

**Pengaruh Kombinasi Pemberian Biochar dan Kotoran Sapi Terhadap Fase Vegetatif
Tanaman Padi (*Oryza sativa* L.) dan Populasi Bakteri Penambat N-free**

***The Effect of a Combination of Biochar and Cattle Manure on the Vegetative Phase
of Rice Plants (*Oryza sativa* L.) and the Population of N-Free-Fixing Bacteria.***

Naili Zulfatul Jannah*, Novi Arfarita¹ dan Mahayu Woro Lestari²

¹Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Islam Malang

Jl. MT. Haryono No. 193 Malang 65144, Jawa Timur, Indonesia

*Korespondensi: nailizulfa03@gmail.com

ABSTRACT

*Land degradation caused by declining soil organic matter and microbial activity has become one of the major constraints to rice productivity. Organic soil amendments, such as biochar and cattle manure, have the potential to improve soil quality while enhancing microbial activity involved in nutrient availability. This study aimed to evaluate the effects of combined biochar and cattle manure applications on the vegetative growth of rice (*Oryza sativa* L.) and the population of free-living nitrogen-fixing (N-free) bacteria. The experiment was conducted at the Greenhouse of Universitas Brawijaya and the Microbiology Laboratory of the Halal Center, Universitas Islam Malang, from December 2025 to June 2026 using a Randomized Complete Block Design with five treatments and four replications. The treatments consisted of a control, biochar at 30 t ha⁻¹, cattle manure at 40 t ha⁻¹, biochar at 30 t ha⁻¹ combined with cattle manure at 20 t ha⁻¹, and biochar at 15 t ha⁻¹ combined with cattle manure at 40 t ha⁻¹. Data were analyzed using analysis of variance followed by the Least Significant Difference test at the 5% significance level. The combined application of biochar and cattle manure significantly affected all vegetative growth parameters and the population of free-living nitrogen-fixing bacteria. The treatment of biochar at 15 t ha⁻¹ combined with cattle manure at 40 t ha⁻¹ produced the highest leaf number, leaf area, fresh biomass, dry biomass, and bacterial population, whereas the highest tiller number was obtained from the combination of biochar at 30 t ha⁻¹ and cattle manure at 20 t ha⁻¹. Although all plants developed chlorosis before entering the reproductive stage, the combined application of biochar and cattle manure improved soil biological quality and promoted vegetative growth. These findings indicate that the combined use of biochar and cattle manure has considerable potential as an organic soil*



amendment for sustainable soil fertility management, although further optimization of cultivation practices is required to support crop development through the reproductive stage.

Keywords: *N-free nitrogen-fixing bacteria; biochar; cow manure; rice; vegetative growth.*

ABSTRAK

Degradasi lahan sawah akibat penurunan kandungan bahan organik dan aktivitas mikroorganisme tanah menjadi salah satu faktor pembatas produktivitas padi. Aplikasi pembenah tanah organik, seperti biochar dan kotoran sapi, berpotensi memperbaiki kualitas tanah sekaligus meningkatkan aktivitas mikrobiologi yang berperan dalam penyediaan unsur hara. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh kombinasi biochar dan kotoran sapi terhadap pertumbuhan vegetatif tanaman padi (*Oryza sativa* L.) serta populasi bakteri penambat N-free. Penelitian dilaksanakan di Greenhouse Universitas Brawijaya dan Laboratorium Mikrobiologi Pusat Halal Center Universitas Islam Malang pada Desember 2025–Juni 2026 menggunakan Rancangan Acak Kelompok dengan lima perlakuan dan empat ulangan. Perlakuan terdiri atas kontrol, biochar 30 ton ha⁻¹, kotoran sapi 40 ton ha⁻¹, kombinasi biochar 30 ton ha⁻¹ + kotoran sapi 20 ton ha⁻¹, serta kombinasi biochar 15 ton ha⁻¹ + kotoran sapi 40 ton ha⁻¹. Data dianalisis menggunakan analisis ragam dan dilanjutkan uji Beda Nyata Terkecil taraf 5%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi biochar dan kotoran sapi memberikan pengaruh nyata terhadap seluruh parameter pertumbuhan vegetatif dan populasi bakteri penambat N-free. Perlakuan biochar 15 ton ha⁻¹ + kotoran sapi 40 ton ha⁻¹ menghasilkan jumlah daun, luas daun, bobot segar, bobot kering, dan populasi bakteri penambat N-free tertinggi, sedangkan jumlah anakan tertinggi diperoleh pada kombinasi biochar 30 ton ha⁻¹ + kotoran sapi 20 ton ha⁻¹. Meskipun seluruh tanaman mengalami klorosis sebelum fase generatif, kombinasi biochar dan kotoran sapi mampu meningkatkan kualitas biologis media tanam dan mendukung pertumbuhan vegetatif tanaman padi. Temuan ini menunjukkan bahwa kombinasi kedua bahan berpotensi diaplikasikan sebagai alternatif pembenah tanah organik dalam mendukung pengelolaan kesuburan tanah secara berkelanjutan, namun masih diperlukan penyempurnaan teknik budidaya agar mampu menunjang pembentukan hasil hingga fase generatif.

