

perpus 14

SKRIPSI FAUZI

 CEK HELMI 23 SEP 2026

 CEK TURNITIN

 INSTIPER

Document Details

Submission ID

trn:oid::1:3658610458

Submission Date

Sep 24, 2026, 11:46 AM GMT+7

Download Date

Sep 24, 2026, 11:48 AM GMT+7

File Name

SKRIPSI_FAUZI_GINTING_23553__SPKS_E_2.docx

File Size

167.5 KB

58 Pages

12,090 Words

71,859 Characters

21% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Filtered from the Report

- Bibliography
- Quoted Text

Top Sources

- 20%  Internet sources
- 10%  Publications
- 5%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Top Sources

20% Internet sources
10% Publications
5% Submitted works (Student Papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Internet	eprints.instiperjogja.ac.id	5%
2	Internet	journal.instiperjogja.ac.id	4%
3	Internet	repository.uma.ac.id	1%
4	Internet	docplayer.info	<1%
5	Internet	ejournal.unisi.ac.id	<1%
6	Student papers	Universitas Islam Riau	<1%
7	Internet	repository.istn.ac.id	<1%
8	Internet	123dok.com	<1%
9	Student papers	Sriwijaya University	<1%
10	Internet	journal.ipb.ac.id	<1%
11	Internet	core.ac.uk	<1%

12	Internet	jurnalagriepat.wordpress.com	<1%
13	Internet	www.scribd.com	<1%
14	Internet	media.neliti.com	<1%
15	Internet	repositori.uma.ac.id	<1%
16	Internet	repositori.unibos.ac.id	<1%
17	Internet	ejurnal.litbang.pertanian.go.id	<1%
18	Internet	jurnal.iain-antasari.ac.id	<1%
19	Internet	jurnal.umsu.ac.id	<1%
20	Internet	tr.scribd.com	<1%
21	Internet	es.scribd.com	<1%
22	Internet	jurnal.unsyiah.ac.id	<1%
23	Student papers	Binus University International	<1%
24	Internet	mikorizadanfosfat-semangat.blogspot.com	<1%
25	Internet	repositori.usu.ac.id	<1%

26	Student papers	Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan	<1%
27	Internet	adoc.pub	<1%
28	Internet	e-journal.janabadra.ac.id	<1%
29	Internet	repo.unand.ac.id	<1%
30	Internet	repository.unej.ac.id	<1%
31	Student papers	Universitas Muria Kudus	<1%
32	Internet	srs-ssms.com	<1%
33	Student papers	Universitas Islam Indonesia	<1%
34	Internet	docobook.com	<1%
35	Internet	fatkhur.id	<1%
36	Internet	text-id.123dok.com	<1%
37	Publication	Eka Listia, Lisnawita Lisnawita, Fadilla Sapalina, Rizki Desika Putri Pane, Fandi Hid...	<1%
38	Publication	Inayah Armalia, Sri Wahyuningsih, Tundjung Tripeni Handayani, Mahfut Mahfut. ...	<1%
39	Internet	repository.uinjkt.ac.id	<1%

40	Internet	repository.uir.ac.id	<1%
41	Internet	satrio-u.blogspot.com	<1%
42	Publication	Fahrizal Hazra, Fatimah Nur Istiqomah, Ardina Nurul Fadilla. "Potensi Fumyco (Fu...	<1%
43	Student papers	Padjadjaran University	<1%
44	Student papers	UPN Veteran Yogyakarta	<1%
45	Student papers	University of Muhammadiyah Malang	<1%
46	Internet	ejournal.iainbukittinggi.ac.id	<1%
47	Publication	Rahmawati Lutfiah, Eddy Santoso, Maulidi Maulidi. "PENGARUH PEMBERIAN PUP...	<1%
48	Publication	Ratna Ayu Andita, Sarno Sarno, Muhajir Utomo, Abdul Kadir Salam. "PENGARUH S...	<1%
49	Internet	digilib.unhas.ac.id	<1%
50	Internet	e-journal.biologi.lipi.go.id	<1%
51	Internet	mutiarigarden.com	<1%
52	Internet	prajaiswara.jambiprov.go.id	<1%
53	Internet	digilib.unila.ac.id	<1%

54	Internet	etd.repository.ugm.ac.id	<1%
55	Internet	journal.cwe.ac.id	<1%
56	Internet	journal.uniga.ac.id	<1%
57	Internet	online-journal.unja.ac.id	<1%
58	Internet	repository.ulb.ac.id	<1%
59	Internet	www.slideshare.net	<1%
60	Publication	F. Riil Salsabila, Anna Kusumawati. "Respons Sifat Kimia Tanah terhadap Pember..."	<1%
61	Publication	Yoneta Lake, Eduardus Yosef Neonbeni, Deseriana Bria, Hyldegardis Naisali. "THE..."	<1%
62	Internet	jurnal.instiperjogja.ac.id	<1%
63	Internet	jurnal.unsur.ac.id	<1%
64	Internet	rakhmatstw.blogspot.com	<1%
65	Internet	sriyantostipap.blogspot.com	<1%
66	Internet	worldwidescience.org	<1%
67	Publication	Ajeng Embri Legawati, Rahmad Jumadi, Wiharyanti Nur Lailiyah. "PERTUMBUHAN..."	<1%

68	Publication	Fera Santika, Iwan Setiawan, Evahelda Evahelda. "SERAPAN TENAGA TENAGA KER...	<1%
69	Publication	Herdhata Agusta, Valdi Muhamad Rafiansyah Siregar, Siswanto Siswanto. "Aplika...	<1%
70	Publication	Nur Kholiq, Liman Liman, Erwanto Erwanto, Muhtarudin Muhtarudin. "PENGARU...	<1%
71	Publication	Ridwan Ridwan, Tri Handayani, Indira Riastiwi, Witjaksono Witjaksono. "Tetraploi...	<1%
72	Internet	cangkulmania.blogspot.com	<1%
73	Internet	edukasimu.org	<1%
74	Internet	ejournal.forda-mof.org	<1%
75	Internet	ejournalwiraraja.com	<1%
76	Internet	jurnal.untan.ac.id	<1%
77	Internet	mikorizalamongan.wordpress.com	<1%
78	Internet	repository.uin-suska.ac.id	<1%
79	Internet	repository.unja.ac.id	<1%
80	Internet	www.politeknikmbp.ac.id	<1%
81	Internet	jurnal.unprimdn.ac.id	<1%

