

Peran Biochar-silika dan Pupuk Anorganik Tunggal dalam Meningkatkan Ketersediaan Fosfor dan Hasil Padi Sawah

Fadlan Atalla Muhammad¹⁾, Rival²⁾, Ania Citraresmini³⁾,
Emma Trinurani Sofyan³⁾, Benny Joy³⁾

¹⁾ Mahasiswa Magister Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran

²⁾ Mahasiswa Sarjana Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran

³⁾ Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran
Jln. Ir. Soekarno km. 21 Jatinangor, Kab. Sumedang 45363 Jawa Barat

Korespondensi : fadlan20003@mail.unpad.ac.id;

ABSTRACT

Rice productivity in Inceptisols is often constrained by high phosphate fixation and low nutrient efficiency, despite high total nutrient reserves. This study aimed to evaluate the effectiveness of silica-enriched biochar in improving soil chemical properties and maintaining rice yield under reduced N, P, K fertilization. A field experiment was arranged in a Randomized Block Design with two factors: silica-enriched biochar (0, 1.25, and 2.5 t ha⁻¹) and N, P, K fertilizer dosages (0, 50%, and 100% of the recommended dose). Observed parameters included Cation Exchange Capacity (CEC), available phosphorus, total soil silica, and yield components. The results showed a significant interaction between treatments on soil chemical properties, particularly CEC and pH. Application of 2.5 t ha⁻¹ silica-enriched biochar independently increased available phosphorus by 24.3% and total soil silica by 5.9% compared to the control, likely due to phosphate desorption mechanisms. Agronomically, while N, P, K fertilizer was the dominant factor for yield, the combination of 2.5 t ha⁻¹ silica-enriched biochar with 50% N, P, K dosage produced Milled Dry Grain (MDG) yields that were statistically comparable to the 100% N, P, K treatment. This indicated that silica-enriched biochar can substitute up to 50% of inorganic fertilizer requirements without compromised yield.

Keywords: Biochar amendment; Inceptisols; Nutrient efficiency; Phosphorus availability; Rice yield

1. PENDAHULUAN

Keberlanjutan produksi padi merupakan tantangan utama dalam sistem pertanian tropis, khususnya di negara dengan ketergantungan tinggi terhadap beras sebagai pangan pokok seperti Indonesia. Berbagai kajian menunjukkan bahwa strategi peningkatan produksi yang hanya bertumpu pada intensifikasi input anorganik (pupuk kimia) berpotensi menurunkan efisiensi penggunaan hara serta mempercepat degradasi kualitas tanah, sehingga tidak menjamin stabilitas produksi jangka panjang (Lehmann *et al.*, 2021; Susanti *et al.*, 2024). Strategi peningkatan produktivitas perlu diarahkan kembali pada pendekatan pengelolaan tanah dan hara yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Inceptisols memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai lahan sawah produktif. Namun, pemanfaatannya sering dibatasi oleh dinamika kimia tanah yang kompleks, dan ting-

kat kesuburan yang rendah. Pada penggunaan tanah untuk sawah, fluktuasi muka air berpengaruh kepada fiksasi fosfor (P) menjadi bentuk Fe-P yang stabil dan sukar larut saat tanah mengering atau berada di zona oksidatif akar (Schaller *et al.*, 2022). Fenomena fiksasi P ini menjadi hambatan krusial di sawah tropis, menyebabkan efisiensi pemupukan P menjadi sangat rendah karena sebagian besar pupuk yang diaplikasikan segera terjerat oleh mineral tanah dan tidak tersedia bagi tanaman (Li *et al.*, 2024; Nambafu *et al.*, 2025). Akibatnya, akumulasi P total dalam tanah sering kali tinggi, namun status P-tersedia tetap rendah (Gao *et al.*, 2025). Pendekatan teknologi pembenah tanah (amelioran) diperlukan untuk memobilisasi cadangan P tersebut.

Silika (SiO₂) dilaporkan mampu meningkatkan ketersediaan fosfor melalui mekanisme kompetisi anion, di mana ion silikat mendesak ion fosfat pada situs jerapan mineral Fe/Al,

sehingga mendorong desorpsi fosfat ke dalam larutan tanah (Gao *et al.*, 2025). Di sisi lain, biochar sekam padi menawarkan fungsi sebagai matriks karbon stabil yang meningkatkan kapasitas tukar kation dan retensi hara jangka panjang (Lehmann *et al.*, 2021; Su *et al.*, 2024). Penggabungan keduanya dalam bentuk biochar diperkaya silika diprediksi memberikan efek sinergis di mana biochar menyediakan struktur fisik untuk retensi hara, sementara silika aktif mencegah fiksasi P secara kimiawi.

Beberapa hasil penelitian menyatakan bahwa kombinasi biochar-silika mampu meningkatkan status hara tanah pada Inceptisols (Sofyan *et al.*, 2025; Citraresmini *et al.*, 2025a). Namun, studi tersebut masih terbatas pada skala percobaan pot atau rumah kaca (*greenhouse*) dengan kondisi lingkungan yang homogen dan terkendali. Respons agronomi terkait kondisi lahan seperti pada lahan sawah bukaan baru (*newly established paddy field*), yang seringkali memiliki ketidakstabilan sifat kimia dan tingkat fiksasi hara yang lebih ekstrem dibandingkan sawah yang sudah matang.

