

PENGARUH APLIKASI BIOCHAR YANG DIPERKAYA Zn DAN Si TERHADAP PERFORMA FISILOGI BIBIT KOPI ROBUSTA PADA CEKAMAN KEKERINGAN

THE EFFECT OF Zn- AND Si-ENRICHED BIOCHAR APPLICATION ON THE PHYSIOLOGICAL PERFORMANCE OF ROBUSTA COFFEE SEEDLINGS UNDER DROUGHT STRESS

Aquilla Avicenna¹, Muhammad Parikesit Wisnubroto¹, Dira Nazlah Mayasari¹, Dewi Rezki^{1*}

¹ Program Studi Agroekoteknologi Departemen Budidaya Tanaman Perkebunan, Fakultas Pertanian, Universitas Andalas

* Corresponding Author. E-mail address: dewirezki@agr.unand.ac.id

PERKEMBANGAN ARTIKEL:

Diterima: 11-1-2026

Direvisi: 4-6-2026

Disetujui: 9-6-2026

KEYWORDS:

Ameliorant, climate, drought
Stress, Robusta coffee, soil

ABSTRACT

Drought caused by climate phenomena such as El Niño is a major constraint in robusta coffee (*Coffea canephora*) production, as it reduces photosynthetic efficiency and plant growth. This study aimed to evaluate the effectiveness of coffee husk biochar enriched with zinc (Zn) and silicon (Si) in improving the physiological and agronomic responses of robusta coffee seedlings under different irrigation intervals. The experiment was arranged in a two-factor factorial design, consisting of biochar doses (0–400 g polybag⁻¹) and irrigation intervals (1, 3, 5, and 7 days), using 60 plants with three replications. Destructive observations were conducted at 10 weeks after transplanting and included physiological, and agronomic parameters. The results showed that Zn- and Si-enriched biochar significantly affected most physiological responses of robusta coffee seedlings, except proline content. Agronomic responses generally showed no significant interaction, although root dry weight and leaf area were significantly influenced by single factors. A high biochar dose (400 g polybag⁻¹) was identified as the most effective treatment for optimizing physiological and agronomic performance, while a 5-day irrigation interval (moderate drought stress) was the most suitable watering condition. The application of Zn- and Si-enriched coffee husk biochar has potential as a drought mitigation strategy in robusta coffee nursery

ABSTRAK

Kekeringan akibat fenomena iklim seperti El Niño menjadi kendala utama dalam produksi kopi robusta (*Coffea canephora*) karena menurunkan efisiensi fotosintesis dan pertumbuhan tanaman. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas biochar kulit kopi yang diperkaya seng (Zn) dan silika (Si) dalam meningkatkan respon fisiologi dan agronomi bibit kopi robusta pada berbagai interval penyiraman. Penelitian menggunakan rancangan faktorial dua faktor, yaitu dosis biochar (0–400 g/polybag) dan interval penyiraman (1, 3, 5, dan 7 hari), dengan 60 tanaman dan tiga ulangan. Pengamatan destruktif dilakukan pada 10 minggu setelah pindah tanam meliputi parameter fisiologi dan agronomi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa biochar diperkaya Zn dan Si berpengaruh nyata terhadap sebagian besar respon fisiologi bibit kopi robusta, kecuali prolin. Respon agronomi secara umum tidak menunjukkan interaksi nyata, namun bobot kering akar dan luas daun dipengaruhi oleh faktor tunggal. Biochar dosis tinggi (400 g/polybag) merupakan dosis terbaik dalam mengoptimalkan respon fisiologi dan agronomi tanaman, sedangkan interval penyiraman 5 hari (cekaman kekeringan sedang) merupakan kondisi penyiraman terbaik. Aplikasi biochar kulit kopi diperkaya Zn dan Si berpotensi digunakan sebagai strategi mitigasi kekeringan pada pembibitan kopi robusta

KATA KUNCI:

Amelioran, iklim, cekaman
kering, kopi Robusta, tanah

1. PENDAHULUAN

Tanaman kopi (*Coffea* sp.) merupakan salah satu komoditas perkebunan penting di Indonesia karena berperan sebagai produk unggulan ekspor pertanian. Kopi robusta menjadi jenis yang paling dominan, dengan sekitar 71% arealnya dikelola oleh petani rakyat sehingga memiliki nilai strategis dalam pemberdayaan ekonomi lokal (Ditjebun 2023; Azmi dan Hadriantni, 2018). Namun, kontribusi besar tanaman kopi terhadap perekonomian dapat tertekan akibat perubahan iklim global, terutama meningkatnya kejadian kekeringan. Fenomena iklim ekstrem seperti El Niño dilaporkan mampu menurunkan produksi kopi robusta hingga 20% di Indonesia. Kekeringan juga terbukti menghambat pertumbuhan vegetatif bibit kopi robusta; Natasya (2022) mencatat penurunan jumlah daun, jumlah ruas, dan tinggi tanaman. Gangguan fisiologis ini berkaitan dengan terbatasnya ketersediaan air yang diperlukan dalam proses fotosintesis, penyerapan nitrogen, dan pengaturan kehilangan air. Permana *et al.* (2024) menunjukkan bahwa 90,91% bibit kopi robusta mengalami cekaman dan akhirnya mati setelah 75 hari tanpa penyiraman, menggambarkan tekanan lingkungan tinggi akibat defisit air.

Pembatasan air menyebabkan gangguan pada metabolisme tanaman, termasuk sintesis karbohidrat, penurunan aktivitas nitrat reduktase (ANR), hingga berkurangnya pembentukan protein dan klorofil a, b, serta total. Kondisi ini mendorong penutupan stomata dan penurunan laju transpirasi sebagai mekanisme mengurangi dehidrasi. Dalam kondisi cekaman berat, tanaman tidak hanya mengandalkan pertahanan enzimatis melainkan juga meningkatkan sistem non-enzimatis, salah satunya melalui akumulasi prolin. Senyawa ini berfungsi sebagai osmoprotektan, antioksidan, serta pelindung membran dan enzim terhadap kerusakan selama kekeringan. Respon fisiologis tanaman terhadap cekaman dapat diamati melalui variasi interval penyiraman 1, 3, 5, dan 7 hari yang telah terbukti efektif menstimulasi stres air (Ismoyojati dan Devi, 2024; Irawan *et al.*, 2019). Upaya mitigasi dapat dilakukan melalui aplikasi biochar yang diperkaya Zn dan Si. Biochar kulit kopi mampu memperbaiki struktur tanah, meningkatkan KTK, ketersediaan air, dan hara (Shalsabila *et al.*, 2017). Suplementasi Zn diperlukan sebagai kofaktor berbagai reaksi enzimatis (Marreiro *et al.*, 2017), sementara Si dilaporkan meningkatkan kinerja photosystem II yang berpengaruh terhadap efisiensi fotosintesis (Wisnubroto, 2023). berlangsung lebih efisien.

2. BAHAN DAN METODE

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Maret – September 2025. Penelitian dilakukan di Lahan Percobaan Kampus III Universitas Andalas di Nagari Sungai Kambut, Kecamatan Pulau Punjung, Kabupaten Dharmasraya, Sumatera Barat. Kegiatan pengamatan destruktif dilakukan di Laboratorium Kampus III Universitas Andalas. Adapun pengamatan mengenai performa Fisiologi dilaksanakan Laboratorium Fisiologi dan Pemuliaan Tanaman Kampus III Universitas Andalas. Penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) faktorial dengan dua faktor perlakuan. Masing-masing kombinasi perlakuan dari kedua faktor diulang sebanyak 8 kali, sehingga setiap kombinasi perlakuan terdiri dari delapan satuan percobaan berupa tanaman. Jumlah total kombinasi perlakuan yang digunakan adalah 20, sehingga total seluruh satuan percobaan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebanyak 160 tanaman.

