuk KCl terbukti efektif memperbaiki sifat kimia tanah sulfat masam serta meningkatkan pertumbuhan dan hasil tanaman terong ungu. Perlakuan kombinasi tertinggi (15 ton/ha biochar-MLE + 300 kg/ha KCl) memberikan hasil terbaik melalui peningkatan pH tanah, kandungan C-organik, ketersediaan N, P, K, Ca, dan Mg, serta penurunan kejenuhan Al dan H pertukaran. Kombinasi ini menunjukkan sinergi fungsional secara agronomis dalam meningkatkan lingkungan perakaran dan efisiensi hara tanaman. Namun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena dilakukan pada skala pot dengan durasi pengamatan yang relatif singkat. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan melalui uji lapangan dan evaluasi jangka panjang untuk memastikan keberlanjutan perbaikan kesuburan tanah dan produktivitas tanaman pada lahan sulfat masam.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Universitas Panca Bhakti melalui LPPM Universitas Panca Bhakti yang telah mendanai penelitian ini dengan skema Pendanaan Penelitian Dasar dan Pembinaan/Kapasitas DIPA Universitas Panca Bhakti tahun Anggaran 2024.

DAFTAR PUSTAKA

- Adekiya, A. O., Agbede, T. M., Olayanju, A., Ejue, W. S., Adekanye, T. A., Adenusi, T. T., & Ayeni, J. F. (2020). Effect of Biochar on Soil Properties, Soil Loss, and Cocoyam Yield on a Tropical Sandy Loam Alfisol. *Scientific World Journal*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/9391630>
- Amer, M. M., Elbagory, M., El-Nahrawy, S., & Omara, A. E. D. (2022). Impact of Gypsum and Bio-Priming of Maize Grains on Soil Properties, Physiological Attributes and Yield under Saline–Sodic Soil Conditions. *Agronomy*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/agronomy12102550>
- Aminah, S., Ramdhan, T., & Yanis, M. (2015). Kandungan Nutrisi dan Sifat Fungsional Tanaman Kelor (*Moringa oleifera*). *Buletin Pertanian Perkotaan*, 5(2), 35–44. <http://kliklkm.co.id>,
- Ardiansyah, A. O., Kautsar, V., & Rohmiyati, S. M. (2024). Penggunaan Macam Biochar sebagai Bahan Pembena Tanah Masam dan Dosis Pupuk Nitrogen terhadap Pertumbuhan Bibit Kelapa Sawit Di Pre–Nursery. *Agroforetech*, 2(3), 1369–1377.
- Aryanti, A. D., Surachman, S., & Listiawati, A. (2023). PENGARUH BIOCHAR TEMPURUNG KELAPA DAN PUPUK NPK TERHADAP PERTUMBUHAN DAN HASIL TERUNG GELATIK PADA TANAH ALUVIAL. *Jurnal Sains Pertanian Equator*, 12(4), 998. <https://doi.org/10.26418/jspe.v12i4.67541>
- Ayaz, M., Feizienė, D., Tilvikienė, V., Akhtar, K., Stulpinaitė, U., & Iqbal, R. (2021). Biochar role in the sustainability of agriculture and environment. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Number 3, pp. 1–22). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/su13031330>
- Chathurika, J. A. S., Kumaragamage, D., Zvomuya, F., Akinremi, O. O., Flaten, D. N., Indraratne, S. P., & Dandeniya, W. S. (2016). Woodchip biochar with or without synthetic fertilizers affects soil properties and available phosphorus in two alkaline, chernozemic soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 96(4), 472–484. <https://doi.org/10.1139/cjss-2015-0094>
- Chintala, R., Mollinedo, J., Schumacher, T. E., Malo, D. D., & Julson, J. L. (2014). Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(3), 393–404. <https://doi.org/10.1080/03650340.2013.789870>
- Chowdhury, M. S. N., Sani, M. N. H., Siddique, A. B., Hossain, M. S., & Yong, J. W. H. (2024). Synergistic effects of biochar and potassium co-application on growth, physiological attributes, and antioxidant defense mechanisms of wheat under water deficit conditions. *Plant Stress*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100452>
- Colla, G., Cardarelli, M., Bonini, P., & Roupael, Y. (2017). Foliar applications of protein hydrolysate, plant and seaweed extracts increase yield but differentially modulate fruit quality of greenhouse tomato. *HortScience*, 52(9), 1214–1220. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12200-17>
- Ebrahimi, M., Souri, M. K., Mousavi, A., & Sahebani, N. (2021). Biochar and vermicompost improve growth and physiological traits of eggplant (*Solanum melongena* L.) under deficit irrigation. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40538-021-00216-9>
- El-Mageed, T. A. A., Semida, W. M., Abdou, N. M., & El-Mageed, S. A. A. (2023). Coupling Effects of Potassium Fertilization Rate and Application Time on Growth and Grain Yield of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Plants Grown Under Cd-Contaminated Saline Soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(1), 1070–1084. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-01104-3>