82

Internet

puputwawan.wordpress.com

<1%

INTISARI

Penelitian mengenai kombinasi pupuk fosfat (SP-36) dan Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA) pada pembibitan kelapa sawit di *main nursery* menunjukkan bahwa pemanfaatan lahan marginal Ultisol yang masam dan rendah ketersediaan P dapat diatasi secara efektif melalui sinergi kedua perlakuan tersebut. Berdasarkan percobaan menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) faktorial di KP2 INSTIPER Yogyakarta, interaksi keduanya terbukti memberikan pengaruh nyata terhadap panjang dan volume akar, di mana ketiadaan pupuk P dengan 50 gram mikoriza menghasilkan akar terpanjang (62,10 cm) sebagai bentuk adaptasi *root foraging*, sedangkan kombinasi 5 gram pupuk P dengan 50 gram mikoriza menghasilkan volume akar terbesar (60,00 ml). Secara mandiri, inokulasi mikoriza juga mampu menaikkan pH tanah Ultisol hingga 1,13 poin mendekati netral melalui aktivitas hifa eksternal di rizosfer. Kendati interaksi kedua faktor tidak berpengaruh nyata terhadap parameter pertumbuhan fisik vegetatif dan biomassa secara statistik, secara deskriptif kombinasi 5 gram pupuk P dan 30 gram mikoriza mencatatkan rerata pertumbuhan fisik terbaik, sementara kombinasi 5 gram pupuk P dan 50 gram mikoriza menghasilkan serapan hara P daun tertinggi sebesar 0,90%, sehingga disimpulkan bahwa integrasi 5 gram pupuk P dan mikoriza efektif meningkatkan pertumbuhan, serapan hara, serta kualitas tanah Ultisol.

Yogyakarta 22 september 2026

Mengetahui Dosen pembimbing I

Fariha Wilisiani, S.Si. M.Biotech. Ph.D

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) merupakan komoditas unggulan yang memainkan peran penting dalam menopang perekonomian Indonesia. Selain menjadi sumber utama minyak nabati dunia, kelapa sawit juga berkontribusi besar terhadap pertumbuhan ekonomi nasional, penciptaan lapangan kerja, dan pembangunan wilayah pedesaan. Indonesia secara konsisten menempati posisi sebagai produsen dan eksportir minyak sawit terbesar di dunia, dengan pangsa pasar global mencapai lebih dari 55% pada periode 2023–2024 (Respati, 2024). Berdasarkan data Badan Pusat Statistik dan Kementerian Pertanian, luas areal perkebunan kelapa sawit nasional pada tahun 2024 mencapai sekitar 16,8 juta hektare, tersebar di 25 provinsi, dengan produksi minyak sawit mentah (CPO) sebesar 47,47 juta ton. Sentra produksi utama meliputi Riau, Kalimantan Tengah, Kalimantan Barat, Sumatera Utara, Kalimantan Timur, Sumatera Selatan, dan Jambi.

Namun demikian, di balik kontribusinya yang besar, industri kelapa sawit menghadapi tantangan serius terkait keberlanjutan, terutama akibat penggunaan pupuk anorganik secara intensif yang berdampak negatif terhadap kesuburan tanah dan lingkungan. Penggunaan pupuk kimia berlebihan dapat menyebabkan penurunan kandungan bahan organik dan mikroorganisme di dalam tanah, kapasitas tukar kation, serta menurunkan pH tanah. Tantangan ini semakin kompleks karena sebagian besar perkebunan berada di lahan marginal seperti tanah ultisol, yang memiliki sifat kimia kurang mendukung pertumbuhan tanaman, seperti pH sangat masam dan kandungan hara makro

yang rendah. Untuk menjawab permasalahan tersebut, pendekatan pemupukan berkelanjutan melalui pemanfaatan bahan organik menjadi semakin penting. Bahan organik seperti kompos dari pelepah dan tandan kosong, pupuk kandang, serta limbah pabrik kelapa sawit, termasuk agen hayati seperti mikoriza dan *Trichoderma*, terbukti mampu memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah, meningkatkan efisiensi serapan hara, dan mendukung pertumbuhan serta produktivitas tanaman kelapa sawit secara berkelanjutan (Harefa *et al.*, 2024).

Salah satu faktor penentu keberhasilan budidaya kelapa sawit adalah kualitas bibit di *main nursery*. Kualitas bibit yang sehat dengan pertumbuhan optimal akan sangat menentukan produktivitas tanaman di lapangan. Pertumbuhan bibit kelapa sawit sangat dipengaruhi oleh ketersediaan unsur hara, khususnya fosfor (P). Fosfor merupakan unsur hara makro esensial kedua setelah nitrogen yang berperan dalam pembentukan energi Adenosin Trifosfat (ATP), serta perkembangan akar dan daun pada tanaman kekurangan P dapat menyebabkan pertumbuhan terhambat, daun berwarna hijau tua, dan hasil produksi rendah (Purwati, 2013). Namun, Salah satu unsur hara yang ketersediaannya sangat terbatas di tanah ultisol adalah unsur P yang merupakan hara makro esensial kedua setelah N. Fosfor berperan penting dalam berbagai proses fisiologis tanaman, seperti pembentukan energi ATP, serta perkembangan sistem perakaran dan daun. Namun, tingginya kandungan Al (*Aluminium*) dan Fe (*ferrum*) pada tanah ultisol menyebabkan terjadinya fiksasi unsur P, sehingga unsur P yang diberikan melalui pemupukan menjadi tidak larut dan sulit tersedia bagi tanaman. Untuk mengatasi keterbatasan ini,

petani umumnya menggunakan pupuk kimia fosfat seperti SP-36 atau TSP (*Triple Super Phosphate*), yang mengandung P dalam bentuk lebih mudah diserap tanaman.

Aplikasi pupuk fosfat biasanya dilakukan dengan dosis dan metode tertentu, misalnya penempatan pupuk di sekitar zona perakaran agar efisiensinya meningkat. Meski demikian, efektivitas pemberian pupuk fosfat di tanah masam tetap terbatas karena sebagian besar unsur P yang diberikan dapat segera terikat oleh Al dan Fe. Oleh karena itu, strategi pemupukan terpadu yang mengombinasikan pupuk kimia fosfat dengan bahan organik dan agen hayati seperti mikoriza arbuskular menjadi pendekatan yang lebih berkelanjutan. Kombinasi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi serapan hara, tetapi juga memperbaiki sifat kimia tanah serta mendukung pertumbuhan bibit kelapa sawit secara optimal di lahan marginal (Nurjaya, 2017). Mikoriza arbuskular bersimbiosis dengan akar tanaman, memperluas daerah jelajah akar melalui hifa eksternal, dan meningkatkan kemampuan tanaman menyerap hara, terutama unsur P. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa AMF (*Arbuskular Mycorrhizal Fungi*) efektif dalam meningkatkan serapan hara makro, khususnya unsur P, serta hara mikro pada lahan marginal yang miskin unsur hara, sehingga berpotensi besar mendukung keberhasilan budidaya kelapa sawit di tanah ultisol.