Pembuktian empiris diperlukan untuk mengetahui pengaruh aplikasi biochar yang diperkaya silika dalam mengatasi kendala kesuburan yang spesifik ekosistem sawah. Penelitian lain terkait fungsi biochar dalam mensubstitusi sebagian kebutuhan pupuk anorganik tanpa menurunkan hasil padi. Kebaruan ilmiah dari penelitian-penelitian ini terletak pada evaluasi efisiensi pemupukan secara langsung di lahan sawah bukaan baru. Hipotesis yang akan dibuktikan meliputi mekanisme desorpsi P oleh biochar-silika dapat mempertahankan produktivitas padi meskipun dosis pupuk N, P, K dikurangi hingga taraf tertentu.

2. BAHAN DAN METODE

2.1 Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan mulai bulan Januari hingga Juni 2025. Tempat penelitian merupakan area persawahan Kebun Percobaan

Ciparanje, Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran, Jatinangor, Sumedang. Analisis sifat kimia tanah dan jaringan tanaman dilakukan di Laboratorium Kesuburan Tanah dan Nutrisi Tanaman, Universitas Padjadjaran.

2.2 Bahan Penelitian

Bahan utama meliputi benih padi varietas Mapan P-05, pupuk tunggal (Urea, SP-36, KCl), dan biochar sekam padi. Biochar diproduksi melalui pirolisis pada suhu 400°C selama 120 menit, diayak ukuran 0,5–2 mm, dan diperkaya dengan bubuk silika komersil berbahan dasar zeolit (kandungan SiO₂ 65%).

2.3 Rancangan Percobaan

Percobaan ini merupakan eksperimental dengan rancangan percobaan Rancangan Acak Kelompok (RAK) pola faktorial. Faktor pertama yaitu perlakuan dosis biochar-silika. Faktor kedua adalah dosis pupuk N, P, dan K. Masing-masing kombinasi perlakuan diulang sebanyak 3 kali. Susunan perlakuan berdasarkan faktor dijelaskan sebagai berikut:

Faktor pertama (dosis biochar-silika) terdiri atas tiga taraf:

a_0 = Tanpa biochar-silika

a_1 = 1,25 t ha⁻¹ Biochar + 160 kg SiO₂ ha⁻¹

a_2 = 2,5 t ha⁻¹ Biochar + 320 kg SiO₂ ha⁻¹

Faktor kedua (dosis Pupuk N, P, dan K) terdiri atas tiga taraf:

b_0 = Tanpa pupuk N, P, K

b_1 = 100 kg urea ha⁻¹ + 50 kg SP-36 ha⁻¹ + 37,5 kg KCl ha⁻¹

b_2 = 200 kg urea ha⁻¹ + 100 kg SP-36 ha⁻¹ + 75 kg KCl ha⁻¹

2.4 Pelaksanaan Penelitian

Persiapan lahan dilakukan dengan pengolahan tanah sempurna. Biochar diperkaya silika diaplikasikan 14 hari sebelum tanam (masa inkubasi) dengan cara disebar merata pada kondisi macak-macak. Bibit padi usia 14 Hari Setelah Semai (HSS) ditanam dengan sistem pindah tanam (*transplanting*) 1 bibit

per lubang. Aplikasi pupuk anorganik dilakukan bertahap: SP-36 diberikan 100% saat tanam; KCl diberikan 50% saat tanam dan 50% pada 45 Hari Setelah Tanam (HST); Urea diberikan 30% pada 7 HST, 30% pada 30 HST, dan 40% pada 45 HST. Pengendalian air dilakukan secara *intermittent* (berselang), dan pengendalian OPT dilakukan sesuai prinsip Pengendalian Hama Terpadu (PHT). Panen dilakukan saat tanaman mencapai masak fisiologis (± 120 HST).

2.5 Pengamatan dan Analisis Data

Sampel tanah diambil secara komposit pada kedalaman 0–20 cm sebelum perlakuan (analisis pendahuluan) dan setelah panen dari tiap petak percobaan. Parameter tanah meliputi pH, C-organik, Kapasitas Tukar Kation (KTK), P-tersedia (metode Bray/Olsen menyesuaikan pH), dan Silika total (metode gravimetri).

Analisis jaringan tanaman dilakukan pada fase vegetatif maksimum untuk mengukur Serapan P (destruksi basah) dan Serapan Si (Gravimetri). Parameter hasil panen meliputi Bobot 1000 butir dan Gabah Kering Giling (GKG) yang dikonversi ke kadar air 14%. Data dianalisis menggunakan *Analysis of Variance* (ANOVA) dan uji lanjut *Duncan's Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf nyata 5% menggunakan perangkat lunak SPSS.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Analisis Tanah Awal

Tanah yang digunakan dalam penelitian ini tergolong Inceptisols dan diambil dari lapisan topsoil lahan sawah percobaan Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran Jatinangor. Hasil analisis tanah awal disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Analisis Awal Inceptisols Lahan Sawah Percobaan, Jatinangor

No.	Parameter	Unit	Hasil	Kriteria
1.	pH: H ₂ O	-	6,6	Netral
2.	pH: KCl 1 N	-	5,7	-
3.	C - Organik	(%)	3,01	Tinggi
4.	N - Total	(%)	0,3	Sedang
5.	C/N	-	10	Rendah
6.	P ₂ O ₅ HCl 25%	(mg/100g)	95	Sangat Tinggi
7.	P ₂ O ₅ (Bray)	(ppm P)	6,17	Rendah
8.	Kation Basa:			
	K-dd	(cmol.kg ⁻¹)	0,49	Sedang
	Na-dd	(cmol.kg ⁻¹)	0,09	Rendah
	Ca-dd	(cmol.kg ⁻¹)	10,81	Sedang
	Mg-dd	(cmol.kg ⁻¹)	0,93	Rendah
9.	Kapasitas Tukar Kation (KTK)	(cmol.kg ⁻¹)	31,8	Tinggi
10.	Kejenuhan Basa	(%)	38	Rendah
11.	Tekstur:			
	Pasir	(%)	3	Lempung Liat Berdebu
	Debu	(%)	65	
	Liat	(%)	32	
12.	Fe - Total	(%)	1,26	
13.	Mn	(%)	0,05	