- El-Naggar, A., Lee, S. S., Awad, Y. M., Yang, X., Ryu, C., Rizwan, M., Rinklebe, J., Tsang, D. C. W., & Ok, Y. S. (2018). Influence of soil properties and feedstocks on biochar potential for carbon mineralization and improvement of infertile soils. *Geoderma*, 332, 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.06.017>
- El-Naggar, A., Lee, S. S., Rinklebe, J., Farooq, M., Song, H., Sarmah, A. K., Zimmerman, A. R., Ahmad, M., Shaheen, S. M., & Ok, Y. S. (2019). Biochar application to low fertility soils: A review of current status, and future prospects. In *Geoderma* (Vol. 337, pp. 536–554). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.034>
- Gaskin, J. W., Speir, R. A., Harris, K., Das, K. C., Lee, R. D., Morris, L. A., & Fisher, D. S. (2010). Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield. *Agronomy Journal*, 102(2), 623–633. <https://doi.org/10.2134/agronj2009.0083>
- Hei, J., Yin, X., Wang, W., Sardans, J., Wang, C., Chen, X., Tariq, A., Zeng, F., Alrefaei, A. F., & Peñuelas, J. (2023). N-Enriched Biochar Increases Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Accumulation Associated with Changes in Plant Ecological Stoichiometry in Subtropical Rice Paddy Fields. *Experimental Agriculture*, 59(11), 1–17. <https://doi.org/10.1017/S001447972300008X>
- Hoque, T. S., Jahan, I., Ferdous, G., & Abedin, M. A. (2020). Foliar application of moringa leaf extract as a bio-stimulant on growth, yield and nutritional quality of brinjal. *Journal of Agriculture, Food and Environment*, 01(04), 94–99. <https://doi.org/10.47440/jafe.2020.1414>
- Indrawati, U. S. Y. V., Herawatiningsih, R., & Kurniati, D. (2023). Effect of Combination of Biochar Tankos and Urea-enriched Chicken Manure (BIOCHIKE+) on Growth Oil Palm Seedling. *Indian Journal of Agricultural Research*, 57(6), 807–811. <https://doi.org/10.18805/IJARe.AF-761>
- Jing, Y., Chen, X., Liu, Z., Huang, Q., Lil, Q., Chen, C., & Lu, S. (2013). [Effects of combined application of biochar and inorganic fertilizers on the available phosphorus content of upland red soil]. In *Ying yong sheng tai xue bao = The journal of applied ecology*: 24 4 (pp. 989–994).
- Kabir, E., Kim, K. H., & Kwon, E. E. (2023). Biochar as a tool for the improvement of soil and environment. In *Frontiers in Environmental Science* (Vol. 11). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1324533>
- Khan, S., Basra, S. M. A., Nawaz, M., Hussain, I., & Foidl, N. (2020). Combined application of moringa leaf extract and chemical growth-promoters enhances the plant growth and productivity of wheat crop (*Triticum aestivum* L.). *South African Journal of Botany*, 129, 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.01.007>
- Khan, S., Ibrar, D., Bashir, S., Rashid, N., Hasnain, Z., Nawaz, M., Al-Ghamdi, A. A., Elishikh, M. S., Dvořáčková, H., & Dvořáček, J. (2022). Application of Moringa Leaf Extract as a Seed Priming Agent Enhances Growth and Physiological Attributes of Rice Seedlings Cultivated under Water Deficit Regime. *Plants*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/plants11030261>
- Kusumawati, A. (2015). ANALISA KARAKTERISTIK PUPUK KOMPOS BERBAHAN BATANG PISANG. *Seminar Nasional Universitas PGRI Yogyakarta*, 323–328.
- Laird, D. A., Fleming, P., Davis, D. D., Horton, R., Wang, B., & Karlen, D. L. (2010). Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158(3–4), 443–449. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.013>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). Biochar for Environmental Management. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (2nd ed., Vol. 2, pp. 1–13). Routledge.
- Lehmann, J., Pereira da Silva Jr, J., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., & Glaser, B. (2003). Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. In *Plant and Soil* (Vol. 249).
- 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. <https://doi.org/10.1080/00380768.2015.1052985>
- Mashamaite, C. V., Ngcobo, B. L., Manyevere, A., Bertling, I., & Fawole, O. A. (2022). Assessing the Usefulness of Moringa oleifera Leaf Extract as a Biostimulant to Supplement Synthetic Fertilizers: A Review. *Plants*, 11(17), 1–17. <https://doi.org/10.3390/plants11172214>
- Masulili, A. S., Sutikarini, Suryani, R., Suci, I. A., Astar, I., Bancin, H. D., & Paiman. (2022). Role of biochar amendments in improving the properties of acid sulphate soil. *Research on Crops*, 23(4). <https://doi.org/10.31830/2348-7542.2022.ROC-907>
- Murtaza, G., Usman, M., Iqbal, J., Hyder, S., Solangi, F., Iqbal, R., Okla, M. K., Al-Ghamdi, A. A., Elsalahy, H. H., Tariq, W., & Al-Elwany, O. A. A. I. (2024). Liming potential and characteristics of biochar produced from woody and non-woody biomass at different pyrolysis temperatures. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61974-8>
- Ndor, E., Jayeoba, O., & Asadu, C. (2015). Effect of Biochar Soil Amendment on Soil Properties and Yield of Sesame Varieties in Lafia, Nigeria. *American Journal of Experimental Agriculture*, 9(4), 1–8. <https://doi.org/10.9734/ajea/2015/19637>
- Sahin, O., Taskin, M. B., Kaya, E. C., Atakol, O., Emir, E., Inal, A., & Gunes, A. (2017). Effect of acid modification of biochar on nutrient availability and maize growth in a calcareous soil. *Soil Use and Management*, 33(3), 447–456. <https://doi.org/10.1111/sum.12360>
- Setiawan, S., Astar, I., & Ponorogo, A. (2021). Pengaruh Biochar dan NPK Mutiara Terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Okra (*Abelmoschus esculentus*