Faktor pertama adalah dosis biochar yang diperkaya Zn dan Si dengan rincian sebagai berikut:

0 g/polybag biochar kulit kopi	(B0)
100 g/polybag biochar kulit kopi + Zn 10 mg/L & Si 35 mg/L	(B1)
200 g/polybag biochar kulit kopi + Zn 10 mg/L & Si 35 mg/L	(B2)

300 g/polybag biochar kulit kopi + Zn 10 mg/L & Si 35 mg/L (B3)

400 g/polybag biochar kulit kopi + Zn 10 mg/L & Si 35 mg/L (B4)

Faktor kedua adalah interval penyiraman yang terdiri dari 4 taraf terdiri dari:

Kontrol (Penyiraman setiap hari) (P0)

Penyiraman satu kali tiga hari (P1)

Penyiraman satu kali lima hari (P2)

Penyiraman satu kali tujuh hari (P3)

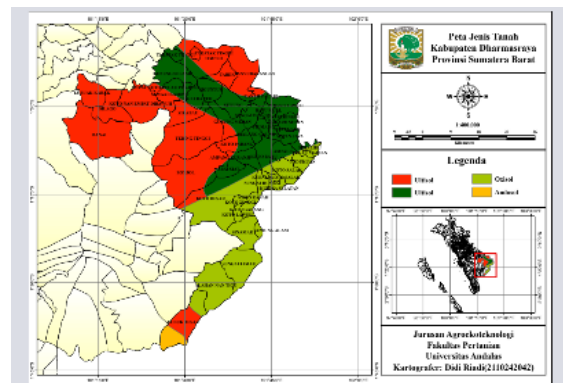
Pelaksanaan penelitian terdiri dari beberapa tahap antara lain persiapan lahan dan pembuatan biochar limbah kulit kopi didapatkan di PTL. Coffea Bean Solok Selatan, Sumatera Barat. Proses pembuatan biochar dari kulit buah kopi dimulai dengan menyiapkan sekitar 200 kg limbah kulit kopi yang sudah kering. Langkah selanjutnya adalah membersihkan limbah dari berbagai jenis material antara lain plastik, logam, tanah, serta bahan organik. Setelah itu, drum bekas yang sudah dibersihkan dan dipasang secara horizontal dengan empat pasang kaki penopang. Selanjutnya ruang pembakaran yang terletak dibawah drum tempat menyalakan kayu bakar sebagai sumber panas eksternal. Setelah itu masukkan limbah kulit kopi kedalam drum sebanyak 30 kg dan ditutup, proses pembakaran berlangsung selama $\pm 2-3$ jam hingga kulit kopi terlihat menghitam dan disetiap 15 menit sekali drum diputar dengan engkol sebanyak 5 kali untuk memaksimalkan limbah kulit kopi terbakar secara merata. Setelah proses pembakaran selesai, limbah yang sudah menjadi biochar dikeluarkan dan disiram dengan air hal ini bertujuan untuk menghentikan proses pembakaran dan mencegah biochar berubah menjadi tekstur abu. Kemudian biochar dikeringkan dengan cara dijemur untuk mencegah kelembaban berlebih yang dapat mengakibatkan pertumbuhan jamur. Meskipun pembuatan biochar menggunakan drum bekas memiliki keunggulan biaya yang murah, kemudahan dalam mendapatkan bahan, dan ramah lingkungan. Setelah dingin, biochar hasil pembakaran dimasukkan ke dalam polybag dimohogenkan dengan tanah dan unsur mikro Zn dan Si sesuai dengan dosis dan siap digunakan.

Selanjutnya dipilih bibit kopi hasil perbanyakan stek yang berusia 5 bulan. Setiap bibit perlakuan diberi perlebelan. Penyiraman dilakukan pada pagi hari sesuai dengan perlakuan interval penyiraman yang ditetapkan. Pemeliharaan yang dilakukan meliputi penyulaman (umur 7 hst untuk mengganti tanaman bibit kopi robusta yang tidak tumbuh), penyiangan secara manual dengan menggunakan tangan. Untuk pengendalian hama, insektisida diaplikasikan pada tanaman yang terserang (Rahmawati *et al.*, 2023). Kemudian dilakukan analisis tanah awal pada media tanam seperti pH, N (%), P (ppm), K (cmol/g), Ca (%), Na (cmol/kg), Mg (cmol/g), Zn-dd (ppm), Si (%), C (%), KTK (cmol/kg), Kejenuhan Basa (%). Pengambilan sampel destruktif dilakukan pada umur 10 minggu setelah pindah tanam (MSPT) untuk pengamatan parameter fisiologi (ANR, klorofil a/b, klorofil total, klorofil a dan b, kadar prolin, lebar bukaan stomata, serta laju transpirasi) dan parameter agronomi (bobot segar dan kering tajuk dan akar, luas daun, serta volume akar).

Bahan yang digunakan meliputi tissue, alumuniumfoil, plastic warp, dan kertas saringa quads, sarung tangan, masker gas respirator, aquades, aseton 80%, buffer fosfat Ph 7, NaNO₃, SA 1%, NED 0,02%, asam sulfosalisilat 3%, asam ninyhidrin, toluen, alumuniumfoil, plastic warp, dan kertas saringan quads, batu es. Serta alat yang digunakan terdiri dari timbangan, penggaris, alat tulis, meteran, timbangan digital, paranet 75%, ayakan ukuran 20 mesh, oven, tali rafia, map plastik, lux meter, jangka sorong, meteran, pancang, gembor, gelas ukur, penggaris, alat tulis, corong, lemari asam, spektrofotometer, mikroskop binokuler, termohigrometer, lux meter, jangka sorong, timbangan, timbangan analitik semi mikro (AND), lumpang alu, spatula, cawan, jangka sorong, botol cuci, botol kocok, gelas beaker, gelas ukur, tabung reaksi, kuvet, tabung film, mikropipet, cat kuku bening, cutter, silet atau scalpel, selotip bening, kertas kobald klorid, kertas

koran, plastik, kamera (DSRL), pH-meter (Metrohm), sentrifuge dingin (Heetich), spektrofotometri (Single Beam), atomice absorption spectrophotometer (AAS), flashsmart.

Pengambilan sampel tanah ultisol di IV Koto Pulau Punjung, Dharmasraya. Lalu dikering anginkan tanah ultisol, setelah itu ditimbang masing masing polybag 5 kg dengan ukuran polybag 30 x 35 cm. Analisis sifat kimia tanah awal dan tanah setelah inkubasi dengan biochar diperkaya Zn dan Si dilakukan untuk mengetahui perubahan kondisi media tanam sebelum aplikasi perlakuan. Paramater yang dianalisis meliputi pH, N-total, P-tersedia, dan K.