Sumber: Analisis Kimia di Laboratorium Kimia Tanah dan Nutrisi Tanaman Jurusan Ilmu Tanah Fakultas Pertanian UNPAD (2025)

Tanah ini memiliki reaksi agak masam dengan nilai pH H₂O dan KCl masing-masing sebesar 6,6 dan 5,7, yang merupakan kondisi umum pada Inceptisols sawah dan berpenga-

ruh terhadap keseimbangan muatan tanah serta ketersediaan unsur hara, khususnya P dan kation basa (Hardjowigeno, 2015; Schaller *et al.*, 2022). Nilai pH KCl (5,7) lebih rendah

daripada H₂O, menunjukkan bahwa aktivitas kimia tanah lebih dipengaruhi oleh kondisi kation yang relatif rendah (Mulyani *et al.*, 2025). Nilai C-organik yang tergolong tinggi (3,01 %) dan kandungan N-total kategori sedang menghasilkan rasio C/N yang relatif rendah (10). Hal ini menunjukkan bahwa dekomposisi bahan organik berlangsungnya secara normal (Setiawati *et al.*, 2018).

Kandungan fosfor potensial (P₂O₅ HCl 25 %) tergolong sangat tinggi, sedangkan P-tersebut (Bray) termasuk rendah, yang menunjukkan bahwa sebagian besar fosfor berada dalam bentuk terfiksasi dan belum dapat dimanfaatkan tanaman secara optimal (Gao *et al.*, 2025). Kandungan kation basa dapat ditukar menunjukkan Ca-dd sedang, Mg-dd rendah, dan Na-dd sangat rendah. Sementara kapasitas tukar kation tergolong tinggi namun diikuti kejenuhan basa yang relatif rendah, mencerminkan dominansi kation asam pada kompleks jerapan (Susanti, 2024).

Berdasarkan analisis tekstur, tanah termasuk kelas lempung liat berpasir dengan dominasi fraksi debu dan liat, yang memiliki kemampuan menahan air dan hara cukup baik, tetapi berpotensi memperkuat dinamika redoks dan fiksasi fosfor pada kondisi sawah tergenang (Schaller *et al.*, 2022). Walaupun

kapasitas tukar kation (KTK) tergolong tinggi, kejenuhan basa yang rendah menunjukkan perlunya penambahan kation basa, khususnya Ca dan K untuk memperbaiki status kesuburan tanah (Mulyani *et al.*, 2025).

3.2 Sifat Kimia Tanah

3.2.1 Kapasitas Tukar Kation (KTK)

Berdasarkan hasil analisis ragam (Tabel 2) perlakuan berpengaruh nyata terhadap nilai KTK tanah. Analisis statistik juga memperlihatkan adanya efek interaksi antara pupuk N, P, K dan biochar-silika terhadap peningkatan KTK.

Berdasarkan hasil uji lanjut Duncan (Tabel 2) pada dosis biochar tertinggi (a₂), pemberian pupuk N, P, K dosis 100% (b₂) memberikan pengaruh nyata terhadap peningkatan kapasitas tukar kation (KTK) dibandingkan dosis 50% dan kontrol. Perbedaan ini ditunjukkan oleh notasi huruf yang berbeda, yang mengindikasikan bahwa pengurangan dosis pupuk hingga 50% pada aplikasi biochar 2,5 ton ha⁻¹ belum mampu mempertahankan KTK tanah pada tingkat optimal. Hal ini menunjukkan bahwa pada dosis biochar tersebut, suplai hara dari pupuk anorganik dosis penuh masih diperlukan untuk menjenuhkan kompleks pertukaran tanah.

Tabel 2 Pengaruh Biochar-Silika dan Pupuk N, P, K terhadap KTK

Biochar-Silika (a)	Pupuk N, P, K (b)		
	b ₀ (0% dosis)	b ₁ (50% dosis)	b ₂ (100% dosis)
a ₀ (0% dosis)	29,438 ab A	28,073 a A	28,045 a A
a ₁ (50% dosis)	28,510 a A	28,335 a A	27,787 a A
a ₂ (100% dosis)	30,891 b B	27,333 a A	31,933 b B

Keterangan: Nilai rata-rata yang diikuti huruf yang sama tidak berbeda nyata menurut Uji Lanjut Jarak Berganda Duncan pada taraf 5%. Huruf kecil dibaca ke arah vertikal dan huruf kapital ke arah horizontal.

Hasil pembacaan secara horizontal pada taraf pupuk N, P, K 100% menunjukkan bahwa aplikasi biochar 2,5 ton ha⁻¹ (a₂) menghasilkan nilai KTK yang lebih tinggi dibandingkan dosis

1,25 ton ha⁻¹ (a₁), namun tidak berbeda nyata dengan perlakuan tanpa biochar (a₀). Pola ini menunjukkan bahwa penambahan biochar dosis menengah belum efektif meningkatkan

KTK, sedangkan peningkatan kembali terjadi pada dosis yang lebih tinggi. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa respons KTK terhadap biochar tidak bersifat linier terhadap dosis, terutama pada kondisi pemupukan tinggi.