Kata kunci: bakteri penambat N-free; biochar; kotoran sapi; padi; pertumbuhan vegetatif.



PENDAHULUAN

Padi (*Oryza sativa* L.) merupakan komoditas pangan utama yang berperan penting dalam menjaga ketahanan pangan nasional maupun global. Peningkatan kebutuhan beras akibat pertumbuhan jumlah penduduk menuntut upaya peningkatan produktivitas padi secara berkelanjutan. Namun, produktivitas padi di Indonesia masih menghadapi berbagai kendala, salah satunya adalah degradasi lahan sawah yang ditandai oleh penurunan kandungan bahan organik, kerusakan struktur tanah, serta menurunnya aktivitas mikroorganisme tanah. Kondisi tersebut menyebabkan efisiensi penyerapan unsur hara menjadi rendah sehingga pertumbuhan tanaman tidak berlangsung secara optimal.

Salah satu pendekatan yang dikembangkan untuk memperbaiki kualitas tanah adalah penggunaan pembenah tanah organik. Biochar memiliki karakteristik berupa struktur berpori, luas permukaan tinggi, serta kapasitas tukar kation yang mampu meningkatkan retensi air, mempertahankan unsur hara, dan menyediakan habitat bagi mikroorganisme tanah. Di sisi lain, kotoran sapi merupakan sumber bahan organik dan unsur hara yang mampu meningkatkan aktivitas biologis tanah melalui penyediaan karbon dan nutrisi bagi mikroorganisme. Kombinasi kedua bahan tersebut diperkirakan memberikan efek sinergis dalam memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah sehingga mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman padi.

Beberapa penelitian melaporkan bahwa aplikasi biochar maupun pupuk kandang secara terpisah mampu meningkatkan kesuburan tanah dan pertumbuhan tanaman. Akan tetapi, kajian mengenai kombinasi biochar dan kotoran sapi yang dikaitkan dengan perubahan populasi bakteri penambat N-free serta hubungannya terhadap pertumbuhan vegetatif tanaman padi masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki kebaruan berupa evaluasi pengaruh kombinasi biochar dan kotoran sapi terhadap pertumbuhan vegetatif tanaman padi sekaligus populasi bakteri penambat nitrogen bebas dalam satu sistem percobaan.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh kombinasi biochar dan kotoran sapi terhadap pertumbuhan vegetatif tanaman padi (*Oryza sativa* L.) serta populasi bakteri penambat N-free. Hipotesis penelitian adalah kombinasi biochar dan kotoran sapi memberikan pengaruh nyata terhadap peningkatan pertumbuhan vegetatif tanaman padi dan populasi bakteri penambat nitrogen bebas.



BAHAN DAN METODE

Penelitian dilaksanakan pada bulan Desember 2025 hingga Juni 2026 di Greenhouse Universitas Brawijaya, Malang, Jawa Timur. Analisis populasi bakteri penambat N-free dilakukan di Laboratorium Mikrobiologi Pusat Halal Center Universitas Islam Malang.

Bahan yang digunakan meliputi benih padi (*Oryza sativa* L.) varietas Inpari 32, tanah sebagai media tanam, biochar, kotoran sapi, media *Nitrogen Free Bromothymol Blue* (NFB) semi-solid, akuades steril, alkohol 70%, serta bahan pendukung analisis mikrobiologi. Peralatan yang digunakan antara lain ember sebagai media tanam, timbangan digital, mistar ukur, oven, autoklaf, laminar air flow, inkubator, mikropipet, cawan petri, tabung reaksi, dan peralatan laboratorium lainnya.