Gambar 1. Peta Jenis Tanah Kabupaten Dharmasraya

Tahap akhir, data dianalisis secara statistik menggunakan ANOVA pada Rancangan Acak Lengkap (RAL) dua faktorial, dilanjutkan uji DMRT 5% apabila berbeda nyata. Karakter iklim mikro disajikan dalam grafik, pertumbuhan tinggi tanaman, jumlah daun, dan diameter batang dalam kurva linear, hubungan antar variabel dianalisis dengan korelasi (korelogram), serta hasil pengamatan disajikan dalam kurva regresi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Tanah dan Biochar

Berdasarkan hasil analisis tanah, aplikasi biochar diperkaya Zn dan Si selama masa inkubasi mampu memperbaiki beberapa sifat kimia tanah dibandingkan kondisi tanah awal. Nilai pH tanah meningkat dari 4,42 (sangat masam) menjadi 4,55–5,87 (agak masam), dengan pH tertinggi diperoleh pada perlakuan B4 (400 g biochar). Peningkatan pH ini menunjukkan bahwa biochar berperan dalam menurunkan tingkat kemasaman tanah sehingga menciptakan kondisi yang lebih baik bagi pertumbuhan tanaman dan ketersediaan unsur hara. Hasil ini sejalan dengan penelitian Evizal dan Prasmatiwi (2023) yang melaporkan bahwa aplikasi biochar pada tanah masam mampu meningkatkan pH tanah hingga 1–2 unit akibat efek pengapuran dari mineral abu yang terkandung dalam biochar. Kandungan fosfor (P) juga mengalami peningkatan dari 2,36 ppm menjadi 2,88–10,89 ppm, dengan nilai tertinggi pada B4, mengindikasikan bahwa biochar mampu meningkatkan ketersediaan P melalui perbaikan sifat kimia tanah dan pengurangan fiksasi fosfor pada kondisi masam. Peningkatan fosfor tersebut diduga turut dipengaruhi oleh kandungan P yang terdapat pada bahan baku biochar kulit buah kopi. Menurut Fadilla et al. (2024), kandungan fosfor pada kulit buah kopi berkisar antara 0,1–0,3%, sehingga nilai yang diperoleh masih berada dalam kisaran yang relatif sesuai. Kandungan kalsium (Ca) meningkat cukup nyata dari 9,05% menjadi 13,48–24,40%, terutama pada perlakuan B3, yang menunjukkan kontribusi biochar sebagai sumber kation basa yang dapat meningkatkan kesuburan tanah. Sebaliknya, kadar kalium (K) cenderung berfluktuasi dan tidak menunjukkan peningkatan yang

konsisten, sedangkan kandungan nitrogen (N) relatif rendah pada sebagian besar perlakuan meskipun terjadi peningkatan pada B2. Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa inkubasi biochar diperkaya Zn dan Si efektif dalam memperbaiki kualitas tanah, terutama melalui peningkatan pH, fosfor tersedia, dan kalsium, dengan kecenderungan perbaikan yang semakin baik seiring meningkatnya dosis biochar yang diberikan.

Tabel 1. Hasil analisis tanah awal dan tanah setelah inkubasi

Parameter	Tanah Awal	Tanah Setelah Inkubasi dengan Biochar Diperkaya Zn+ Si				
		B0	B1	B2	B3	B4
pH	4,42 sm	4,55 sm	5,05 am	5,57 am	5,11 am	5,87 am
N (%)	0,18 sr	0,08 sr	0,06 sr	0,45 sr	0,16 sr	0,015 sr
P (ppm)	2,36 sr	2,88 sr	5,79 sr	5,10 sr	3,09 sr	10,89 r
K (cmol/g)	1,07 st	1,09 st	0,89 st	0,60 st	0,61 st	1,01 st
Ca (%)	9,05 s	9,43 s	13,48 t	20,18 t	24,40 t	18,49 t

Keterangan : Kriteria penilaian hasil analisis tanah merujuk pada (BPSI Tanah dan Pupuk, 2023), Sr (Sangat rendah), R (rendah), S (sedang), T (Tinggi), ST (Sangat Tinggi), SM (sangat masam), Am (Agak masam), B0 (tanpa perlakuan), B1 (biochar 100 g diperkaya Zn dan Si), B2 (biochar 200 g diperkaya Zn dan Si), B3 (biochar 300 g diperkaya Zn dan Si) dan B4 (biochar 400 g diperkaya Zn dan Si)

Analisis biochat kulit kopi dilakukan untuk mengetahui potensi limbah kulit kopi dalam pemanfaatannya sebagai biochar. Parameter yang diamati meliputi pH, N, P, K, C-Organik dan Kadar air.

Tabel 2. Hasil analisis biochar kulit kopi

Parameter	Satuan	Nilai	Standar Mutu	Kriteria
pH	-	8,5	5,5-11	Memenuhi
N	%	0,41		
P	%	0,22	<5	Memenuhi
K	%	0,13		
C-organik	%	17,52	>15	Memenuhi
Kadar Air	%	1,03	<5	Memenuhi

Sumber: *International Biochar Initiative (2010)*

Berdasarkan hasil analisis mutu biochar kulit buah kopi pada Tabel 2, diketahui bahwa biochar yang digunakan memiliki kualitas yang cukup baik dan sebagian besar telah memenuhi standar mutu menurut *International Biochar Initiative (2010)*. Hasil karakterisasi biochar kulit buah kopi menunjukkan bahwa biochar yang digunakan memiliki kualitas yang baik sebagai bahan pembenah tanah. Nilai pH biochar sebesar 6,8 tergolong netral dan memenuhi standar mutu pembenah tanah, yang mengindikasikan adanya peningkatan kandungan kation basa seperti K, Ca, dan Mg akibat proses pirolisis yang mengurangi senyawa asam organik. Kondisi ini menjadikan biochar berpotensi memperbaiki tanah masam, terutama tanah ultisol, melalui peningkatan pH tanah. Kandungan C-organik biochar sebesar 17,52% juga telah memenuhi persyaratan sebagai pembenah tanah karena berada di atas batas minimum yang ditetapkan, menunjukkan terbentuknya karbon stabil yang mampu memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas menahan air, serta mendukung aktivitas mikroorganisme tanah. Kandungan nitrogen biochar sebesar 0,41% tergolong rendah, yang diduga disebabkan oleh hilangnya nitrogen selama proses pirolisis dalam bentuk gas volatil, namun biochar tetap berperan dalam meningkatkan kapasitas tukar kation dan menyediakan habitat bagi mikroorganisme. Kandungan fosfor (0,22%) dan kalium (0,13%) juga relatif rendah, sejalan

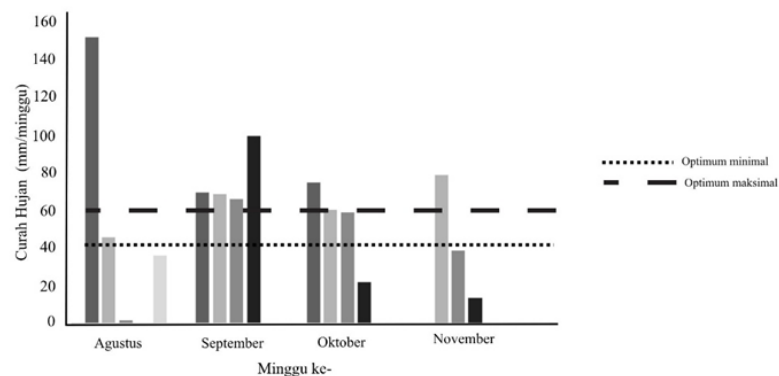
dengan karakteristik bahan baku kulit buah kopi yang secara alami tidak banyak menyimpan kedua unsur tersebut. Sementara itu, kadar air biochar sebesar 1,03% menunjukkan tingkat kestabilan penyimpanan yang baik dan mencerminkan proses pirolisis yang berlangsung efektif. Secara keseluruhan, karakteristik tersebut menunjukkan bahwa biochar kulit buah kopi layak digunakan sebagai pembenah tanah karena mampu memperbaiki kondisi fisik dan kimia tanah, terutama melalui peningkatan pH, penambahan karbon organik stabil, serta peningkatan kemampuan tanah dalam menyimpan air. Oleh karena itu, analisis tanah sebelum dan sesudah aplikasi biochar menjadi penting untuk mengevaluasi perubahan sifat tanah dan efektivitas biochar dalam meningkatkan kesuburan tanah.