Berdasarkan data pada Tabel 2, interaksi biochar-silika dengan pupuk N, P, K berpengaruh nyata terhadap peningkatan kapasitas tukar kation (KTK) tanah, dimana dosis 100 % (b_2) menghasilkan nilai KTK tertinggi dibandingkan dosis yang lebih rendah. Peningkatan ini berkaitan dengan masuknya kation basa dan amonium dari pupuk anorganik yang meningkatkan kejenuhan basa serta aktivitas kimia tanah, dan akses biochar yang bertindak sebagai koloid organik dengan permukaan bermuatan negatif yang menyediakan situs pertukaran kation tambahan, sehingga memperbesar KTK tanah (Teng *et al.*, 2025).

Efek serupa telah dilaporkan dalam studi meta-analisis dan tinjauan ilmiah modern yang menunjukkan bahwa aplikasi biochar secara signifikan meningkatkan KTK tanah melalui mekanisme penambahan gugus fungsional permukaan, peningkatan pH, dan akumulasi kation pertukaran di zona perakaran, terutama ketika diaplikasikan bersama dengan pupuk mineral (Ran *et al.*, 2023). Sebaliknya, pengaruh mandiri biochar-silika menunjukkan bahwa dosis 1,25 ton ha^{-1} (a_1) menghasilkan KTK terendah, sedangkan tanpa biochar (a_0) dan dosis 2,5 ton ha^{-1} (a_2) menunjukkan nilai KTK yang lebih tinggi dan tidak berbeda nyata.

Pola tersebut menunjukkan bahwa kontribusi biochar terhadap KTK dipengaruhi oleh keseimbangan antara jumlah gugus fungsional aktif dan luas permukaan spesifik biochar. Pada dosis yang lebih tinggi, peningkatan luas permukaan dan jumlah situs jerapan kation memungkinkan biochar berperan lebih efektif dalam menahan kation basa seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan K^+ (Glaser *et al.*, 2002; Liang *et al.*, 2015). Tidak adanya perbedaan nyata antara perlakuan b_2a_2 dan b_2a_0 diduga berkaitan dengan kandungan C-organik awal tanah yang sudah

tinggi, sehingga penambahan biochar bersifat sebagai penyangga tambahan dan bukan faktor utama peningkatan KTK tanah (Sofyan *et al.*, 2025).

3.2.2 Kadar P-tersedia

Berdasarkan hasil analisis ragam menunjukkan bahwa aplikasi biochar-silika (a) memberikan pengaruh nyata terhadap kandungan fosfor tersedia (P-tersedia) tanah, sedangkan pupuk N, P, K (b) serta interaksi antara kedua faktor tersebut tidak berpengaruh nyata. Hasil ini mengindikasikan bahwa peningkatan P-tersedia pada tanah Inceptisols terutama dipengaruhi oleh aplikasi biochar-silika secara mandiri, tanpa adanya ketergantungan pada tingkat pemupukan N, P, K.

Hasil uji lanjut Duncan (Tabel 3) menunjukkan bahwa perlakuan biochar-silika dosis 100% (a_2) menghasilkan nilai P-tersedia tertinggi dan berbeda nyata dibandingkan perlakuan kontrol (a_0), sedangkan dosis 50% (a_1) berada pada posisi antara dan berbeda nyata dengan a_2 . Pola ini menunjukkan bahwa peningkatan dosis biochar-silika secara langsung meningkatkan ketersediaan fosfor tanah, yang menegaskan peran biochar-silika sebagai amelioran yang efektif dalam memobilisasi fosfor pada Inceptisols sawah.

Tabel 3 Pengaruh Mandiri biochar-silika terhadap P-tersedia (ppm)

Perlakuan	Rata-rata
biochar-silika (a)	
a_0 (kontrol)	8,79 a
a_1 (50% dosis)	10,17 ab
a_2 (100% dosis)	10,93 b

Keterangan: Nilai rata-rata yang diikuti oleh huruf yang sama, tidak berbeda nyata menurut Uji Lanjut Duncan pada taraf nyata 0,05.

Peningkatan P-tersedia akibat aplikasi biochar-silika berkaitan dengan mekanisme kompetisi anion antara silikat dan fosfat pada permukaan oksida besi dan aluminium. Ion silikat yang dilepaskan dari biochar-silika mampu mendesak ion fosfat dari kompleks

jerapan Fe-P dan Al-P, sehingga fosfor dilepaskan ke dalam larutan tanah dan menjadi lebih tersedia bagi tanaman (Schaller *et al.*, 2022; Gao *et al.*, 2025). Mekanisme ini sangat relevan pada Inceptisols sawah yang umumnya memiliki kandungan fosfor total tinggi namun didominasi oleh fraksi terfiksasi.

Permukaan biochar yang kaya gugus fungsional dan bermuatan negatif berperan dalam menurunkan aktivitas ion Fe^{2+} dan Al^{3+} di dalam tanah, sehingga menekan proses fiksasi ulang fosfor. Biochar juga berfungsi sebagai penyangga kimia tanah yang meningkatkan stabilitas P-tersedia melalui adsorpsi lemah dan pelepasan bertahap fosfor ke larutan tanah (Lehmann *et al.*, 2021; Citraresmini *et al.*, 2025). Tidak signifikannya pengaruh pupuk N, P, K terhadap P-tersedia menunjukkan bahwa penambahan pupuk fosfat tidak secara langsung meningkatkan P-tersedia, karena sebagian besar fosfor dari pupuk berpotensi kembali terfiksasi pada kondisi tanah sawah.