Beberapa penelitian mendukung peran mikoriza dalam meningkatkan efisiensi pupuk fosfat. Penelitian (Lestari *et al.*, 2018) melaporkan bahwa kombinasi mikoriza arbuskular dengan pupuk SP-36 mampu meningkatkan

arsitektur akar dan pertumbuhan bibit kelapa sawit di *main nursery*. Penelitian lain oleh Same, (2011) menunjukkan bahwa aplikasi AMF dengan berbagai dosis pupuk fosfat pada tanah ultisol dapat meningkatkan serapan P dan pertumbuhan bibit kelapa sawit secara signifikan. Hal serupa juga dilaporkan oleh (Palasta & Rini, 2017), bahwa kombinasi AMF dengan pupuk fosfat mampu mengurangi ketergantungan terhadap pupuk anorganik sekaligus menekan biaya produksi.

Dengan demikian, kombinasi antara pemberian pupuk fosfat dan mikoriza arbuskular memiliki potensi dapat menjadi strategi efektif untuk meningkatkan ketersediaan unsur P pada tanah ultisol. Kombinasi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi pemupukan, tetapi juga mendukung pertumbuhan bibit kelapa sawit yang lebih sehat dan produktif. Berdasarkan uraian tersebut, perlu dilakukan penelitian terkait “pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap pertumbuhan dan serapan hara bibit kelapa sawit di *main nursery* pada media tanah ultisol.”

B. Rumusan Masalah

Penelitian ini dilatar belakangi oleh rendahnya ketersediaan unsur hara fosfor (P) pada tanah ultisol. Kondisi tersebut berpotensi menghambat pertumbuhan bibit kelapa sawit di *main nursery*. Mikoriza arbuskular berfungsi memperluas daerah jelajah akar melalui jaringan hifa sehingga mampu meningkatkan efisiensi penyerapan hara, khususnya fosfor. Maka perlu dilakukan penelitian mengenai pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap pertumbuhan dan serapan hara bibit kelapa sawit pada media tanah ultisol.

C. Tujuan Penelitian

1. Menganalisis pengaruh interaksi kombinasi pupuk P dan Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA) terhadap pertumbuhan vegetatif, serapan hara P daun bibit kelapa sawit fase *main nursery*, serta perubahan pH tanah Ultisol.
2. Menganalisis pengaruh faktor tunggal dosis pupuk P terhadap pertumbuhan vegetatif, serapan hara P daun bibit kelapa sawit fase *main nursery*, serta perubahan pH tanah Ultisol.
3. Menganalisis pengaruh faktor tunggal inokulasi Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA) terhadap pertumbuhan vegetatif, serapan hara P daun bibit kelapa sawit fase *main nursery*, serta perubahan pH tanah Ultisol.

D. Manfaat Penelitian

1. Penelitian ini diharapkan dapat memperluas wawasan penulis dalam bidang pertanian, khususnya mengenai pemanfaatan mikoriza arbuskular pada kelapa sawit maupun tanaman lain.
2. Hasil penelitian dapat menjadi referensi bagi praktisi pertanian, terutama di perkebunan kelapa sawit, dalam mengoptimalkan penggunaan pupuk organik berbasis mikoriza arbuskular untuk meningkatkan penyerapan P pada tanah marginal seperti ultisol sekaligus mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia.
3. Penelitian ini juga berfungsi sebagai data pendukung dalam penyusunan skripsi, yang merupakan salah satu persyaratan akademik untuk memperoleh gelar sarjana di Fakultas Pertanian INSTIPER Yogyakarta.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Tanaman Kelapa Sawit

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) adalah tanaman perkebunan penting yang menghasilkan minyak untuk pangan, industri, dan bahan bakar nabati (biodiesel). Indonesia merupakan penghasil kedua terbesar di dunia setelah Malaysia. Menurut Pahan (2010), klasifikasi tanaman ini adalah: Divisi: *Embryophyta* Siphonagama, Kelas: *Angiospermae*, Ordo: *Monocotyledonae*, Famili: *Arecaceae*, Spesies: *Elaeis guineensis* Jacq. Sebagai tanaman monokotil, sistem perakarannya berupa serabut yang menjalar hingga kedalaman 8–16 meter. Akar primer berkembang dari radikula dan bercabang menjadi sekunder, tersier, serta kuarternier dengan diameter 0,1–10 mm, aktif menyerap air dan unsur hara terutama pada radius 2–3 meter dari batang (Syahirah & Cahyati, 2021). Batang tumbuh tegak tanpa cabang dan kambium, pada fase dewasa mencapai 15–24 meter. Pada fase muda pelepah menutupi batang lalu terlepas sehingga permukaan beruas berwarna gelap.

Daun majemuk menyirip memiliki pelepah panjang 7,5–9 meter dengan 250–400 anak daun per helai, tersusun spiral membentuk tajuk lebar yang efisien menangkap cahaya. Daun muda berwarna kuning pucat sedangkan yang tua hijau tua, dengan pelepah berduri di kedua sisi. Bunga bersifat monoecious diclin bunga jantan dan betina terpisah namun berada pada satu pohon atau satu rumah dan penyerbukan berlangsung secara silang oleh angin atau serangga (*Eladobius kamerunikus*). Buah tumbuh dalam tandan besar dengan warna hijau, ungu, hingga merah sesuai tingkat kematangan. Struktur

buah meliputi eksokarp, mesokarp kaya minyak, endokarp, serta kernel yang juga menghasilkan minyak berkualitas tinggi (Idris *et al.*, 2020).

68

Berdasarkan ketebalan tempurung dibedakan varietas Dura (tempurung tebal, daging tipis), Pisifera (tempurung sangat tipis, bunga betina steril), dan Tenera (persilangan Dura × Pisifera dengan daging tebal, tempurung tipis, produktivitas tinggi), di mana Tenera banyak dipilih sebagai bibit unggul karena hasil minyak per tandan lebih besar. Morfologi yang kompleks dan adaptif terutama sistem perakaran memungkinkan tumbuh optimal pada berbagai kondisi lahan termasuk tanah marginal seperti ultisol, dan hubungan simbiotik dengan mikoriza arbuskular meningkatkan efisiensi penyerapan hara pada tanah kurang subur (Watoni *et al.*, 2020).