Kondisi lingkungan penelitian

Menurut Dermawan *et al.* (2018) persyaratan karakteristik/kualitas lahan untuk tanaman kopi adalah sebagai berikut.

Tabel 3. Persyaratan karakteristik lahan tanaman kopi.

Persyaratan penggunaan/ karakteristik lahan	Kelas Kesesuaian Lahan			
	S1	S2	S3	N
Temprature rerata (°C)	20-24	24-28	18-20 28-32	<18 <32
Curah hujan (mm)	2000-3000	1.750-2000 3000-3.500	1.500-1.750 3.500-4000	<1.5000 <4.000
Kelembaban Udara	45-80	80-90 35-45	>90 30-35	<30



Gambar 2. Grafik pengamatan curah hujan

Berdasarkan grafik curah hujan selama periode pembibitan kopi robusta (20 minggu), curah hujan menunjukkan fluktuasi yang cukup tinggi dengan nilai berkisar antara 0,0–151,2 mm/minggu. Curah hujan tertinggi terjadi pada minggu pertama bulan Agustus sebesar 151,2 mm/minggu, sedangkan curah hujan terendah terjadi pada minggu kelima bulan September serta minggu keempat dan kelima bulan Oktober yang tidak mengalami hujan (0 mm/minggu). Jika dibandingkan dengan kisaran curah hujan optimum untuk pembibitan kopi robusta menurut Jarrod *et al.* (2021), yaitu 40–60 mm/minggu, sebagian besar minggu pengamatan berada di luar kisaran optimum, baik melebihi batas maksimum maupun berada di bawah batas minimum. Kondisi ini menunjukkan bahwa bibit kopi mengalami variasi ketersediaan air yang cukup besar

selama penelitian, sehingga berpotensi memengaruhi respons fisiologis dan biokimia tanaman yang diamati.

Karakter Fisiologi

Aktivitas Nitrat Reduktase (ANR)

Hasil sidik ragam menunjukkan bahwa pemberian biochar kulit kopi yang diperkaya Zn dan Si pada ANR tidak adanya interaksi kombinasi perlakuan. Namun faktor tunggal biochar berpengaruh nyata terhadap ANR bibit kopi robusta 10 MSPT. Hasil rata-rata ANR dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. ANR bibit kopi robusta umur 10 MSPT perlakuan dosis biochar kulit buah kopi yang diperkaya Zn dan Si dengan interval penyiraman

Biochar (g/polybag)	ANR
0	0,77
100	0,82
200	0,69
300	0,65
400	0,93
Interval Penyiraman (hari)	
0	0,64
3	0,70
5	0,88
7	0,86
KK= 12 %	(-)

Hasil sidik ragam menunjukkan bahwa tidak terdapat pengaruh nyata interaksi dosis biochar kulit kopi diperkaya Zn dan Si dengan interval penyiraman terhadap aktivitas nitrat reduktase (ANR) bibit kopi robusta umur 10 MSPT. Namun, faktor tunggal biochar memberikan pengaruh nyata terhadap ANR. Berdasarkan hasil rata-rata, perlakuan biochar 400 g/polybag menghasilkan nilai ANR tertinggi yaitu 0,93, sedangkan nilai terendah diperoleh pada dosis 300 g/polybag yaitu 0,65. Tingginya ANR pada pemberian biochar dosis tinggi diduga karena biochar mampu memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah sehingga meningkatkan ketersediaan unsur hara terutama nitrogen. Selain itu, Zn berfungsi sebagai kofaktor berbagai enzim yang terlibat dalam metabolisme nitrogen, termasuk enzim nitrat reduktase, sedangkan Si berperan dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman sehingga proses reduksi nitrat dapat berlangsung lebih optimal (Ende et al., 2022).

Pada faktor interval penyiraman, nilai ANR tertinggi diperoleh pada interval penyiraman 5 hari yaitu 0,88, sedangkan nilai terendah terdapat pada tanpa penyiraman yaitu 0,64. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi cekaman kekeringan yang terlalu berat dapat menurunkan aktivitas metabolisme tanaman, termasuk aktivitas enzim nitrat reduktase. Penyiraman yang cukup mampu menjaga ketersediaan air dalam jaringan tanaman sehingga penyerapan dan metabolisme nitrogen tetap berlangsung dengan baik. Dengan demikian, pemberian biochar diperkaya Zn dan Si serta pengaturan interval penyiraman yang tepat dapat membantu mempertahankan aktivitas fisiologis bibit kopi robusta pada kondisi cekaman kekeringan.

Rasio klorofil a/b

Hasil sidik ragam menunjukkan bahwa terdapat pengaruh nyata faktor tunggal biochar dan interval penyiraman terhadap kadar klorofil rasio bibit kopi robusta umur 10 MSPT, serta terjadi interaksi nyata antara kedua perlakuan tersebut.

Tabel 5. Rasio klorofil a dan b bibit kopi robusta umur 10 MSPT perlakuan dosis biochar kulit buah kopi yang diperkaya Zn dan Si dengan interval penyiraman

Dosis <i>biochar</i> (g/polybag) + Zn dan Si	10 MSPT				
	Interval Penyiraman (hari)				Rata-rata (μm)
	1	3	5	7	
0	0.60 a A	0.49 b A	1.42 c A	1.19 c A	0,93b
100	0.94 a B	0.86 a A	0.71 b A	0.76 c A	0,82b
200	0.92 a B	0.79 a B	1.20 b A	1.04 c A	0,99ab
300	1.09 a C	1.30 a B	1.29 b B	1.11 b B	1,20a
400	1.58 a D	1.21 b B	1.31 b C	0.75 c B	1,21 a
Rata-rata	1,03 AB	0,93 B	1,19 A	0,97 B	
KK = 5%					(+)

* Huruf kecil yang sama pada baris yang sama dan huruf besar yang sama pada kolom yang sama, menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji DMRT pada taraf signifikansi 95%. MSPT (minggu setelah pindah tanam), KK (nilai koefisien keragaman)

Hasil analisis menunjukkan bahwa dosis biochar diperkaya Zn dan Si berpengaruh nyata terhadap rasio klorofil a/b bibit kopi robusta umur 10 MSPT. Dosis 300 g polybag⁻¹ menghasilkan rasio klorofil a/b sebesar 1,20 (**a**) dan tidak berbeda nyata dengan dosis 400 g polybag⁻¹ (1,21 **a**) maupun 200 g polybag⁻¹ (0,99 **ab**), tetapi berbeda nyata dengan dosis 0 g polybag⁻¹ (0,93 **b**) dan 100 g polybag⁻¹ (0,82 **b**). Peningkatan rasio klorofil a/b pada dosis biochar yang lebih tinggi menunjukkan bahwa pemberian biochar diperkaya Zn dan Si mampu membantu mempertahankan keseimbangan pigmen fotosintesis pada kondisi cekaman air. Zn berperan dalam sintesis klorofil dan aktivasi berbagai enzim, sedangkan Si membantu menjaga stabilitas membran serta melindungi kloroplas dari kerusakan oksidatif, sehingga fungsi fotosintesis dapat berlangsung lebih baik.