Peningkatan P-tersedia akibat aplikasi biochar-silika, khususnya pada dosis 100%, berimplikasi positif terhadap efisiensi pemanfaatan fosfor oleh tanaman padi. Kondisi ini memungkinkan pengurangan ketergantungan terhadap pupuk fosfat anorganik, sekaligus meningkatkan keberlanjutan pengelolaan hara pada lahan sawah Inceptisols yang kaya fosfor potensial namun miskin fosfor tersedia (Veneklaas *et al.*, 2012; Susanti, 2024).

3.2.3. Silika Total

Berdasarkan hasil analisis ragam menunjukkan bahwa aplikasi biochar-silika (a) dan pupuk N, P, K (b) masing-masing memberikan pengaruh nyata terhadap kandungan silika total tanah, sedangkan interaksi kedua faktor tersebut tidak berpengaruh nyata. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan silika total tanah akibat perlakuan biochar-silika dan pupuk N, P, K berlangsung secara mandiri. Aplikasi bahan kaya silika secara langsung meningkatkan pool silika tanah, sementara

pemupukan makro memengaruhi dinamika silika tanah secara tidak langsung melalui perubahan proses kimia tanah dan pertumbuhan tanaman (Matichenkov & Bocharnikova, 2001; Haynes, 2014).

Hasil uji lanjut Duncan (Tabel 4) menunjukkan bahwa perlakuan biochar-silika dosis 100 % (a_2) secara konsisten menghasilkan kandungan silika total tanah yang lebih tinggi dibandingkan tanpa biochar-silika (a_0) dan dosis 50% (a_1) pada seluruh taraf pupuk N, P, K. Kondisi ini menunjukkan bahwa biochar-silika berperan dominan sebagai sumber tambahan silika tanah. Pada perlakuan tanpa biochar-silika, kandungan silika total tanah mencerminkan kontribusi silika asli tanah dan pelapukan mineral silikat, sedangkan peningkatan pada perlakuan a_2 menunjukkan adanya suplai silika dari bahan amelioran (Haynes, 2014; Wang *et al.*, 2018).

Tabel 4 Pengaruh mandiri Biochar-Silika dan Pupuk N, P, K terhadap Silika Total

Perlakuan	Rata-rata Si-total (ppm)
biochar-silika (a)	
a_0 (kontrol)	35.7 a
a_1 (50% dosis)	36.7 a
a_2 (100% dosis)	37.8 b
pupuk n, p, k (b)	
b_0 (kontrol)	37.4 b
b_1 (50% dosis)	34.5 a
b_2 (100% dosis)	38.3 b

Keterangan: Nilai rata-rata yang diikuti oleh huruf yang sama, tidak berbeda nyata menurut Uji Lanjut Duncan pada taraf nyata 0,05.

Nilai silika total tertinggi diperoleh pada kombinasi perlakuan a_2b_2 , yang mencerminkan efek aditif antara penambahan silika dari biochar-silika dan intensitas pengelolaan hara melalui pupuk N, P, K. Sebaliknya, nilai terendah dijumpai pada perlakuan a_1b_0 , yang menunjukkan bahwa dosis biochar-silika yang lebih rendah belum mampu meningkatkan silika total tanah secara optimal tanpa dukungan pengelolaan hara yang memadai (Syers *et al.*, 2008; Subiksa, 2018).

Tidak signifikannya interaksi antara biochar-silika dan pupuk N, P, K mengindikasikan bahwa kedua faktor bekerja melalui mekanisme yang bersifat aditif. Biochar-silika berfungsi sebagai sumber langsung silika melalui akumulasi dan pelepasan fraksi SiO_2 , sedangkan pupuk N, P, K memengaruhi silika total tanah secara tidak langsung melalui peningkatan pertumbuhan tanaman dan percepatan pelapukan mineral silikat. Hal ini dikarenakan mekanisme kerja tersebut tidak saling memodifikasi, peningkatan silika total tanah akibat aplikasi biochar-silika tetap terjadi pada seluruh taraf pemupukan tanpa menghasilkan interaksi yang signifikan (Syers *et al.*, 2008).

Secara agronomis, peningkatan silika total tanah akibat aplikasi biochar-silika, khususnya pada dosis tinggi, berpotensi meningkatkan ketersediaan silika bagi tanaman padi. Kondisi ini mendukung peran silika dalam memperkuat jaringan tanaman, meningkatkan toleransi terhadap cekaman biotik dan abiotik, serta meningkatkan efisiensi pemanfaatan unsur hara lain seperti nitrogen dan fosfor (Ma & Yamaji, 2015; Subiksa, 2023).

3.3 Analisis Hasil Padi

3.3.1 Gabah Kering Panen

Interaksi antara penambahan biochar-silika dan pemupukan N, P, K menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap hasil gabah kering panen. Temuan ini memperkuat laporan Citraresmini *et al.*, (2015), yang menunjukkan

adanya peranan biochar-silika dalam peningkatan gabah kering padi. Hasil analisis keragaman menunjukkan bahwa respons GKP dipengaruhi secara signifikan oleh interaksi antara masukan organik dan anorganik, yang menegaskan bahwa optimalisasi hasil tidak ditentukan oleh satu faktor tunggal melainkan oleh sinergi keduanya.