1

Kelapa sawit tumbuh optimal pada ketinggian 0–500 mdpl, meskipun masih bertahan hingga 700–1.500 mdpl tapi dengan penurunan hasil. Curah hujan ideal 1.800–3.000 mm/tahun yang merata dan periode kering tidak lebih dari tiga bulan (<100 mm/bulan). Suhu yang sesuai berkisar 24–30°C, kelembapan relatif 80–90%, serta penyinaran penuh 5–7 jam/hari (Tani, 2025). Media tanam harus dalam, gembur, subur, dan berdrainase baik; jenis lahan yang cocok antara lain Ultisol, Latosol, Alluvial, dan Regosol, dengan pH optimal 5,5–7,0, kandungan bahan organik tinggi, kapasitas tukar kation sedang–tinggi, dan kejenuhan basa >35%. Topografi landai 0–8%, struktur remah, serta ketersediaan air yang cukup tanpa genangan mendukung pertumbuhan. Genangan singkat menyebabkan kondisi anaerobik yang merusak akar, sedangkan kekeringan menghambat pembelahan sel,

4

penyerapan unsur, dan fotosintesis, terutama pada fase awal. Pada lahan masam dan miskin hara seperti Ultisol, simbiosis dengan mikoriza arbuskular sangat penting untuk meningkatkan ketersediaan fosfor dan ketahanan tanaman terhadap cekaman lingkungan.

B. Pembibitan

Pembibitan kelapa sawit merupakan tahap fundamental yang menentukan keberhasilan budidaya di lapangan. Menurut Susmawati (2016), pembibitan dilakukan melalui dua fase utama, yaitu *pre nursery* (PN) dan *main nursery* (MN). Pada tahap PN, kecambah ditanam dalam polybag kecil berukuran 10×5 cm selama 3 bulan dengan media campuran topsoil dan pasir (2:1) yang telah disterilkan untuk mencegah patogen. Bibit diberi naungan untuk mengurangi stres akibat radiasi matahari langsung serta dilakukan penyiraman rutin. Setelah berumur 3 bulan dan memiliki 3–5 helai daun, bibit dipindahkan ke MN, yaitu polybag besar berukuran 40×40 cm, untuk pemeliharaan lanjutan selama 8–10 bulan hingga siap tanam di lapangan. Pada tahap MN, media tanam biasanya berupa campuran topsoil, bahan organik, dan pasir (2:1:1), dengan pemupukan bertahap menggunakan pupuk NPK sesuai umur bibit. Seleksi bibit merupakan aspek penting dalam pembibitan (Susmawati, 2016).

Faktor nutrisi juga berperan besar dalam mendukung pertumbuhan vegetatif awal. Penelitian (Basri, 2018) melaporkan bahwa kombinasi pupuk NPK dengan pupuk hayati mikoriza pada fase pembibitan dapat meningkatkan tinggi bibit, diameter batang, jumlah daun, bobot kering tajuk dan akar, serta

51 infektivitas mikoriza pada akar. Inokulasi mikoriza arbuskular sejak awal pembibitan terbukti mempercepat terbentuknya simbiosis protokooperasi, sehingga efisiensi serapan hara meningkat dan bibit lebih tahan terhadap cekaman lingkungan. Selain nutrisi, faktor lingkungan juga mempengaruhi pertumbuhan bibit. Menurut Susmawati (2016), media tanam yang gembur, kaya bahan organik, dan memiliki drainase baik sangat mendukung perkembangan akar. Polybag dengan ukuran sesuai dan lubang drainase cukup akan mencegah genangan air yang dapat menimbulkan kondisi anaerobik merusak akar. Faktor lain seperti intensitas cahaya, ketersediaan air, serta pengendalian hama dan penyakit juga berperan penting. Kekeringan dapat menurunkan tekanan turgor sel, menghambat pembelahan dan pembesaran sel, serta menurunkan laju fotosintesis, sedangkan genangan air dapat merusak sistem perakaran yang aktif berespirasi. Oleh karena itu, bibit yang siap tanam umumnya berumur 10–12 bulan, memiliki tinggi 80–100 cm, 5–7 helai daun, warna hijau segar, bebas hama penyakit, dan akar yang kuat serta menyebar baik di dalam polybag.

71 Seleksi bibit merupakan aspek penting dalam pembibitan menurut (Listia, 2009), seleksi dilakukan secara ketat pada umur 3 dan 9 bulan untuk memastikan hanya bibit sehat, seragam, dan bebas dari kelainan morfologi maupun serangan hama penyakit yang dipindahkan ke lapangan. Bibit abnormal, seperti yang mengalami pertumbuhan kerdil, daun menggulung, batang bengkok, atau terserang penyakit, harus disingkirkan dan dimusnahkan agar tidak menjadi sumber inokulum bagi bibit lain. Kriteria bibit unggul yang

siap tanam meliputi umur 10–12 bulan, tinggi 80–100 cm, jumlah daun 5–7 helai, warna daun hijau segar, serta sistem perakaran yang kuat dan menyebar baik di dalam polybag.

C. Tanah Ultisol

Media tanam untuk pembibitan kelapa sawit idealnya bersifat ringan, gembur, memiliki drainase baik namun tetap mampu mempertahankan kelembapan, kaya bahan organik, serta bebas patogen. Topsoil bersih digunakan sebagai sumber mineral, kompos matang menyediakan unsur hara dan mikroba menguntungkan, sedangkan sekam padi terkompos atau arang sekam/biochar ditambahkan untuk meningkatkan aerasi dan menjaga kestabilan agregat. Pada tahap *pre nursery* campuran yang direkomendasikan adalah Topsoil : Kompos : Sekam padi = 2 : 1 : 1. Memasuki fase *main nursery* komposisinya berubah menjadi 3 : 1 : 1. Seluruh bahan harus dikomposkan atau disterilkan sebelum digunakan agar bibit berkembang optimal dan terhindar dari gangguan penyakit (Prasetyo *et al.*, 2022).

Tanah Ultisol merupakan salah satu jenis tanah marginal yang paling luas di Indonesia, mencakup sekitar 25% dari total luas daratan, dengan sebaran utama di Sumatera, Kalimantan, Sulawesi, dan Papua. Ultisol dicirikan oleh tingkat keasaman yang tinggi (pH 3,5 –5,5), kandungan bahan organik rendah (0,13–1,12%), kapasitas tukar kation (KTK) rendah (<16 cmol/kg liat), kejenuhan basa rendah (<35%), serta kandungan aluminium dan besi yang tinggi. Secara morfologi, tanah ini umumnya berwarna merah hingga kuning akibat dominasi oksida Fe dan Al, bertekstur sedang hingga kasar, dan

memiliki horizon bawah yang keras serta padat sehingga menghambat penetrasi akar. Secara kasat mata, ultisol dapat dikenali dari warna tanah yang dominan merah bata atau kuning kecokelatan, permukaan tanah yang relatif keras saat kering, mudah pecah atau retak, serta struktur gumpalan yang lemah dan mudah hancur bila terkena air. Tanah ini juga cenderung miskin bahan organik sehingga tampak kurang gelap dibanding tanah subur, serta sering menunjukkan lapisan bawah yang keras menyerupai lapisan padas. Kondisi tersebut menyebabkan ultisol memiliki kesuburan yang sangat rendah dan menjadi tantangan utama dalam budidaya tanaman (Syahputra *et al.*, 2015).