Penelitian menggunakan Rancangan Acak Kelompok (RAK) yang terdiri atas lima perlakuan dan empat ulangan sehingga diperoleh 20 satuan percobaan. Perlakuan yang diuji meliputi kontrol (P0), biochar 30 ton ha⁻¹ (P1), kotoran sapi 40 ton ha⁻¹ (P2), kombinasi biochar 30 ton ha⁻¹ + kotoran sapi 20 ton ha⁻¹ (P3), dan kombinasi biochar 15 ton ha⁻¹ + kotoran sapi 40 ton ha⁻¹ (P4). Biochar dan kotoran sapi dicampurkan ke media tanam sesuai dosis perlakuan, kemudian diinkubasi selama 24 jam sebelum penanaman. Bibit padi berumur 14 hari setelah semai dipindahkan ke media tanam dan dipelihara hingga akhir fase vegetatif.

Parameter yang diamati meliputi tinggi tanaman, jumlah daun, luas daun, jumlah anakan, bobot segar, bobot kering, serta populasi bakteri penambat nitrogen bebas (N-free). Pengamatan pertumbuhan dilakukan secara berkala selama fase vegetatif, sedangkan populasi bakteri dianalisis menggunakan metode *Total Plate Count* (TPC) pada media NFB semi-solid.

Data dianalisis menggunakan analisis ragam (ANOVA). Apabila perlakuan menunjukkan pengaruh nyata pada taraf 5%, analisis dilanjutkan menggunakan uji Beda Nyata Terkecil (BNT) pada taraf nyata 5%.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisis Pertumbuhan Fase Vegetatif

Hasil analisis ragam pada taraf 5% menunjukkan bahwa pemberian biochar, kotoran sapi, dan kombinasinya berpengaruh nyata terhadap seluruh parameter pertumbuhan vegetatif tanaman padi serta populasi bakteri penambat N-free, meskipun tingkat signifikansinya berbeda-beda pada tiap umur pengamatan. Rekapitulasi data pada akhir pengamatan (110 HST untuk parameter



pertumbuhan, serta hasil analisis bobot dan populasi bakteri) disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rata-Rata Pertumbuhan Vegetatif dan Populasi Bakteri Penambat N-free Tanaman Padi pada Akhir Pengamatan Akibat Perlakuan Biochar dan Kotoran Sapi

Perlakuan	Tinggi Tanaman (cm) ¹	Jumlah Daun (helai)	Luas Daun (cm ²)	Jumlah Anakan (batang)	Bobot Segar (g)	Bobot Kering (g)	Populasi Bakteri (log CFU g ⁻¹)
O (Kontrol)	94.43	35.08 a	1361.74 ab	12.58 a	101.63 a	30.00 a	8.85 a
B (Biochar)	97.66	33.75 a	1605.09 c	14.42 bc	109.71 a	32.38 a	9.65 c
K (Kotoran sapi)	99.19	35.17 a	1418.52 b	16.08 bcd	107.66 a	31.72 a	9.17 b
C (Biochar+Kotoran sapi)	99.49	35.08 a	1292.86 a	17.50 d	118.71 a	35.93 a	9.75 de
D (Biochar+Kotoran sapi)	99.29	42.50 b	1884.95 d	15.75 bc	343.46 b	45.63 b	9.82 e
BNT 5%	TN	5.30	285.82	2.24	18.10	6.96	0.16

Keterangan: Angka yang didamping huruf yang sama pada kolom yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada uji BNT 5%; TN = tidak berbeda nyata. O: tanpa biochar dan kotoran sapi; B: biochar 238 g; K: kotoran sapi 317 g; C: kombinasi biochar 238 g + kotoran sapi 159 g; D: kombinasi biochar 119 g + kotoran sapi 317 g. ¹Tinggi tanaman pada 110 HST tidak berbeda nyata antarperlakuan; pengaruh nyata terhadap tinggi tanaman justru terjadi lebih awal, pada umur 10, 20, dan 60 HST (dibahas pada teks).