Faktor interval penyiraman juga berpengaruh nyata terhadap rasio klorofil a/b. Penyiraman setiap 5 hari sekali menghasilkan rasio tertinggi, yaitu 1,19 (**A**) dan tidak berbeda nyata dengan penyiraman setiap hari sebesar 1,03 (**AB**), tetapi berbeda nyata dengan penyiraman 3 hari sekali sebesar 0,93 (**B**) dan penyiraman 7 hari sekali sebesar 0,97 (**B**). Hasil ini menunjukkan bahwa tanaman masih mampu mempertahankan keseimbangan antara klorofil a dan klorofil b pada tingkat cekaman sedang. Klorofil b berfungsi sebagai antena penangkap energi cahaya yang meneruskan energi ke klorofil a sebagai pusat reaksi fotosintesis, sehingga perubahan rasio klorofil a/b dapat mencerminkan mekanisme adaptasi tanaman terhadap cekaman kekeringan (Rosawanti, 2016). Rasio klorofil a/b yang relatif lebih tinggi menunjukkan

bahwa sistem penangkapan dan transfer energi cahaya masih berlangsung secara efektif sehingga efisiensi fotosintesis dapat dipertahankan meskipun terjadi keterbatasan air.

Total klorofil a dan b

Hasil sidik ragam menunjukkan bahwa terdapat pengaruh nyata faktor tunggal biochar dan interval penyiraman serta terdapat interaksi nyata antara kedua perlakuan terhadap rasio klorofil a/b bibit kopi robusta umur 10 MSPT.

Tabel 6. Kadar rasio klorofil a/b bibit kopi robusta umur 10 MSPT perlakuan dosis biochar kulit buah kopi yang diperkaya zn dan si dengan interval penyiraman.

Dosis <i>biochar</i> (g/polybag) + Zn dan Si	10 MSPT				
	Interval Penyiraman (hari)				Rata-rata (μm)
	1	3	5	7	
0	1,23a A	1,31a A	0,51c B	0,69bc C	0,93ab
100	0,95a AB	1,00a AB	1,16a A	1,12a A	1,06a
200	0,93ab A	1,16a A	0,73b B	0,82b AB	0,91ab
300	0,83a BC	0,68a BC	0,71a B	0,79a BC	0,75b
400	0,54b C	0,74b C	0,69a B	1,05a A	0,76b
Rata-rata	0,89 AB	0,98 A	0,76 B	0,89 AB	
KK = 5%					(+)

* Huruf kecil yang sama pada baris yang sama dan huruf besar yang sama pada kolom yang sama, menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji DMRT pada taraf signifikansi 95%. MSPT (minggu setelah pindah tanam), KK (nilai koefisien keragaman)

Pada faktor interval penyiraman, interval penyiraman 3 hari menghasilkan rata-rata kadar klorofil total tertinggi yaitu $0,98 \text{ mg g}^{-1}$ dengan notasi A, namun tidak berbeda nyata dengan interval penyiraman 1 hari dan 7 hari yang masing-masing memiliki nilai $0,89 \text{ mg g}^{-1}$ dengan notasi AB, serta berbeda nyata dengan interval penyiraman 5 hari yang menghasilkan nilai terendah yaitu $0,76 \text{ mg g}^{-1}$ dengan notasi B. Hal ini menunjukkan bahwa ketersediaan air yang cukup mampu mempertahankan pembentukan pigmen klorofil sehingga proses fotosintesis berlangsung lebih optimal. Air berperan penting dalam menjaga tekanan turgor sel, penyerapan unsur hara, serta berbagai proses metabolisme yang mendukung sintesis klorofil. Sebaliknya, berkurangnya ketersediaan air dapat menghambat pembentukan klorofil akibat terganggunya aktivitas fisiologis tanaman.

Interaksi antara biochar dan interval penyiraman menunjukkan bahwa kombinasi perlakuan biochar 0 g/polybag dengan interval penyiraman 3 hari sekali menghasilkan kadar klorofil total tertinggi yaitu $1,31 \text{ mg g}^{-1}$ dengan notasi aA, sedangkan kombinasi biochar 400 g/polybag dengan interval penyiraman 1 hari sekali menghasilkan nilai terendah yaitu $0,54 \text{ mg g}^{-1}$ dengan notasi bC. Tingginya kadar klorofil total pada kombinasi B0P1 menunjukkan bahwa pada kondisi

tersebut ketersediaan air masih cukup untuk mendukung sintesis dan mempertahankan stabilitas pigmen klorofil tanpa memerlukan tambahan biochar. Sebaliknya, rendahnya kadar klorofil total pada kombinasi B4P0 mengindikasikan bahwa pemberian biochar dosis tinggi tidak selalu meningkatkan kandungan klorofil tanaman. Dosis biochar yang terlalu tinggi diduga menyebabkan perubahan sifat kimia media tanam sehingga mengurangi efektivitas penyerapan unsur hara yang berperan dalam pembentukan klorofil. Hal ini sejalan dengan Mia et al. (2014) yang melaporkan bahwa aplikasi biochar dosis tinggi dapat menghambat pertumbuhan dan respons fisiologis tanaman. Secara umum, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa respons kadar klorofil total bibit kopi robusta terhadap biochar diperkaya Zn dan Si dipengaruhi oleh kondisi ketersediaan air, sehingga efektivitas biochar dalam mempertahankan kandungan klorofil berbeda pada setiap interval penyiraman.

Lebar Buka Stomata

Hasil sidik ragam menunjukkan bahwa faktor tunggal biochar dan interval penyiraman tidak memberikan pengaruh nyata terhadap lebar bukaan stomata bibit kopi robusta umur 10 MSPT, namun terdapat pengaruh nyata interaksi antara kedua perlakuan tersebut.

Tabel 7. Uji lanjut lebar bukaan stomata bibit kopi robusta umur 10 MSPT perlakuan dosis biochar kulit buah kopi yang diperkaya Zn dan Si dengan interval penyiraman.

Dosis biochar (g/polybag) + Zn dan Si	10 MSPT				
	Interval Penyiraman (hari)				
	1	3	5	7	Rata-rata (μm)
0	2,52ab A	3,67a A	1,62b C	2,13b AB	2,48
100	2,15a AB	2,72a AB	2,32a BC	2,80a A	2,5
200	2,27a A	2,76a A	1,38b C	2,14ab A	2,14
300	1,96b B	2,11b B	3,98a A	1,08b B	2,28
400	2,99a A	2,35a B	3,00a AB	2,50a A	2,71
Rata-rata	2,38	2,72	2,46	2,13	
KK =10 %					(+)

* Huruf kecil yang sama pada baris yang sama dan huruf besar yang sama pada kolom yang sama, menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji DMRT pada taraf signifikansi 95%. MSPT (minggu setelah pindah tanam), KK (nilai koefisien keragaman)

Pada faktor tunggal biochar, perlakuan dosis 400 g/polybag menghasilkan rata-rata lebar bukaan stomata tertinggi yaitu 2,71 μm , sedangkan dosis 200 g/polybag menghasilkan nilai terendah yaitu 2,14 μm . Sementara itu, pada faktor interval penyiraman, interval 3 hari menghasilkan rata-rata tertinggi yaitu 2,72 μm dan interval 7 hari menunjukkan nilai terendah yaitu 2,13 μm . Meskipun secara statistik tidak berbeda nyata, nilai tersebut menunjukkan adanya kecenderungan perubahan bukaan stomata akibat perbedaan ketersediaan air dan pemberian biochar diperkaya Zn dan Si.