Salah satu permasalahan utama pada tanah Ultisol adalah rendahnya ketersediaan unsur P akibat terfiksasi oleh ion Fe dan Al yang tinggi. Fiksasi P pada Ultisol sangat tinggi karena kandungan oksida Fe dan Al sehingga sebagian besar P yang diberikan melalui pemupukan akan terikat dan tidak tersedia bagi tanaman. Selain itu, Ultisol juga memiliki kejenuhan basa yang rendah, agregat tanah yang tidak stabil, serta aktivitas biologi yang lemah akibat rendahnya kandungan bahan organik. Hal ini berdampak pada rendahnya populasi dan aktivitas mikroorganisme tanah, sehingga proses dekomposisi bahan organik dan mineralisasi hara berjalan lambat. Kandungan N-total pada ultisol umumnya hanya 0,09–0,18%, sedangkan P-tersedia berkisar antara 0,5–10 ppm, yang tergolong sangat rendah untuk mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal (Nurjaya, 2017).

Dengan demikian, pengelolaan ultisol yang tepat, termasuk integrasi antara pemberian pupuk fosfat, aplikasi mikoriza, dan penambahan bahan

organik, sangat penting untuk meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan budidaya kelapa sawit di lahan marginal ini. kemudian upaya perbaikan kesuburan tanah ultisol yang dapat dilakukan melalui pengapuran untuk menaikkan pH, penambahan bahan organik (kompos, pupuk kandang, biochar), serta aplikasi pupuk hayati seperti mikoriza arbuskular. Penambahan bahan organik juga meningkatkan aktivitas mikroba tanah, memperbaiki struktur tanah, dan meningkatkan kapasitas tanah dalam menyimpan air dan hara.

D. Pemupukan pupuk P

Pemupukan kelapa sawit dilakukan untuk memenuhi kebutuhan hara agar pertumbuhan dan produksi tandan tetap optimal. Unsur utama yang diberikan meliputi N untuk pembentukan tajuk dan P bagi perkembangan akar, kalium guna meningkatkan kualitas dan jumlah TBS, serta magnesium untuk menjaga efisiensi fotosintesis. Fosfor merupakan unsur hara makro esensial yang sangat penting dalam mendukung pertumbuhan dan produktivitas tanaman kelapa sawit. Peran utama fosfor meliputi pembentukan energi ATP, pengembangan sistem perakaran, pembentukan bunga dan buah, serta membantu efisiensi penyerapan hara lainnya (Yosephine *et al.*, 2009). Pada fase awal pertumbuhan, pupuk fosfat sangat dibutuhkan untuk merangsang perkembangan akar yang sehat dan luas, yang selanjutnya meningkatkan kemampuan tanaman dalam menyerap air dan unsur hara dari tanah (Rivae, 2025). Pupuk juga menggantikan unsur hara yang hilang karena pencucian dan terangkut (dikonversi) melalui produk yang dihasilkan (TBS) serta

memperbaiki kondisi yang tidak menguntungkan atau mempertahankan kondisi tanah yang baik untuk pertumbuhan dan perkembangan kelapa sawit.

Namun, pada tanah-tanah tropis yang memiliki pH masam seperti ultisol, ketersediaan P sangat rendah karena unsur ini mudah terikat oleh ion Al dan Fe, membentuk senyawa yang tidak larut dan tidak tersedia bagi tanaman. Faktor-faktor seperti pH tanah, kandungan bahan organik, dan jenis tanah sangat memengaruhi ketersediaan P. Unsur Fosfor paling tersedia bagi tanaman pada pH netral sekitar 6,0 – 7,0. Pada pH rendah, P akan terikat kuat oleh Al dan Fe, sedangkan pada pH tinggi akan terikat oleh Ca dan Mg membentuk senyawa yang juga tidak larut. Efisiensi pemupukan P pada tanah ultisol sangat rendah, karena sebagian besar P yang diberikan akan terfiksasi dan tidak tersedia bagi tanaman (Nurjaya, 2017). Oleh karena itu, strategi pemupukan P yang tepat sangat diperlukan, antara lain dengan menggunakan pupuk fosfat yang mudah larut seperti SP-36 atau TSP, pengapuran untuk menaikkan pH tanah, serta penambahan bahan organik seperti mikoriza arbuskular untuk meningkatkan ketersediaan P melalui pembentukan senyawa kompleks yang lebih mudah larut. Selain pupuk anorganik, penggunaan pupuk organik seperti pupuk kandang ayam, sapi, atau kambing juga terbukti dapat meningkatkan ketersediaan P di tanah ultisol, memperbaiki struktur tanah, meningkatkan pH, dan menurunkan kejenuhan Al dan Fe.

Kombinasi pupuk organik dengan amelioran seperti biochar, dolomit, atau mikroba pelarut fosfat semakin mempercepat perbaikan tanah dan meningkatkan efisiensi pemupukan P (Sari *et al.*, 2017). Aplikasi kombinasi

pupuk P dengan mikoriza arbuskular terbukti mampu meningkatkan ketersediaan P secara signifikan di tanah ultisol. Penelitian (Hazra *et al.*, 2024) menunjukkan bahwa kombinasi 1 NPK 10 g + 20 g pupuk hayati mikoriza menghasilkan P-tersedia sebesar 68,98 ppm, jauh lebih tinggi dibandingkan kontrol dan perlakuan tunggal. Hal ini menegaskan pentingnya integrasi antara pemupukan P dan aplikasi mikoriza untuk meningkatkan efisiensi serapan hara dan pertumbuhan kelapa sawit di tanah marginal.