Tinggi Tanaman Padi

Tinggi tanaman berpengaruh nyata pada umur pengamatan 10, 20, dan 60 HST, namun perbedaan tersebut tidak lagi terdeteksi pada akhir pengamatan (110 HST) sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1, yang mengindikasikan bahwa seluruh perlakuan pada akhirnya mencapai tinggi tanaman yang setara. Pada umur 10 HST, perlakuan D menghasilkan tinggi tanaman tertinggi (6,33 cm) dan berbeda nyata dengan perlakuan lainnya kecuali K (5,68 cm), menunjukkan bahwa kombinasi biochar dan kotoran sapi mampu menyediakan kondisi media tanam yang lebih mendukung pertumbuhan pada fase awal. Nitrogen merupakan unsur penyusun utama asam amino, protein, klorofil, dan enzim yang berperan penting dalam pembentukan jaringan vegetatif, sehingga ketersediaannya pada fase awal sangat menentukan laju pertumbuhan tanaman; biochar turut meningkatkan kapasitas tukar kation, memperbaiki porositas tanah, dan meningkatkan kemampuan tanah menahan air sehingga efisiensi penyerapan hara meningkat (Wang, 2022).

Namun demikian, memasuki umur 60 HST perlakuan biochar tunggal (B) justru menghasilkan tinggi tanaman tertinggi (70,80 cm), berbeda nyata dengan perlakuan kotoran sapi tunggal (K) yang terendah (60,41 cm). Kondisi ini menunjukkan bahwa biochar mampu mempertahankan ketersediaan hara dalam media tanam secara lebih stabil dibandingkan kotoran sapi segar, yang sebagian nitrogennya diduga masih mengalami proses mineralisasi sehingga belum seluruhnya tersedia bagi tanaman. Bahan organik berperan sebagai sumber energi bagi mikroorganisme tanah, sedangkan biochar



menyediakan habitat yang mendukung aktivitas mikroba sehingga efisiensi pemanfaatan hara meningkat (Arfarita *et al.*, 2019). Dengan demikian, tinggi tanaman pada penelitian ini lebih ditentukan oleh kemampuan media tanam mempertahankan ketersediaan hara selama fase pertumbuhan dibandingkan sekadar jumlah hara yang diberikan di awal, dan perbedaan antarperlakuan yang sempat muncul pada fase awal akhirnya menyatu pada akhir fase vegetatif.

Jumlah Daun Tanaman Padi

Berbeda dengan tinggi tanaman, jumlah daun berpengaruh nyata mulai umur 60 HST hingga akhir pengamatan. Berdasarkan Tabel 1, perlakuan D secara konsisten menghasilkan jumlah daun tertinggi dan berbeda nyata dengan seluruh perlakuan lain, mencapai 42,50 helai pada 110 HST dibandingkan O (35,08 helai), B (33,75 helai), K (35,17 helai), maupun perlakuan C (35,08 helai). Jumlah daun merupakan indikator penting pertumbuhan vegetatif karena berkaitan langsung dengan kemampuan tanaman berfotosintesis; semakin banyak daun yang terbentuk, semakin besar luas permukaan penangkap cahaya sehingga pembentukan fotosintat lebih optimal. Tingginya jumlah daun pada perlakuan D menunjukkan bahwa kombinasi biochar dan kotoran sapi meningkatkan efisiensi pemanfaatan hara, terutama nitrogen, yang berperan dalam pembentukan klorofil, sintesis protein, dan pembelahan sel pada jaringan meristem daun (Khumto *et al.*, 2018).

Biochar berperan memperbaiki kondisi fisik tanah melalui peningkatan porositas, aerasi, dan kapasitas menahan air sehingga sistem perakaran berkembang lebih baik, sementara kotoran sapi menyediakan bahan organik sebagai sumber karbon bagi mikroorganisme tanah sehingga pelepasan hara berlangsung bertahap. Sinergi kedua bahan tersebut menjadikan ketersediaan nitrogen di daerah perakaran lebih stabil dibandingkan perlakuan tunggal (Brtnicky *et al.*, 2019; Arfarita *et al.*, 2019). Perlakuan kontrol menghasilkan jumlah daun terendah, mengindikasikan bahwa tanpa penambahan bahan organik maupun biochar, ketersediaan hara belum mampu memenuhi kebutuhan tanaman selama fase vegetatif, sementara perlakuan tunggal biochar maupun kotoran sapi memberikan peningkatan yang masih di bawah perlakuan kombinasi (Kimani *et al.*, 2021; Ning *et al.*, 2022).