Hasil perhitungan GKP menunjukkan bahwa perlakuan a_1b_2 (50% Biochar-Silika dan 100% N, P, K) adalah yang tertinggi sebesar $7,51 \text{ t ha}^{-1}$, diikuti oleh respons a_2b_1 (100% Biochar-Silika dan 50% N, P, K) sebesar $7,45 \text{ t ha}^{-1}$ yang berbeda nyata dengan perlakuan a_2b_2 . (dosis penuh) (Tabel 5). Peningkatan pemupukan hingga dosis penuh dalam kombinasi a_2b_2 justru menurunkan hasil menjadi $5,99 \text{ t ha}^{-1}$. Respons ini menunjukkan adanya ketidakstabilan dinamika hara, yang mungkin dimediasi oleh modifikasi pH atau gangguan pada ketersediaan unsur hara sebagai implikasi tingkat amandemen yang terlalu tinggi (Chintala *et al.*, 2014). Lebih lanjut, hasil ini memperkuat penelitian Sofyan *et al.*, (2025) yang menunjukkan bahwa peningkatan persentase hasil panen secara signifikan justru dicapai pada dosis pemupukan di bawah tingkat anjuran ketika dikombinasikan dengan pemberian bahan organik. Dengan demikian, keseimbangan antara pemberian amandemen dan pemupukan pada dosis moderat menjadi faktor kunci dalam memperoleh respons tanaman yang optimal.

Tabel 5 Pengaruh Biochar-Silika dan Pupuk N, P, K terhadap Gabah Kering Panen (t ha^{-1})

Biochar-Silika (a)	Pupuk N, P, K (b)		
	b_0 (0%)	b_1 (50%)	b_2 (100%)
a_0 (0%)	2,51 a A	3,03 a A	3,84 a B
a_1 (50%)	4,46 b A	6,04 b B	7,51 c C
a_2 (100%)	4,08 b A	7,45 c C	5,99 b B

Keterangan: Nilai rata-rata yang diikuti huruf yang sama tidak berbeda nyata menurut Uji Lanjut Jarak Berganda Duncan pada taraf 5%. Huruf kecil dibaca ke arah vertikal dan huruf kapital ke arah horizontal.

Kombinasi a_2b_1 merupakan dosis yang paling optimal dalam meningkatkan hasil padi sawah. Meskipun nilai hasilnya tidak setinggi perlakuan a_1b_2 (50% Biochar-Silika dan 100% N, P, K), kombinasi ini menunjukkan hasil terbaik dibandingkan dengan perlakuan dosis penuh pada tingkat amandemen yang sama, dan tetap menjadi yang terbaik pada taraf amandemen dengan pemupukan berbeda dari seluruh kombinasi perlakuan lainnya.

Hasil tanaman padi berupa gabah kering giling (GKG) dapat dipengaruhi oleh partumbuhan tanaman seperti tinggi tanaman dan banyaknya jumlah anakan produktif yang dapat disuplai dari unsur hara NPK. Lebih lanjut, unsur hara N, P, K dapat meningkatkan hasil tanaman padi dengan memicu terbentuknya bunga dan bulir padi (Yuniarti *et al.*, 2019). Selain itu, silika juga diduga mempengaruhi hasil tanaman padi dengan memicu terbentuknya bunga dan bulir (Klotzbücher *et al.*, 2015). Oleh sebab itu, kombinasi a_2b_1 (2,5 t biochar ha^{-1} + 320 kg SiO_2 ha^{-1} + 100 kg urea ha^{-1} + 50 kg SP-36 ha^{-1} + 37,5 kg KCl ha^{-1}) dipilih karena mampu menghasilkan produktivitas yang tinggi sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap input pupuk anorganik.

3.3.2 Gabah Kering Giling (GKG)

Berdasarkan analisis ragam (Tabel 6), terdapat interaksi nyata antara perlakuan bio-

char-Silika dan pemupukan N, P, K terhadap gabah kering giling (GKG). Sementara itu, pengaruh utama biochar-silika maupun pupuk N, P, K secara mandiri tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa respons tanaman lebih ditentukan oleh kombinasi spesifik antar perlakuan dibandingkan oleh pengaruh masing-masing faktor secara terpisah. Lebih lanjut, hasil tersebut diduga menunjukkan adanya hubungan saling melengkapi antara amelioran tanah dan pupuk N, P, dan K dalam mengoptimalkan proses fisiologis tanaman.

Hasil tertinggi diperoleh pada perlakuan a_2b_1 (100% Biochar-Silika dan 50% N, P, K) dengan nilai sebesar 6,93, yang secara statistik lebih tinggi dibandingkan kombinasi perlakuan lainnya. Sebagai pembanding, pemberian biochar-silika secara tunggal tanpa disertai pemupukan tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan, baik pada tingkat a_0 , a_1 , maupun a_2 terhadap perlakuan b_0 . Biochar diketahui berperan dalam meningkatkan stabilitas agregat tanah, kapasitas simpan air, serta efisiensi pemanfaatan hara, sehingga lingkungan perakaran menjadi lebih kondusif bagi pertumbuhan dan aktivitas metabolisme tanaman (Lehmann & Joseph, 2009). Dengan demikian, unsur hara yang diberikan melalui pemupukan anorganik dapat dimanfaatkan secara lebih efisien.

Tabel 6 Pengaruh Biochar-Silika dan Pupuk N, P, K terhadap Gabah Kering Giling ($t\ ha^{-1}$)

Biochar-Silika (a)	Pupuk N, P, K (b)		
	b_0 (0%)	b_1 (50%)	b_2 (100%)
a_0 (0%)	2,16 a A	2,61 a A	3,30 a B
a_1 (50%)	3,85 b A	5,52 b B	5,62 b B
a_2 (100%)	3,51 b A	6,93 c C	5,16 b B

Keterangan: Nilai rata-rata yang diikuti huruf yang sama tidak berbeda nyata menurut Uji Lanjut Jarak Berganda Duncan pada taraf 5%. Huruf kecil dibaca ke arah vertikal dan huruf kapital ke arah horizontal.