E. Mikoriza Arbuskular

Mikoriza arbuskular adalah jenis mikoriza yang membentuk hubungan simbiosis protokooperasi antara fungi dan akar tanaman. Mikoriza arbuskular dapat meningkatkan kemampuan tanaman untuk menyerap nutrisi dari tanah, terutama fosfor, dan dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stres lingkungan. Menurut Smith & Read, (2008) mikoriza arbuskular dapat meningkatkan serapan nutrisi tanaman dengan meningkatkan luas permukaan akar dan menghasilkan enzim yang dapat membantu tanaman menyerap nutrisi dari tanah. Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA) tergolong ke dalam kelompok endomikoriza, yaitu fungi yang hifanya menginfeksi dan menembus masuk ke dalam sel-sel korteks akar tanaman inang. Karakter khusus dari FMA ini ditandai dengan pembentukan struktur khas di dalam sel korteks berupa arbuskel yang berfungsi sebagai tempat pertukaran nutrisi/fotoasimilat antara fungi dan tanaman, serta vesikel yang berfungsi sebagai organ penyimpanan cadangan makanan. Karakteristik fisik FMA ditopang oleh pembentukan jaringan hifa eksternal yang ekstensif dan mampu menembus pori-pori tanah

berukuran mikro yang tidak dapat dijangkau oleh bulu akar biasa.

46 Mikoriza arbuskular juga dapat meningkatkan ketahanan tanaman
terhadap stres lingkungan, seperti kekeringan dan serangan patogen. Menurut
1 Hazra *et al.*, (2024), mikoriza arbuskular dapat meningkatkan ketahanan
tanaman terhadap kekeringan dengan meningkatkan kemampuan tanaman
untuk menyerap air dari tanah. Selain itu, mikoriza arbuskular juga dapat
meningkatkan ketahanan tanaman terhadap serangan patogen dengan
mengaktifkan sistem pertahanan tanaman (Jung *et al.*, 2012). Dengan
77 demikian, mikoriza arbuskular dapat menjadi salah satu alternatif untuk
meningkatkan pertumbuhan dan ketahanan tanaman, terutama dalam kondisi
lingkungan yang tidak optimal. Oleh karena itu, penelitian tentang mikoriza
arbuskular dapat membantu kita memahami lebih lanjut tentang peran mikoriza
arbuskular dalam meningkatkan pertumbuhan dan ketahanan tanaman.

73 Menurut Basri (2018), pemilihan isolat mikoriza yang kompatibel
dengan tanaman inang sangat penting untuk mencapai hasil yang optimal.
Penelitian pada berbagai jenis tanah menunjukkan bahwa aplikasi mikoriza
arbuskular terutama genus Glomus, secara konsisten meningkatkan
13 pertumbuhan dan serapan hara pada bibit kelapa sawit, baik di tanah ultisol,
histosol, maupun tanah marginal lainnya. Selain meningkatkan serapan hara,
AMF juga berperan dalam memperbaiki struktur tanah melalui sekresi senyawa
polisakarida dan glomalin, yang meningkatkan stabilitas agregat tanah.
Mikoriza arbuskular juga berinteraksi sinergis dengan bakteri pelarut fosfat dan
bakteri penambat nitrogen, sehingga semakin meningkatkan efisiensi

penggunaan pupuk dan produktivitas tanaman .

F. Hipotesis

Diduga bahwa kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular maupun faktor tunggal dari masing masing perlakuan mampu meningkatkan pertumbuhan bibit kelapa sawit (pertambahan tinggi, pertambahan diameter batang, pertambahan jumlah daun, panjang akar, volume akar dan berat kering akar serta tajuk) serta meningkatkan pH tanah ultisol dibandingkan dengan tanpa perlakuan atau kontrol .

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Tempat dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan di Kebun Pendidikan dan Penelitian Kampus INSTIPER (KP2), yang terletak di Desa Maguwoharjo, Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Dengan ketinggian tempat 118 mdpl dan berbatasan langsung dengan kampus Instiper sehingga mempermudah kegiatan penelitian. Lokasi tersebut dipilih karena memiliki fasilitas yang mendukung kegiatan penelitian, khususnya dalam pembibitan kelapa sawit dengan media tanah ultisol. Penelitian berlangsung selama tiga bulan, dengan tujuan memperoleh data lengkap mengenai parameter pertumbuhan dan serapan hara pada bibit kelapa sawit.

B. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi cangkul untuk pengolahan media tanam, polybag berukuran 35 × 35 cm sebagai wadah pembibitan, meteran untuk pengukuran tinggi bibit, gembor untuk penyiraman, timbangan analitik untuk penimbangan bobot kering tanaman, serta spektrofotometer untuk analisis kandungan hara, khususnya fosfor. Selain itu, digunakan pula plastik untuk keperluan teknis, kamera untuk dokumentasi, dan berbagai alat pendukung lainnya yang menunjang kelancaran penelitian.

Bahan yang digunakan terdiri atas bibit kelapa sawit dari *pre nursery* berumur 4 bulan sebagai objek penelitian dengan varietas Sriwijaya 4, mikoriza arbuskular sebagai pupuk hayati, pupuk fosfat jenis SP-36 sebagai sumber fosfor, air untuk penyiraman, serta tanah ultisol sebagai media tanam.

2

C. Metode Penelitian

Metode yang di gunakan dalam penelitian ini adalah dengan faktorial di susun dalam rancangan acak lengkap (RAL). Perlakuan dalam penelitian diacak untuk menghindari bias akibat perbedaan kondisi lingkungan, sehingga setiap perlakuan memiliki peluang yang sama terhadap faktor luar seperti cahaya, kelembaban, suhu, dan posisi polybag. Dengan pengacakan, perbedaan hasil yang diperoleh benar-benar mencerminkan pengaruh perlakuan, bukan variasi lingkungan. Dengan perlakuan sebagai berikut:

1. Dosis Pupuk Fosfat (P) sebagai faktor kedua
 - a. P0 : Tanpa pupuk fosfat
 - b. P1 : Pupuk fosfat 5 g/ polybag
 - c. P2 : Pupuk fosfat 10 g/ polybag
2. Perlakuan: Dosis Mikoriza Arbuskular (M) sebagai faktor pertama
 - a. M0 : Tanpa Mikoriza
 - b. M1 : Mikoriza 30 g/ polybag
 - c. M2 : Mikoriza 50 g/ polybag

2

Kombinasi dari kedua faktor 3 x 3 menghasilkan 9 perlakuan, yang masing-masing diulang sebanyak 5 kali sehingga total 9 x 5 terdapat 45 unit percobaan bibit main nursery. Kemudian 5 bibit di siapkan sebagai cadangan apabila terdapat bibit yang mati saat penelitian berlangsung.