Luas Daun Tanaman Padi

Luas daun berpengaruh nyata pada umur 20, 60, 70, 90, 100, dan 110 HST. Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1, perlakuan D menghasilkan luas daun tertinggi pada akhir pengamatan (1.884,95 cm²), berbeda nyata dengan seluruh perlakuan lain,



termasuk B (1.605,09 cm²), K (1.418,52 cm²), kontrol (1.361,74 cm²), dan C (1.292,86 cm²) yang justru terendah. Luas daun mencerminkan kemampuan tanaman melakukan ekspansi sel selama fase vegetatif; semakin luas daun yang terbentuk, semakin besar kemampuan tanaman menangkap energi cahaya untuk fotosintesis. Nitrogen yang tersedia dari kotoran sapi dimanfaatkan untuk sintesis protein, klorofil, dan enzim yang berperan dalam pembelahan maupun pembesaran sel daun (Ribeiro *et al.*, 2019), sementara biochar diduga meningkatkan efisiensi penggunaan hara melalui perbaikan struktur tanah, kapasitas tukar kation, dan kelembapan media tanam (Brtnicky *et al.*, 2019).

Perlakuan biochar tunggal juga menunjukkan luas daun yang relatif tinggi dibandingkan kontrol maupun kotoran sapi tunggal, menandakan bahwa perbaikan sifat fisik tanah oleh biochar sudah cukup meningkatkan pertumbuhan tanaman meski tanpa tambahan bahan organik dalam jumlah besar. Sebaliknya pada kotoran sapi tunggal, peningkatan luas daun tidak sebesar perlakuan D karena sebagian hara hasil dekomposisi belum termanfaatkan optimal tanpa biochar yang berfungsi mempertahankan hara di dalam tanah (Arfarita *et al.*, 2019).

Jumlah Anakan Tanaman Padi

Jumlah anakan berpengaruh nyata pada umur 110 HST. Berdasarkan Tabel 1, perlakuan C menghasilkan jumlah anakan tertinggi (17,50 batang), tidak berbeda nyata dengan K (16,08 batang), tetapi berbeda nyata dengan perlakuan O, B, dan D. Hasil ini menunjukkan bahwa pembentukan anakan lebih dipengaruhi oleh keseimbangan dosis biochar dan kotoran sapi dibandingkan peningkatan dosis salah satu bahan secara tunggal. Biochar dosis lebih tinggi pada perlakuan C diduga memperbaiki porositas, aerasi, dan kapasitas menahan air sehingga perkembangan akar lebih baik, sementara kotoran sapi menyediakan nitrogen secara bertahap sehingga kebutuhan tanaman tetap terpenuhi tanpa akumulasi nitrogen berlebihan (Danapriatna *et al.*, 2023).

Menariknya, perlakuan D menghasilkan jumlah anakan yang lebih rendah dibandingkan perlakuan C meskipun memiliki jumlah daun dan luas daun tertinggi, mengindikasikan bahwa peningkatan pertumbuhan tajuk tidak selalu diikuti oleh peningkatan jumlah anakan; sebagian besar hasil fotosintesis pada perlakuan D diduga lebih banyak dialokasikan untuk pembentukan daun dan perluasan tajuk dibandingkan pembentukan tunas baru. Perlakuan kontrol menghasilkan jumlah anakan paling rendah akibat keterbatasan hara dan rendahnya kandungan bahan organik dalam media tanam.



Bobot Segar dan Bobot Kering Tanaman Padi

Sebagaimana disajikan pada Tabel 1, perlakuan D menghasilkan bobot segar (343,46 g) dan bobot kering (45,63 g) tertinggi, berbeda nyata dengan seluruh perlakuan lain yang secara statistik tidak saling berbeda satu sama lain. Tingginya bobot segar dan bobot kering pada perlakuan D sejalan dengan jumlah daun dan luas daun yang juga tertinggi pada perlakuan yang sama, menunjukkan bahwa peningkatan biomassa merupakan hasil dari pertumbuhan vegetatif yang lebih optimal; semakin luas permukaan daun, semakin besar kemampuan tanaman menangkap energi cahaya untuk menghasilkan fotosintat yang ditranslokasikan ke seluruh organ tanaman (Khumto et al., 2018; Ribeiro et al., 2019).