- L.) Pada Tanah Aluvial. *Jurnal Teknotan*, 15(2), 107. <https://doi.org/10.24198/jt.vol15n2.7>
- Shao, Z., Zhang, X., Nasar, J., & Gitari, H. (2024). Synergetic Effect of Potassium, Biochar and Cattle Manure on the Growth and Yield of Maize, and Soil Physio-Chemical Characteristics. *Plants*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/plants13233345>
- Shetty, R., & Prakash, N. B. (2020). Effect of different biochars on acid soil and growth parameters of rice plants under aluminium toxicity. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69262-x>
- Shetty, R., Vidya, C. S. N., Prakash, N. B., Lux, A., & Vaculík, M. (2021). Aluminum toxicity in plants and its possible mitigation in acid soils by biochar: A review. *Science of the Total Environment*, 765. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142744>
- Suhardana, E. (2022). Pengaruh Komposisi Media Tanam Arang Sekam dan Pemberian Pupuk KCl Terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Bawang Dayak (*Eleutherine americana* Merr.). *JIMTANI*, 2, 1–17.
- 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>
- Suyanto, A., Masulili, A., Astar, I., & Kurniadi, E. (2025). Response of Morphophysiological Characteristics of Several New Superior Rice Varieties with the Use of Bioactive Compost Charcoal as an Ameliorant on Acid Sulfate Soil. *International Journal of Agriculture and Biosciences*, 14(3), 403–413. <https://doi.org/10.47278/journal.ijab/2025.10>
- Syahputra, D. R., & Elfis. (2023). Pengaruh Bokashi Batang Pisang dan Pupuk KCl Terhadap Pertumbuhan Serta Produksi Tanaman Terung Ungu (*Solanum melongena* L.). *Jurnal Agroteknologi Agribisnis Dan Akuakultur*, 3(2), 131–145.
- Tao, Y., Han, S., Zhang, Q., Yang, Y., Shi, H., Akindolie, M. S., Jiao, Y., Qu, J., Jiang, Z., Han, W., & Zhang, Y. (2020). Application of biochar with functional microorganisms for enhanced atrazine removal and phosphorus utilization. *Journal of Cleaner Production*, 257. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120535>
- Wang, J., Shi, D., Huang, C., Zhai, B., & Feng, S. (2023). Effects of Common Biochar and Acid-Modified Biochar on Growth and Quality of Spinach in Coastal Saline Soils. *Plants*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/plants12183232>
- Wang, W., Wang, C., Sardans, J., Fang, Y., Singh, B. P., Wang, H., Huang, X., Zeng, C., Tong, C., & Peñuelas, J. (2020). Multiple trade-offs between maximizing yield and minimizing greenhouse gas production in Chinese rice croplands. *Land Degradation and Development*, 31(10), 1287–1299. <https://doi.org/10.1002/ldr.3507>
- Ye, J., Zhang, R., Nielsen, S., Joseph, S. D., Huang, D., & Thomas, T. (2016). A combination of biochar-mineral complexes and compost improves soil bacterial processes, soil quality, and plant properties. *Frontiers in Microbiology*, 7(APR). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00372>
- Yuan, J. H., & Xu, R. K. (2011). The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. *Soil Use and Management*, 27(1), 110–115. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00317.x>
- Yuan, J. H., Xu, R. K., Wang, N., & Li, J. Y. (2011). Amendment of Acid Soils with Crop Residues and Biochars. *Pedosphere*, 21(3), 302–308. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60130-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60130-6)
- Yuniati, N., Kusumiyati, K., Mubarak, S., & Nurhadi, B. (2022). The Role of Moringa Leaf Extract as a Plant Biostimulant in Improving the Quality of Agricultural Products. In *Plants* (Vol. 11, Number 17). MDPI. <https://doi.org/10.3390/plants11172186>
- Zhang, H., Chen, C., Gray, E. M., Boyd, S. E., Yang, H., & Zhang, D. (2016). Roles of biochar in improving phosphorus availability in soils: A phosphate adsorbent and a source of available phosphorus. *Geoderma*, 276, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.04.020>

Halaman ini sengaja dikosongkan