Table 1. Rekap kombinasi Perlakuan Dan Ulangan

Kode Perlakuan	Pupuk Posfat (P)	Mikoriza (M)	Jumlah Ulangan	Total Polybag
P0M0	Tanpa pupuk fosfat	Tanpa mikoriza	5	5
P0M1	Tanpa pupuk fosfat	Mikoriza 30 g/polybag	5	5
P0M2	Tanpa pupuk fosfat	Mikoriza 50 g/polybag	5	5
P1M0	Pupuk fosfat 5 g/polybag	Tanpa mikoriza	5	5
P1M1	Pupuk fosfat 5 g/polybag	Mikoriza 30 g/polybag	5	5
P1M2	Pupuk fosfat 5 g/polybag	Mikoriza 50 g/polybag	5	5
P2M0	Pupuk fosfat 10 g/polybag	Tanpa Mikoriza	5	5
P2M1	Pupuk fosfat 10 g/polybag	Mikoriza 30 g/polybag	5	5
P2M2	Pupuk fosfat 10 g/polybag	Mikoriza 50 g/polybag	5	5
Jumlah	-	-	45	45

Keterangan tabel 1 :

1. **P0** = tanpa pupuk fosfat
2. **P1** = 5 g pupuk fosfat/polybag
3. **P2** = 10 g pupuk fosfat/polybag
4. **M0** = tanpa mikoriza
5. **M1** = 30 g mikoriza/polybag
6. **M2** = 50 g mikoriza/polybag

D. Pelaksanaan Penelitian

1. Persiapan bibit

Bibit yang digunakan dalam penelitian ini adalah bibit main nursery dengan varietas SJ 4 berumur 4 bulan. Kondisi bibit saat ini yaitu pertumbuhannya baik mulai dari batang yang kokoh, helai daun terbuka lebar berwarna hijau segar, ukurannya seragam, bebas dari hama /penyakit serta akar sudah mulai keluar dari polybag karna sudah berumur 5 bulan setelah tanan.

2. Persiapan lokasi pembibitan

Pemilihan lokasi pembibitan dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa faktor penting, yaitu area harus bebas dari banjir, dekat dengan sumber air untuk memudahkan penyiraman, tidak terhalang bayangan pohon sehingga memperoleh sinar matahari penuh, serta aman dari serangan hama agar bibit dapat tumbuh optimal. Penelitian ini dilaksanakan di Kebun Pendidikan dan Penelitian Kampus INSTIPER (KP2), Daerah Istimewa Yogyakarta.

3. Persiapan mikoriza arbuskular, pupuk fosfat dan polybag

Pupuk fosfat dan mikoriza arbuskular disiapkan sesuai dosis yang ditentukan dengan cara di timbang menggunakan timbangan digital kemudian dimasukkan ke dalam plastik klip hingga selesai sesuai dengan yang sudah di susun dalam metode penelitian dan menyiapkan polybag sesuai dengan jumlah sampel.

4. Pengisian polybag dan penyusunan polybag

Pengisian *polybag* berukuran 35 cm × 35 cm dilakukan 5 hari sebelum pemindahan bibit dari *pre-nursery* ke *main nursery*. Media tanam berupa tanah Ultisol yang telah diayak dimasukkan ke dalam *polybag* agar terbebas dari sampah. Pengisian awal dilakukan hingga setengah *polybag* guna memudahkan aplikasi mikoriza arbuskular dan pupuk P, serta mempermudah proses pemindahan bibit. Selanjutnya, *polybag* disusun pada areal yang telah disiapkan menggunakan metode mata lima dengan jarak 45 cm × 45 cm sesuai dengan layout penyusunan terlampir.

5. Aplikasi pupuk fosfat dengan mikoriza arbuskular dan pemindahan bibit *pre nursery* ke *main nursery*

Aplikasi pupuk fosfat dan mikoriza arbuskular dilakukan melalui metode penaburan sebanyak satu kali bersamaan dengan proses pemindahan bibit dari *polybag pre-nursery* ke *polybag main nursery*. Prosedur diawali dengan menaburkan pupuk fosfat dan mikoriza arbuskular yang telah disiapkan ke dalam *polybag* yang sudah terisi setengah tanah Ultisol sesuai dengan kode perlakuan masing-masing. Selanjutnya, pemindahan bibit dari *babybag pre-nursery* ke *polybag main nursery* dilakukan dengan cara melepaskan *babybag* secara hati-hati agar tanah tidak pecah, lalu bibit beserta tanahnya dimasukkan ke dalam *polybag main nursery* yang telah ditaburi pupuk P dan mikoriza arbuskular tersebut. Setelah bibit berada di dalam *polybag*, tanah yang sudah diayak sebelumnya diisikan kembali ke sekeliling bibit dan dipadatkan untuk menjaga posisi bibit tetap tegak serta

stabil. Sebagai langkah terakhir, penyiraman segera dilakukan agar media tanam lembap secara merata dan bibit dapat beradaptasi dengan baik di lingkungan pembibitan *main nursery*.

6. Pemeliharaan tanaman

Pemeliharaan tanaman meliputi penyiraman, penyiangan, dan pengendalian hama penyakit.

- a. Penyiramaan; Penyiraman dilakukan dua kali sehari, yaitu pada pagi dan sore hari sampai kapasitas lapang. Jika terjadi hujan deras pada malam hari atau pagi hari, maka penyiraman pagi hari tidak dilakukan.
- b. Penyiangan; dilakukan dengan mencabut rumput-rumput yang telah tumbuh di dalam polibag menggunakan tangan, sedangkan gulma yang tumbuh di antara polibag dibersihkan dengan menggunakan cangkul.
- c. Penyemprotan pestisida (insektisida dan fungisida) dilakukan secara berkala sesuai tingkat serangan Organisme Pengganggu Tanaman (OPT) untuk mencegah serta mengendalikan hama pemakan daun dan penyakit bercak daun pada bibit.

E. Parameter yang Diamati

1. Pertambahan tinggi tanaman (cm)

Sebelum dilakukan pengukuran, parameter awal telah dicatat saat pemindahan bibit dari *pre nursery* ke *main nursery* karena data yang akan dianalisis adalah selisih antara pengukuran awal dengan pengukuran akhir. Pertambahan tinggi tanaman mulai dihitung sejak 2 minggu setelah pindah tanam, dengan pencatatan dilakukan setiap 2 minggu sekali hingga 12

minggu setelah pindah tanam sebagai data pertambahan tinggi tanaman

2. Pertambahan diameter batang (cm)

Sebelum dilakukan pengukuran, parameter awal telah dicatat saat pemindahan bibit dari pre nursery ke main nursery karena data yang akan di analisis adalah selisih antara pengukuran awal dengan pengukuran akhir. Pengukuran diameter batang tanaman di ukur pada batasan 5 cm dari permukaan tanah dengan menggunakan jangka sorong. Pengamatan pertambahan diameter batang mulai dihitung dari 2 minggu setelah pindah tanam, selanjutnya dihitung 2 minggu sekali sampai 12 minggu setelah pindah tanam sebagai data pertambahan diameter tanaman.