Peningkatan pemupukan N, P, K hingga dosis penuh (b_2) tidak memberikan hasil GKG yang signifikan dibandingkan dengan kombinasi a_2b_1 (100% Biochar-Silika dan 50% N, P, K). Hal ini menunjukkan bahwa adanya penurunan efisiensi pemupukan pada dosis yang lebih tinggi, sehingga penambahan pupuk di atas tingkat optimum tidak memberikan keuntungan agronomis yang sebanding.

Efektivitas dan efisiensi pemupukan sangat dipengaruhi oleh keseimbangan hara dan kondisi tanah, dan tidak selalu bergantung pada besarnya dosis pupuk yang diaplikasikan (Barlog *et al.*, 2022). Selain itu, keberadaan silika berperan penting dalam meningkatkan ketahanan fisiologis tanaman dan efisiensi penggunaan hara. Hal ini didukung oleh Ma & Yamaji (2015) yang menyatakan bahwa silika mampu memperbaiki aktivitas metabolisme tanaman, meningkatkan efisiensi fotosintesis, serta mendukung pembentukan jaringan tanaman yang lebih kuat dan efisien melalui mekanisme kinerja transporter LSi1 dan LSi2.

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa aplikasi biochar sekam padi diperkaya silika dan pemupukan N, P, K berpengaruh nyata terhadap sifat kimia tanah dan komponen hasil padi sawah, sesuai dengan hipotesis penelitian. Interaksi antara kedua perlakuan secara signifikan memengaruhi kapasitas tukar kation (KTK) dan komponen hasil padi. Interaksi biochar-silika dan pupuk N, P, K menghasilkan nilai KTK tertinggi pada kombinasi biochar-silika dosis 100% dan pupuk N, P, K dosis 100% (b_2p_2) sebesar 31,93 cmol kg⁻¹, meningkat sekitar 11,9% dibandingkan kontrol (b_0p_0). Aplikasi biochar-silika dosis 100% (b_2) secara mandiri meningkatkan P-tersedia tanah dari 8,79 ppm menjadi 10,93 ppm atau meningkat sekitar 24,3%, disertai peningkatan kandungan silika tanah yang menunjukkan perbaikan

kapasitas tanah dalam menahan dan menyediakan hara.

Kombinasi biochar-silika dosis 50% dan pupuk N, P, K dosis 100% (b_1p_2) menghasilkan gabah kering panen (GKP) tertinggi sebesar 7,51 t ha⁻¹. Kombinasi biochar-silika dosis 100% dan pupuk N, P, K dosis 50% (b_2p_1) memberikan hasil gabah kering giling (GKG) tertinggi sebesar 6,93 t ha⁻¹ dan bobot 1.000 butir tertinggi sebesar 44,33 g, menunjukkan bahwa peningkatan produktivitas padi dapat dicapai tanpa penggunaan pupuk anorganik dosis penuh. Aplikasi biochar-silika, baik secara mandiri maupun dikombinasikan dengan pemupukan N, P, K, terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi penggunaan fosfor, memperbaiki sifat kimia tanah, dan meningkatkan produktivitas padi sawah pada tanah Inceptisols serta berpotensi mendukung strategi pemupukan yang lebih efisien dan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih pada Organisasi Riset Pertanian dan Pangan, BRIN atas skema pendanaan yang diberikan sehingga penelitian berjalan dengan lancar.

DAFTAR PUSTAKA

- Barlóg, P., Grzebisz, W., & Łukowiak, R. 2022. *Fertilizers and fertilization strategies mitigating soil factors constraining efficiency of nitrogen in plant production*. Plants, 11(14), 1855. <https://doi.org/10.3390/plants11141855>
- 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). <https://doi.org/10.1080/03650340.2013.789870>
- Citraresmini, A., Yuniarti, A., Sofyan, E. T., & Setiawan, A. 2025a. *Assessment of*