Peningkatan bobot segar pada perlakuan D juga diduga berkaitan dengan peran biochar dalam memperbaiki sifat fisik tanah melalui porositas, aerasi, kapasitas menahan air, dan kapasitas tukar kation, sehingga sistem perakaran berkembang lebih baik dan penyerapan air serta hara lebih efisien, sementara kotoran sapi menyediakan hara makro dan bahan organik sebagai sumber nutrisi tanaman maupun mikroorganisme tanah (Brtnicky et al., 2019; Arfarita et al., 2019). Bobot kering menggambarkan akumulasi bahan kering hasil fotosintesis setelah kandungan air dihilangkan sehingga merupakan indikator yang lebih akurat dibandingkan bobot segar; tingginya bobot kering pada D menunjukkan bahwa kombinasi biochar dan kotoran sapi turut meningkatkan akumulasi senyawa organik seperti karbohidrat, protein, dan selulosa (Khumto et al., 2018). Populasi bakteri penambat N-free yang juga tertinggi pada D diduga turut mendukung peningkatan bobot tanaman melalui penyediaan nitrogen dari proses fiksasi biologis.

Total Populasi Bakteri Penambat N-free

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1, perlakuan D menghasilkan populasi bakteri tertinggi (9,82 log CFU g⁻¹ tanah), tidak berbeda nyata dengan C (9,75 log CFU g⁻¹), namun berbeda nyata dengan biochar, kotoran sapi, maupun kontrol. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi biochar dan kotoran sapi menciptakan lingkungan yang lebih sesuai bagi perkembangan bakteri penambat nitrogen dibandingkan pemberian tunggal. Struktur biochar yang berpori melindungi mikroorganisme dari fluktuasi suhu dan kelembapan serta mengadsorpsi air dan hara sehingga menciptakan mikrohabitat yang mendukung aktivitas mikroba tanah (Brtnicky et al., 2019), sementara kotoran sapi menyediakan karbon dan nutrisi sebagai sumber energi bagi bakteri sehingga metabolisme, pertumbuhan koloni, dan fiksasi nitrogen berlangsung lebih optimal (Arfarita et al., 2019).

***Hubungan Populasi Bakteri Penambat N-free dengan Fase Vegetatif Tanaman Padi*****Tabel 2. Korelasi antara Populasi Bakteri Penambat N-free dengan Parameter Pertumbuhan Vegetatif Tanaman Padi**

Parameter	Bakteri	TT	JD	JA	LD	BS
TT	0.749					
JD	0.419	0.335				
JA	0.665	0.934	0.184			
LD	0.517	0.269	0.787	-0.035		
BS	-0.052	-0.437	0.245	-0.712	0.680	
BK	0.491	-0.109	0.303	-0.320	0.724	0.794

Keterangan: TT = tinggi tanaman; JD = jumlah daun; JA = jumlah anakan; LD = luas daun; BS = bobot segar; BK = bobot kering. Kekuatan korelasi: 0,80–1,00 sangat kuat; 0,60–0,79 kuat; 0,40–0,59 sedang; 0,20–0,39 lemah; 0,00–0,19 sangat lemah.

Populasi bakteri penambat N-free menunjukkan hubungan positif dengan sebagian besar parameter pertumbuhan vegetatif, yaitu tinggi tanaman ($r = 0,749$; kuat), jumlah anakan ($r = 0,665$; kuat), luas daun ($r = 0,517$; sedang), bobot kering ($r = 0,491$; sedang), dan jumlah daun ($r = 0,419$; sedang), menunjukkan bahwa peningkatan populasi bakteri cenderung diikuti oleh peningkatan pertumbuhan vegetatif tanaman. Sebaliknya, hubungan dengan bobot segar menunjukkan korelasi negatif yang sangat lemah ($r = -0,052$). Bakteri penambat N-free berperan menyediakan nitrogen melalui fiksasi biologis sehingga mendukung pembentukan jaringan vegetatif, terutama tinggi tanaman, jumlah daun, dan jumlah anakan (de Azevedo & Quecine, 2017), dan sebagian bakteri penambat nitrogen juga mampu menghasilkan fitohormon yang merangsang pertumbuhan akar dan meningkatkan efisiensi penyerapan hara (Arfarita et al., 2019).

Meskipun demikian, tingginya populasi bakteri pada perlakuan D tidak selalu diikuti peningkatan seluruh parameter pertumbuhan jumlah anakan tertinggi justru diperoleh pada perlakuan C menunjukkan bahwa pertumbuhan tanaman tidak hanya ditentukan oleh populasi bakteri penambat N-free, tetapi juga oleh keseimbangan ketersediaan hara, kondisi fisik tanah, dan kemampuan tanaman mendistribusikan hasil fotosintesis ke berbagai organ. Secara keseluruhan, sinergi biochar sebagai pembenah tanah dan kotoran sapi sebagai sumber bahan organik menciptakan lingkungan perakaran yang lebih kondusif bagi aktivitas mikroorganisme tanah, sehingga efisiensi penyediaan nitrogen bagi tanaman meningkat (Brtnicky et al., 2019; Arfarita et al., 2019).