Pada interaksi perlakuan, kombinasi biochar 300 g/polybag dengan interval penyiraman 5 hari menghasilkan lebar bukaan stomata tertinggi yaitu 3,98aA, berbeda nyata dengan kombinasi

biochar 300 g/polybag pada interval penyiraman 1 hari dan 7 hari yang masing-masing menghasilkan nilai 1,96bB dan 1,08bB. Sementara itu, kombinasi biochar 200 g/polybag dengan interval penyiraman 5 hari menghasilkan nilai terendah yaitu 1,38bC. Perbedaan notasi huruf kecil menunjukkan perbedaan nyata antar dosis biochar pada interval penyiraman yang sama, sedangkan huruf kapital menunjukkan perbedaan nyata antar interval penyiraman pada dosis biochar yang sama. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa respons bukaan stomata bibit kopi robusta dipengaruhi oleh keseimbangan antara ketersediaan air dan kemampuan biochar dalam mempertahankan kelembapan media tanam sehingga proses transpirasi dan pertukaran gas tetap berlangsung secara optimal pada kondisi cekaman kekeringan. Bukaan stomata yang lebih besar meningkatkan difusi CO₂ ke dalam daun sehingga mendukung fotosintesis, tetapi juga meningkatkan kehilangan air melalui transpirasi (Lawson & Blatt, 2014).

Laju Transpirasi

Hasil sidik ragam menunjukkan bahwa faktor tunggal biochar dan interval penyiraman berpengaruh nyata terhadap laju transpirasi bibit kopi robusta umur 10 MSPT, serta terdapat interaksi nyata antara kedua perlakuan tersebut.

Tabel 8. Rata-rata transpirasi bibit kopi robusta umur 10 MSPT perlakuan dosis biochar kulit buah kopi yang diperkaya Zn dan Si dengan interval penyiraman.

					Rata-Rata (g/cm ² /detik)
					2,84 b
					3,78 ab
					3,68 ab
					4,41 a
					2,89 b
Rata-rata	3,88	3,79	4,01	2,39	
	A	A	A	A	
KK =10 %					(+)

* Huruf kecil yang sama pada baris yang sama dan huruf besar yang sama pada kolom yang sama, menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji DMRT pada taraf signifikansi 95%. MSPT (minggu setelah pindah tanam), KK (nilai koefisien keragaman)

Pada faktor tunggal biochar, perlakuan dosis 300 g/polybag menghasilkan rata-rata laju transpirasi tertinggi yaitu 4,41 g/cm²/detik dengan notasi a, berbeda nyata dengan perlakuan kontrol sebesar 2,84 g/cm²/detik dan dosis 400 g/polybag sebesar 2,89 g/cm²/detik yang memiliki notasi b, namun tidak berbeda nyata dengan dosis 100 g/polybag dan 200 g/polybag yang masing-masing memiliki notasi ab. Tingginya laju transpirasi pada dosis 300 g/polybag diduga karena biochar mampu memperbaiki aerasi dan kapasitas menahan air media tanam sehingga aktivitas fisiologis tanaman berlangsung lebih optimal. Selain itu, kandungan Zn dan Si pada

biochar juga berperan dalam menjaga fungsi stomata dan efisiensi penggunaan air pada tanaman yang mengalami cekaman kekeringan.

Pada faktor interval penyiraman, interval penyiraman 5 hari menghasilkan rata-rata laju transpirasi tertinggi yaitu 4,01 g/cm²/detik dengan notasi A, tidak berbeda nyata dengan interval penyiraman 1 hari dan 3 hari yang masing-masing menghasilkan nilai 3,88 g/cm²/detik dan 3,79 g/cm²/detik dengan notasi A, namun berbeda nyata dengan interval penyiraman 7 hari yang menghasilkan nilai terendah yaitu 2,39 g/cm²/detik dengan notasi B. Interaksi perlakuan menunjukkan bahwa kombinasi biochar 100 g/polybag dengan interval penyiraman 5 hari menghasilkan laju transpirasi tertinggi yaitu 6,59 g/cm²/detik dengan notasi aA, sedangkan kombinasi tanpa biochar dengan interval penyiraman 7 hari menghasilkan nilai terendah yaitu 1,76 g/cm²/detik dengan notasi bA. Tingginya laju transpirasi pada kombinasi tersebut menunjukkan bahwa pemberian biochar pada dosis yang tepat mampu mempertahankan ketersediaan air dan mendukung aktivitas stomata sehingga proses transpirasi berlangsung lebih optimal. Sebaliknya, rendahnya laju transpirasi pada perlakuan tanpa biochar dengan interval penyiraman yang lebih lama mengindikasikan adanya respons adaptif tanaman melalui pengurangan kehilangan air akibat cekaman kekeringan. Hasil ini sejalan dengan pendapat Permana *et al.* (2024) yang menyatakan bahwa efektivitas biochar dalam meningkatkan respon fisiologi tanaman dipengaruhi oleh dosis yang diberikan serta ketersediaan air yang ditentukan oleh interval penyiraman.

Prolin

Hasil sidik ragam menunjukkan bahwa pemberian biochar kulit kopi yang diperkaya zn dan si pada prolin tidak adanya interaksi kombinasi perlakuan. Terdapat pengaruh nyata masing-masing faktor tunggal biochar dan interval penyiraman terhadap prolin bibit kopi robusta 10 MSPT. Hasil rata-rata prolin dapat dilihat pada tabel 9.

Tabel 9. Kadar prolin bibit kopi robusta umur 10 MSPT perlakuan dosis biochar kulit buah kopi yang diperkaya zn dan si dengan interval penyiraman.

Biochar (g/polybag)	Prolin (μmol/g)
0	0,68 a
100	0,37 b
200	0,33 b
300	0,30 b
400	0,28 b
Interval Penyiraman (hari)	
0	0.29
3	0,46
5	0,36
7	0,46
KK= 7 %	(-)

* Huruf kecil yang sama pada baris yang sama dan huruf besar yang sama pada kolom yang sama, menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji DMRT pada taraf signifikansi 95%. MSPT (minggu setelah pindah tanam), KK (nilai koefisien keragaman)

Pada faktor tunggal biochar, perlakuan kontrol tanpa biochar (0 g/polybag) menghasilkan kandungan prolin tertinggi yaitu 0,68 μmol/g dengan notasi a, berbeda nyata dengan seluruh

perlakuan biochar 100, 200, 300, dan 400 g/polybag yang masing-masing menghasilkan nilai 0,37; 0,33; 0,30; dan 0,28 $\mu\text{mol/g}$ dengan notasi b. Tingginya kandungan prolin pada perlakuan tanpa biochar menunjukkan bahwa tanaman mengalami tingkat cekaman yang lebih tinggi sehingga terjadi akumulasi prolin sebagai senyawa osmoregulator untuk mempertahankan keseimbangan sel tanaman pada kondisi kekeringan.

Pemberian biochar diperkaya Zn dan Si diduga mampu mengurangi tingkat stres tanaman sehingga akumulasi prolin menjadi lebih rendah dibandingkan kontrol. Biochar dapat memperbaiki kapasitas menahan air dan meningkatkan ketersediaan unsur hara dalam media tanam, sedangkan Zn dan Si berperan dalam meningkatkan ketahanan fisiologis tanaman terhadap cekaman kekeringan. Selain itu, Zn berperan sebagai kofaktor enzim dalam metabolisme nitrogen yang mendukung sintesis asam amino dan membantu meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman kekeringan (Timotiwu *et al.*, 2024). Pada faktor interval penyiraman, kandungan prolin tertinggi diperoleh pada interval penyiraman 3 hari dan 7 hari yaitu 0,46 $\mu\text{mol/g}$, sedangkan nilai terendah terdapat pada tanpa penyiraman yaitu 0,29 $\mu\text{mol/g}$. Namun karena tidak berbeda nyata, kondisi tersebut menunjukkan bahwa interval penyiraman belum memberikan pengaruh yang cukup besar terhadap perubahan kandungan prolin bibit kopi robusta pada umur 10 MSPT.