- silica-enriched biochar for enhancing soil fertility in Inceptisols*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1463, 012003.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1463/1/012003>
- Citraresmini, A., Sofyan, E. T., Setiawan, A., & Nurbaiti, A. 2025b. *Effect of biochar-silica and N, P, K fertilization on soil pH, silica content, phosphorus uptake, and rice yield in Inceptisols*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1463, 012003.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1463/1/012003>
- Gao, J.-L., Xu, K.-X., Zhang, C., Qiu, L.-X., Liu, Y.-W., Qiang, Z.-Y., Huang, J., & Guan, D.-X. 2025. *Silicon application increases phosphorus uptake by rice: Dynamic rhizosphere processes*. Earth Critical Zone, 2, 100038.
<https://doi.org/10.1016/j.ecz.2025.100038>
- Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. 2002. *Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review*. Biology and Fertility of Soils, 35(4): 219–230.
<https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4>
- Haynes, R. J. 2014. *A contemporary overview of silicon availability in agricultural soils*. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 177: 831–844.
- Jiang, H., Jiang, Z., Zhang, H., Li, Y., Li, W., Gao, K., ... & Wu, Z. 2025. *Silicon nutrition improves lodging resistance of rice under dry cultivation*. Plants, 14(3): 361.
<https://doi.org/10.3390/plants14030361>
- Klotzbücher, T., Marxen, A., Vetterlein, D., Schneiker, J., Türke, M., Van Sinh, N., ... & Jahn, R. 2015. *Plant-available silicon in paddy soils as a key factor for sustainable rice production in Southeast Asia*. Basic and Applied Ecology, 16(8): 665–673.
<https://doi.org/10.1016/j.baae.2014.08.002>
- Lehmann, J., Cowie, A., Masiello, C. A., et al. 2021. *Biochar in climate change mitigation*. Nature Geoscience, 14: 883–892.
<https://doi.org/10.1038/s41561-021-00852-8>
- Li, Y., Xu, Z., Zhang, L., Chen, W., & Feng, G. 2024. *Dynamics between soil fixation of fertilizer phosphorus and biological phosphorus mobilization determine the phosphorus budgets in agroecosystems*. Agriculture, Ecosystems & Environment, 375: 109174.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109174>
- Ma, J. F., & Yamaji, N. 2015. *A cooperative system of silicon transport in plants*. Trends in Plant Science, 20(7): 435–442.
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.04.007>
- Matichenkov, V. V., & Bocharnikova, E. A. 2001. *The relationship between silicon and soil physical and chemical properties*. Soil Science and Plant Nutrition, 47: 1–9.
- Mulyani, O., Sudirja, R., Solihin, E., Sara, D. S., & Husein, A. Y. 2025. *Pengembangan kesehatan tanah berbasis zeolit: strategi perbaikan sifat kimia tanah secara berkelanjutan*. Soilrens, 23(1): 111.
<https://doi.org/10.24198/soilrens.v23i1.66072>
- Nambafu, G. N., Hoepfner, N., Bessler, H., Gweyi-Onyango, J. P., Andika, D. O., Mwonga, S., & Engels, C. 2025. *Influence of soil phosphorus fertilizer forms on phosphorus uptake, morphology, and growth of leafy vegetables*. Discover Soil, 2: 64.
<https://doi.org/10.1007/s44378-025-00094-9>
- Ran, J. W., Qi, X., Wu, D., Huang, M., Cai, Z. J., Huang, Y. P., & Zhang, W. J. 2023. *Impacts of biochar application on soil nutrient availability and exchangeable base cations: a meta-analysis*. Chinese Journal of Eco-

- Agriculture, 31(9): 1449–1459.
<https://doi.org/10.12357/cjea.2023.0026shu>
- Schaller, J., Wu, B., Amelung, W., Hu, Z., Stein, M., Lehndorff, E., & Obst, M. 2022. *Silicon as a potential limiting factor for phosphorus availability in paddy soils*. Scientific Reports, 12(16329).
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-20805-4>
- Setiawati, M. R., Herdiyantoro, D., Damayani, M., & Suryatmana, P. 2018. Analisis C, N, C/N ratio tanah dan hasil padi yang diberi pupuk organik dan pupuk hayati berbasis azolla pada lahan sawah organik. Soilrens, 16(2).
<https://doi.org/10.24198/soilrens.v16i2.20857>
- Sofyan, E. T., Rizca, D. A. N., Yuniarti, A., Citraresmini, A., Setiawan, A., Hidayat, Y., & Sara, D. S. 2025. *The effect of biochar-silica and N, P, K fertilization on soil pH, silica content, phosphorus uptake, and rice yield in Inceptisols*. International Journal of Life Science and Agriculture Research, 4(4): 255–260.
<https://doi.org/10.55677/ijlsar/V04I04Y2025-03>
- Subiksa, I. G. M. 2018. Pengaruh pupuk silika terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman padi sawah pada Inceptisols. Jurnal Tanah dan Iklim, 42 (2): 153-160.
<https://doi.org/10.2017/JTI.V42I2.9447>
- Susanti, W. I., Cholidah, S. N., & Agus, F. 2024. *Agroecological nutrient management strategy for attaining sustainable rice self-sufficiency in Indonesia*. Sustainability, 16(2): 845.
<https://doi.org/10.3390/su16020845>
- Su, X., Zhang, Y., Liu, J., Wang, H., & Chen, D. 2024. *Significant synergy effects of biochar combined with silicon fertilization on soil fertility and rice productivity in paddy soil*. Agronomy, 14(3): 568.
<https://doi.org/10.3390/agronomy14030568>
- Syers, J. K., Johnston, A. E., & Curtin, D. 2008. *Efficiency of Soil and Fertilizer Phosphorus Use: Reconciling Changing Concepts of Soil Phosphorus Behaviour With Agronomic Information*. Food and Agriculture Organization of The United Nation. Rome.
- Teng, X., Huang, D., Zhi, Y., Li, Y., Dong, D., Wu, X., Wang, Y., Jiang, Z., Huang, H., Tang, Y., Liu, D., & Xu, W. 2025. *Effects of biochar on soil properties as well as available and TCLP-extractable Cu contents: A global meta-analysis*. Scientific Reports, 15: 32853.
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-18170-z>
- Veneklaas, E.J., Lambers, H., Bragg, J., Finnegan, P.M., Lovelock, C.E., Plaxton, W.C., Price, C.A., Scheible, W.-R., Shane, M.W., White, P.J. and Raven, J.A. 2012. *Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants*. New Phytologist, 195: 306-320.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04190.x>
- Wang, M., Wang, J. J., & Wang, X. 2018. *Effect of KOH-enhanced biochar on increasing soil plant-available silicon*. Geoderma, 321, 22–31.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.001>
- Yuniarti, A., Damayani, M., & Nur, D. M. 2019. Efek pupuk organik dan pupuk N, P, K terhadap C-organik, N-total, C/N, serapan N, serta hasil padi hitam pada Inceptisols. Jurnal Pertanian Persisi, 3(2): 90 – 105.
<https://doi.org/10.24198/kultivasi.v19i1.24563>