Kegagalan Tanaman Padi Mencapai Fase Generatif

Meskipun kombinasi biochar dan kotoran sapi mampu meningkatkan pertumbuhan vegetatif tanaman padi, seluruh tanaman pada setiap perlakuan menunjukkan gejala klorosis pada fase vegetatif akhir yang kemudian berkembang menjadi nekrosis dan menyebabkan kematian tanaman sebelum memasuki fase generatif. Gejala tersebut mulai tampak pada umur 60-70 HST dan berkembang hingga tanaman mati pada umur 100-110 HST, sehingga parameter generatif seperti jumlah malai, jumlah gabah, dan bobot panen tidak dapat diamati.

Kegagalan tanaman mencapai fase generatif diduga disebabkan oleh tiga faktor yang saling berkaitan. Pertama, kebutuhan nitrogen tanaman meningkat seiring bertambahnya umur, terutama menjelang fase pembentukan malai; ketersediaan nitrogen pada fase vegetatif akhir diduga belum mampu memenuhi kebutuhan tersebut sehingga tanaman memobilisasi nitrogen dari daun tua ke jaringan muda, menyebabkan klorosis yang berkembang menjadi nekrosis (Li *et al.*, 2021). Kedua, penggunaan ember plastik berwarna hitam sebagai wadah tanam meningkatkan penyerapan radiasi matahari sehingga suhu media tanam meningkat, mempercepat penguapan air, meningkatkan fluktuasi kelembapan tanah, membatasi ruang tumbuh akar, dan menimbulkan stres pada sistem perakaran (Heller *et al.*, 2015). Ketiga, keterbatasan volume media tanam dalam ember menyebabkan cadangan hara semakin berkurang seiring meningkatnya kebutuhan tanaman, tanpa dapat tergantikan secara alami sebagaimana pada kondisi lahan sawah, sehingga ketersediaan hara menjadi faktor pembatas utama pertumbuhan menjelang fase reproduktif (Rengel, 2015).

Temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan pertumbuhan vegetatif akibat aplikasi biochar dan kotoran sapi belum sepenuhnya menjamin keberhasilan tanaman mencapai fase generatif, dan bahwa faktor lingkungan budidaya khususnya volume media tanam dan suhu media menjadi faktor pembatas yang perlu diperhitungkan pada perancangan penelitian pot/ember berikutnya.

KESIMPULAN DAN SARAN

Pemberian kombinasi biochar dan kotoran sapi berpengaruh nyata terhadap seluruh parameter pertumbuhan vegetatif tanaman padi (*Oryza sativa* L.) dan populasi bakteri penambat N-free. Perlakuan kombinasi secara umum memberikan pertumbuhan yang lebih baik dibandingkan perlakuan tunggal maupun kontrol. Perlakuan D (biochar 119 g +



kotoran sapi 317 g) memberikan hasil terbaik pada sebagian besar parameter, yaitu jumlah daun tertinggi (42,50 helai), luas daun tertinggi (1.884,95 cm²), bobot segar tertinggi (343,46 g), bobot kering tertinggi (45,63 g), serta populasi bakteri penambat N-free tertinggi (9,82 log CFU g⁻¹ tanah), sedangkan perlakuan C (biochar 238 g + kotoran sapi 159 g) menghasilkan jumlah anakan tertinggi (17,50 batang) dan tinggi tanaman tertinggi pada umur 60 HST diperoleh pada perlakuan biochar tunggal (B, 70,80 cm). Populasi bakteri penambat N-free berkorelasi positif dengan sebagian besar parameter pertumbuhan vegetatif, terutama tinggi tanaman dan jumlah anakan, menunjukkan bahwa perbaikan kondisi biologis tanah turut berkontribusi terhadap pertumbuhan tanaman. Meskipun demikian, seluruh tanaman pada setiap perlakuan mengalami klorosis yang berkembang menjadi nekrosis pada umur sekitar 60-110 HST dan mati sebelum mencapai fase generatif, diduga akibat meningkatnya kebutuhan nitrogen menjelang fase pembentukan malai yang tidak lagi terpenuhi, penggunaan wadah tanam berwarna gelap yang meningkatkan suhu media, serta keterbatasan volume media tanam. Dengan demikian, kombinasi biochar dan kotoran sapi pada dosis yang diuji efektif meningkatkan pertumbuhan vegetatif dan populasi bakteri penambat N-free, namun belum mampu mendukung tanaman hingga fase generatif sehingga efektivitasnya terhadap peningkatan produktivitas padi masih belum optimal.