Karakter Agronomi

Tinggi Tanaman

Hasil analisis sidik ragam menunjukkan tidak adanya interaksi kombinasi biochar dan interval penyiraman maupun faktor Tunggal terhadap tinggi tanaman bibit kopi robusta 10 MSPT. Nilai rata-rata tinggi tanaman dapat dilihat pada tabel 10.

Tabel 10. Rata-rata tinggi tanaman bibit kopi robusta umur 10 MSPT perlakuan dosis biochar kulit buah kopi yang diperkaya Zn dan Si dengan interval penyiraman.

Dosis biochar (g/polybag)	Interval Penyiraman (hari)			
	0	3	5	7
	cm			
0	21,83	22,50	21,03	24,23
100	26,43	19,73	25,77	22,60
200	23,70	20,27	27,60	19,17
300	22,13	24,07	26,83	21,77
400	24,33	24,40	27,50	22,53
KK= 1 %				(-)

*) KK (%) menunjukkan nilai koefisien keragaman.

Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa biochar, interval penyiraman, dan interaksinya tidak berpengaruh nyata terhadap tinggi tanaman, yang ditegaskan oleh uji DMRT 5% karena seluruh perlakuan berada pada kelompok yang sama. Nilai koefisien keragaman yang rendah ($\pm 1\%$) menunjukkan pertumbuhan tanaman relatif seragam. Hal ini mengindikasikan bahwa perlakuan belum mampu memengaruhi pertumbuhan vegetatif, khususnya pemanjangan batang yang bersifat stabil selama kebutuhan dasar tanaman terpenuhi. Tidak signifikannya pengaruh perlakuan menunjukkan bahwa tanaman masih mampu beradaptasi terhadap stres melalui mekanisme fisiologi internal, seperti aktivitas enzim antioksidan dan akumulasi osmoregulator. Pertumbuhan tinggi yang seragam juga menunjukkan peran biochar yang diperkaya Zn dan Si sebagai mitigator cekaman kekeringan, serta dipengaruhi oleh faktor umur tanaman, sejalan

dengan temuan Handayani *et al.* (2024) yang melaporkan tidak adanya perbedaan tinggi bibit pada umur 2–10 MSPT.

Jumlah Daun (helai)

Hasil analisis sidik ragam menunjukkan tidak adanya interaksi kombinasi biochar dan interval penyiraman maupun faktor tunggal terhadap jumlah daun tanaman bibit kopi robusta 10 MSPT. Nilai rata-rata jumlah daun tanaman dapat dilihat pada tabel 11.

Tabel 11. Rata-rata jumlah daun bibit kopi robusta umur 10 MSPT perlakuan dosis biochar kulit buah kopi yang diperkaya Zn dan Si dengan interval penyiraman.

Dosis biochar (g/polybag)	Interval Penyiraman (hari)			
	0	3	5	7
0	5,67	6,33	5,67	6,67
100	10,67	6,33	7,67	8,00
200	7,33	8,00	7,33	7,00
300	8,00	10,33	6,67	7,67
400	6,00	7,00	5,67	6,33
KK= 2 %				(-)

*) KK (%) menunjukkan nilai koefisien keragaman.

Keseragaman jumlah daun ini mengindikasikan bahwa pada fase pertumbuhan yang diamati, pembentukan daun bibit kopi robusta lebih dipengaruhi oleh faktor genetik dan umur tanaman dibandingkan oleh perbedaan dosis biochar dan interval penyiraman. Selain itu, kemampuan tanaman dalam beradaptasi terhadap variasi ketersediaan air diduga masih cukup baik sehingga tidak menimbulkan perbedaan nyata dalam pembentukan daun. Dengan nilai koefisien keragaman (KK) sebesar 2%, data yang diperoleh memiliki tingkat ketelitian yang tinggi, sehingga hasil ini dapat diinterpretasikan bahwa perlakuan yang diberikan belum cukup kuat untuk memengaruhi jumlah daun secara signifikan pada umur pengamatan tersebut. Utami *et al.*, (2018) pada penelitiannya juga tidak menemukan pengaruh nyata terhadap jumlah daun pada bibit rentang usia 2 MSPT hingga 10 MSPT.

Diameter Batang (mm)

Hasil analisis sidik ragam menunjukkan tidak adanya interaksi kombinasi biochar dan interval penyiraman maupun faktor tunggal terhadap diameter batang tanaman bibit kopi robusta 10 MSPT. Nilai rata-rata diameter batang tanaman dapat dilihat pada tabel 12.

Tabel 12. Rata-rata diameter batang bibit kopi robusta umur 10 MSPT perlakuan dosis biochar kulit buah kopi yang diperkaya Zn dan Si dengan interval penyiraman.

Dosis biochar (g/polybag)	Interval Penyiraman (hari)			
	0	3	5	7
	mm			
0	4,53	4,43	3,70	4,40
100	3,50	3,27	4,37	4,67
200	3,77	4,40	4,37	4,87
300	3,37	4,87	4,10	3,67
400	3,53	4,57	3,87	4,63
KK= 2 %				(-)

*) KK (%) menunjukkan nilai koefisien keragaman.

Data menunjukkan bahwa diameter batang bibit kopi robusta berada pada kisaran sempit (3,27–4,87 mm) dan relatif stabil pada seluruh perlakuan, sehingga perbedaan antar kombinasi tidak signifikan secara statistik. Hal ini mengindikasikan bahwa pertumbuhan diameter batang pada fase ini belum responsif terhadap variasi dosis biochar dan interval penyiraman, serta lebih dipengaruhi oleh faktor internal dan umur tanaman. Temuan ini sejalan dengan Gustini (2021) yang melaporkan bahwa biochar kulit kopi tidak berpengaruh nyata terhadap pertumbuhan bibit kopi. Nilai koefisien keragaman sebesar 2% menunjukkan data yang presisi, sehingga dapat disimpulkan bahwa perlakuan belum memberikan pengaruh nyata terhadap diameter batang. Namun, penambahan silika pada biochar cenderung meningkatkan diameter batang pada perlakuan B4 dibandingkan B0, karena silika berperan dalam penguatan dinding sel dan pelapisan kutikula tanaman (Vasanthi et al., 2014).

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menyimpulkan sebagai berikut. Pemberian Biochar yang diperkaya Zn dan Si berpengaruh nyata pada respon fisiologi bibit kopi robusta total klorofil a dan b, rasio klorofil a/b, lebar bukaan stomata dan laju transpirasi. Tidak terdapat pengaruh nyata pada respon agronomi (tinggi tanaman, jumlah daun dan diameter batang). Biochar dosis tinggi (B4) merupakan dosis terbaik karena mampu mengoptimalkan respon fisiologi dan agronomi tanaman serta menekan respon stres akibat cekaman kekeringan pada usia 10 MSPT. Interval penyiraman P2 (cekaman kekeringan sedang) merupakan interval terbaik karena mampu mempertahankan respon fisiologi dan pertumbuhan agronomi yang optimal. Aplikasi biochar diperkaya Zn dan Si pada fase pembibitan kopi robusta berpotensi dikembangkan sebagai strategi mitigasi cekaman kekeringan, namun perlu diuji lebih lanjut hingga fase tanaman di lapangan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Andalas melalui skema pendanaan penelitian skripsi sarjana Tahun Anggaran 2025. Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih atas dukungan pendanaan yang telah diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Azmi, R dan Ari Handriatni. (2018). Pengaruh Macam Zat Pengatur Tumbuh Alami Terhadap Pertumbuhan Setek Beberapa Klon Kopi robusta (*Coffea canephora*). *BIOFARM Jurnal Ilmiah Pertanian*. 14(2), 71-81.
- Direktorat Jendral Perkebunan. (2023). *Statistik Perkebunan Jilid I 2022-2024*. Kementerian Pertanian. Republik Indonesia.
- Duong VUT, Khanh NM, Nguyen NTH, Phi NN, DucNT, Xo DH. 2017. Impact of Biochar on the WaterHolding Capacity and Moisture of Basalt and Grey Soil. *Journal of Science Ho Chi Minh City Open University*. 7(2): 36–43.
- Ende, S., Kadekoh., Fathurrahman, Darman, S & Lukman. (2022). Aktivitas Nitrat Reduktase (ANR) Tanaman Jagung pada Pola Tumpangsari yang Diberi Serasah Jagung-Kedelai serta Biochar di Lahan Suboptimal Sidondo Sulawesi Tengah. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia (JIPI)*, 27(4), 544-551.

- Evizal, R., & Prasmatiwi, F. E. (2023). Biochar: Pemanfaatan dan Aplikasi Praktis. *Jurnal Agrotropika*, 22(1), 1-12.
- Fadilla, A., Arahma, A., & Pakpahan, E. H. (2024). Cara Pengelolaan Limbah Kopi. *Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 4(2), 489–496.
- Gustini, T. (2021). *Pengaruh Pemberian Biochar Limbah Kulit Buah Kopi Pada Media Tanam Terhadap Pertumbuhan Bibit Kopi Liberika Tungkal Komposit*. Skripsi. Fakultas Pertanian. Universitas Jambi
- Hidayati, N. L., Rusmana., Yanny, R. F & Sulistyrone, E. (2024). Pengaruh Jenis dan Konsentrasi Pupuk Organik Cair Terhadap Pertumbuhan Bibit Alpukat. *Jurnal Ilmiah Membangun Desa dan Pertanian (JIMDP)*. 9(4), 344-358
- Insights, M. (2024). *Drought Stress Responses in Arabica Coffee Genotypes : Physiological and Metabolic Insights*. 1–17.
- Ismoyoati, R., & Devi, D. (2024). Pengaruh komposisi media tanam dan interval penyiraman terhadap laju pertumbuhan bibit kopi robusta (*Coffea canephora* L.). *Agrisintech: Journal of Agribusiness and Agrotechnology*, 5(2), 65–74. <https://doi.org/10.32502/agrisintech.v5i2.744>
- Jarrood, K., Byrareddy, V. M., Mushtaq, S., Craparo, A., & Porcel, M. (2021). *Temperature and Rainfall Impacts on Robusta Coffee Bean Characteristics*. *Climate Risk Management*, 32, 100281.
- Kurniawan, A., Haryono, A., Baskara, A & Tyasmoro, Y. (2016). Pengaruh Penggunaan Biochar Pada Media Tanam Terhadap Pertumbuhan Bibit Tanaman Tebu. *Jurnal Produksi Tanaman*. 4(2), 153-160.
- Marreiro, D. D. N., Cruz, K. J. C., Morais, J. B. S., Beserra, J. B., Severo, J. S., & De Oliveira, A. R. S. (2017). *Zinc and Oxidative Stress: Current Mechanisms*. *Antioxidants*, 6(2), 24. <https://doi.org/10.3390/antiox6020024>
- Mia, S., Van Groenigen, J. W., Van de voorde, T. F. J., Oram, N. J., Bezeemer, T. M., Mommer, L & Jeffery, S. (2014). *Biochar Application rate affects biological nitrogen fixation in red clover conditional on potassium availability*. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 191, 83-91.
- Natasya, R. A. (2022). *Pupuk Organik Cair (POC) Air Cucian Ikan Terhadap Pertumbuhan Kangkung (Ipomoea reptans Poir.) Pada Sistem Hidroponik Sebagai Penunjang Praktikum*[https://repository.arraniry.ac.id/id/eprint/23091/%0Ahttps://repository.arraniry.ac.id/id/eprint/23091/1/Riezky Amalia Natasya%2C 180207044%2C FTK%2C PBL%2C 081264813187.pdf](https://repository.arraniry.ac.id/id/eprint/23091/%0Ahttps://repository.arraniry.ac.id/id/eprint/23091/1/Riezky%20Amalia%20Natasya%20180207044%20FTK%20PBL%20081264813187.pdf)
- Permana, I., Nurcahya, I., Hakim, A., Mustofa, R. F., & Kumala, T. (2024). *Jurnal Biologi Tropis Improving Fertilization Efficiency through Biochar Application and the Development of Superior Varieties of Red Chili Peppers*.
- Rahmawati, E. D., Rahmadhini, N., & Wuryandari, Y. (2023). Pengaruh Pemberian Pestisida Nabati Tanaman Tembakau dan Brotowali terhadap Tingkat Kerusakan Hama Kutu Hijau pada Tanaman Kopi Varietas Robusta di Desa Dompok, Kecamatan Bendungan Kabupaten Trenggalek. *Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi*, 23(1), 949. <https://doi.org/10.33087/jiubj.v23i1.3020>
- Rosawanti, P. (2016). Pengaruh cekaman kekeringan terhadap kandungan klorofil dan prolin daun kedelai. *Anterior Jurnal*, 15(2), 172–179.
- Lawson, T., & Blatt, M. R. (2014). Stomatal size, speed, and responsiveness impact on photosynthesis and water use efficiency. *Plant Physiology*, 164(4), 1556–1570.
- Sakiroh dan Ibrahim, M.S.D. (2020). Karakterisasi Morfologi, Anatomi dan Fisiologi Tujuh klon unggul kopi Robusta. *Jurnal Tanaman Industri dan Penyegar*. 7(2), 73–82.

- Shalsabila, F., Prijono, S., & Kusuma, Z. (2017). Pengaruh Aplikasi Biochar Kulit Kakao Terhadap Kemantapan Agregat dan Produksi Tanaman Jagung pada Ultisol Lampung Timur. *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, 4(1), 473–480. <http://jtsl.ub.ac.id>
- Santi, L.P., Goenadi, D.H. (2010). *Pemanfaatan biochar Sebagai Pembawa Mikroba untuk Pemantapan Agregat Tanah Ultisol dari Taman Bogo-Lampung*. Menara Perkebunan. 78(2): 52–60
- Siagian, I P., Siagian, B & Ginting, J. (2014). Pertumbuhan Bibit Kakao (*Theobroma cacao* L.) Dengan Pemberian Pupuk NPK dan Hayati. *Jurnal Online Agroekoteknologi*. 2(2).
- Timotiwu, P. B., Hadi, M. S., Maharani, D., & Pramudya, G. M. (2024). *Pengaruh Aplikasi Zinc Pada Jagung Terhadap Pertumbuhan, Produksi, Mutu Benih, Dan Kandungan Zinc Dalam Benih*. *Jurnal Agro*. 11(1), 147–160.
- Utami, A., Pinem, A. I & Syahputra, S. (2018) *Pengaruh Zat Pengatur Tumbuh dan Bio Urin Sapi Terhadap Pertumbuhan Bibit Kakao*. *Agrium*. 21 (2), 173-177.
- Vasanthi N, Saleena L.M, Raj S.A. 2014. *Silicon in crop production and crop protection -A review*. *Agricultural Reviews*, 35(1):14. DOI: <https://doi.org/10.5958/j.0976> 0741.35.1.002
- Wisnubroto, M. P., Armansyah, A., Anwar, A., & Suhendra, D. (2024). Eksplorasi dan Identifikasi Fungi Mikoriza arbuscular Arbuskular (FMA) serta Karakteristik Tanah Lahan Pasca Tambang Batu Bara pada Tingkat Kelerengan Berbeda di Kecamatan Talawi, Kota Sawahlunto. *Jurnal Agrikultura*, 35(1), 112-125