Berdasarkan hasil tersebut, kombinasi biochar dan kotoran sapi pada dosis yang digunakan belum dapat direkomendasikan sebagai teknologi budidaya padi di tingkat lapang. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan media tanam yang lebih mendekati kondisi lahan sawah, seperti pot berukuran lebih besar atau petak sawah, agar perkembangan sistem perakaran, ketersediaan air, dan suplai hara berlangsung lebih optimal, serta mengevaluasi variasi dosis, jenis bahan, dan metode aplikasi untuk memperoleh formulasi yang lebih efektif dan sesuai diterapkan pada budidaya padi hingga mencapai fase generatif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Dr. Ir. Mahayu Woro Lestari, MP. yang telah memberikan nasihat, arahan dan bimbingan selama pelaksanaan penelitian ini. Kepada kedua orang tua, keluarga dan teman seperjuangan yang banyak memberikan dorongan yang tulus dan doa terbaik, penulis mengucapkan terima kasih sedalam-dalamnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Arfarita, N., Higuchi, T. and Prayogo, C. 2019. Effects of seaweed waste on the viability of three bacterial isolates in biological fertilizer liquid formulations to enhance soil aggregation and fertility. *Jurnal Degradasi dan Minerlalisasi*, 6(4), 1889–1895.
- Arfarita, N., Muhibuddin, A. and T, I. 2019. Exploration of indigenous free nitrogen-fixing bacteria from rhizosphere of *Vigna radiata* for agricultural land treatment. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 5(53), 1367–1376.
- Brtnicky, M., Dokulilova, T., Holatko, J., Pecina, V., Kintl, A., Latal, O., Vyhnanek, T., Prichystalova, J. and Datta, R. 2019. Long-term effects of biochar-based organic amendments on soil microbial parameters. *Agronomy*, 9(11), 1–16.
- Danapriatna, N., Ismarani, I. and Dede, M. 2023. Application of biochar and biological fertilizer to improve soil quality and *Oryza sativa* L. productivity. *Cogent Food and Agriculture*, 9(1).
- de Azevedo, J.L. and Quecine, M.C. 2017. *Diversity and Benefits of Microorganisms from the Tropics*. 1st ed. Cham: Springer.
- Heller, H., Bar Shmuel, A., Kfir, T., Shoshana, N., De, A., Mordechai, F., Hana, B., Moshe, A., Cohen, S. and Tsohar, D. 2015. The effects of container geometry on water and heat regimes in soilless culture: lettuce as a case study. *Irrigation Science*, 33, 53–65.
- Khumto, S., Sreethong, T., Pusadee, T., Rerkasem, B. and Jamjod, S. 2018. Variation of floral traits in Thai rice germplasm (*Oryza sativa*). *Genetic Resources and Crop Evolution*, 65(4), 1123–1132.
- Kimani, S.M., Bimantara, P.O., Kautsar, V., Tawaraya, K. and Cheng, W. 2021. Poultry litter biochar application in combination with chemical fertilizer and Azolla green manure improves rice grain yield and nitrogen use efficiency in paddy soil. *Biochar*, 3(4), 591–602.
- Li, J., Hu, W., Lu, Z., Meng, F., Cong, R., Li, X. and Ren, T. 2021. Imbalance between nitrogen and potassium fertilization influences potassium deficiency symptoms in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) leaves. *The Crop Journal*.
- Ning, C., Liu, R., Kuang, X., Chen, H., Tian, J. and Cai, K. 2022. Nitrogen fertilizer reduction combined with biochar application maintain the yield and nitrogen supply of rice but improve the nitrogen use efficiency. *Agronomy*, 12(12).
- Rengel, Z. 2015. Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(2), 397–409.



Ribeiro, B.S.M.R., Silva, M.R. da, Richter, G.L., Ribas, G.G., Streck, N.A. and Zanon, A.J. 2019. Can leaf area in rice be defined by a mathematical model? *Revista Ceres*, 66(3), 191–199.

Wang, X. 2022. Managing land carrying capacity: key to achieving sustainable production systems for food security. *Land*, 11(4).