3. Pertambahan jumlah daun (helai)

Sebelum dilakukan pengukuran, parameter awal telah dicatat saat pemindahan bibit dari pre nursery ke main nursery karena data yang akan di analisis adalah selisih antara pengukuran awal dengan pengukuran akhir. Pertambahan Jumlah daun dihitung dari 2 minggu setelah pindah tanam, selanjutnya dihitung 2 minggu sekali sampai 12 minggu setelah pindah tanam sebagai data pertambahan jumlah daun bibit.

4. Berat segar tajuk

Pengukuran bobot segar tajuk dilakukan dengan memotong bagian batang dan daun dari bagian akar setelah pemanenan. Bagian tajuk yang telah dibersihkan dari debu atau kotoran di permukaannya menggunakan tisu tanpa menghilangkan kelembaban alami jaringanya, kemudian ditimbang menggunakan timbangan analitik untuk mendapatkan data berat

1 segar tajuk dalam satuan gram.

5. Berat kering tajuk

6 Pengukuran bobot kering tajuk dilakukan untuk menilai akumulasi biomassa pada bagian atas tanaman (batang dan daun). Setelah dipisahkan dari akar, seluruh sampel tajuk dikeringkan secara bersamaan dengan sampel akar di dalam oven pada suhu $\pm 70^{\circ}\text{C}$ selama 48 jam hingga bobotnya konstan. Setelah proses pengeringan selesai, bagian tajuk ditimbang menggunakan timbangan analitik untuk mendapatkan data bobot kering tajuk dalam satuan gram.

6. Panjang akar (cm)

8 Pengukuran panjang akar dilakukan untuk menilai perkembangan sistem perakaran bibit kelapa sawit sebagai indikator kemampuan tanaman dalam menyerap air dan unsur hara. Pengukuran dilakukan setelah bibit berumur 12 minggu di *main nursery* atau setelah bibit panen. Bibit dicabut dengan hati-hati agar struktur akar tidak rusak, kemudian akar dibersihkan dari sisa tanah menggunakan air mengalir. Panjang akar utama diukur mulai dari pangkal akar (titik tumbuh di bawah batang) hingga ujung akar terpanjang dengan menggunakan mistar atau penggaris. Hasil pengukuran dicatat dalam satuan sentimeter (cm) untuk setiap sampel sebagai pendukung data penelitian.

7. Volume akar

Pengukuran volume akar dilakukan untuk mengetahui perkembangan sistem perakaran bibit kelapa sawit, karena parameter ini

mencerminkan kapasitas akar dalam menyerap unsur hara. volume akar menunjukkan efektivitas perlakuan kombinasi pemupukan P dengan mikoriza arbuskular dalam mendukung pertumbuhan vegetatif tanaman pada media tanah ultisol. Pengukuran dilakukan saat tanaman sudah dipanen atau setelah berumur tiga bulan. Volume akar di ukur dengan metode displacement, yaitu akar yang telah di potong dari pangkal batang dibersihkan dimasukkan ke dalam gelas ukur berisi air, kemudian selisih kenaikan permukaan air menunjukkan besarnya volume akar yang dicatat dalam satuan mililiter (ml) atau sentimeter kubik (cm³)

8. Berat segar akar

Pengukuran berat segar akar dilakukan dengan mencabut tanaman dari media tanam secara hati-hati, lalu memotong bagian akar tepat di batas pangkal batang. Selanjutnya, akar dicuci menggunakan air mengalir untuk membersihkan sisa tanah tanpa merusak jaringan halus, dikeringkan permukaannya menggunakan tisu agar bebas dari air berlebih, dan segera ditimbang menggunakan timbangan analitik untuk memperoleh data bobot segar akar dalam satuan gram.

9. Berat kering akar

Pengukuran berat kering akar dilakukan untuk menilai akumulasi biomassa pada sistem perakaran bibit kelapa sawit. Setelah dipisahkan dari tajuk, seluruh sampel akar dikeringkan secara bersamaan dengan sampel tajuk di dalam oven pada suhu $\pm 70^{\circ}\text{C}$ selama 48 jam hingga mencapai berat konstan. Setelah proses pengeringan selesai, bagian akar ditimbang

menggunakan timbangan analitik untuk memperoleh data bobot kering akar dalam satuan gram.

10. Kandungan fosfor dalam jaringan daun (%)

Untuk mengukur serapan fosfor (P) pada bibit kelapa sawit Ambil satu daun muda matang dari masing-masing 5 bibit per perlakuan (gunakan posisi daun yang sama, misalnya daun ke-3 dari pucuk), keringkan sampel di oven pada sekitar 70 °C hingga berat konstan (48–72 jam), giling hingga homogen, lalu timbang aliquot kering 0,5–1,0 g untuk dianalisis; lakukan pencernaan total dengan memanaskan dan menambahkan HNO₃ dan H₂O₂ (alternatif HNO₃–HClO₄ hanya jika fasilitas memadai) pada blok pencernaan atau sistem microwave hingga larutan jernih, dinginkan dan encerkan ekstrak ke volume akhir yang ditentukan (50–100 mL). siapkan kurva kalibrasi dari standar KH₂PO₄ dan reagen ammonium molibdat serta asam askorbat sebagai reduktor, reaksi ekstrak dengan reagen tersebut hingga terbentuk kompleks fosfomolibdat berwarna biru, lalu ukur absorbansi pada sekitar 880 nm menggunakan spektrofotometer dengan blanko reagen (Yildiz & Dizikisa, 2017). Konversi absorbansi dengan rumus mg P per sampel = konsentrasi (mg·L⁻¹) x volume akhir (L). Konversi ke persen berat kering:P (%) = $\frac{\text{mg P dalam ekstrak}}{\text{massa sampel (mg)}} \times 100\%$.

11. Mengukur tingkat keasaman (pH) media tanah ultisol sebelum dan sesudah perlakuan

Pengukuran pH tanah dilakukan langsung di polybag menggunakan soil pH meter untuk memperoleh gambaran nyata kondisi media tanam.

Sebelum pengukuran, tanah dilembabkan dengan air suling agar elektroda bersentuhan sempurna. Alat ditancapkan pada kedalaman 10–15 cm, yaitu zona perakaran aktif bibit kelapa sawit, dan nilai pH yang muncul di layar dicatat. Pengukuran dilakukan dua kali, yakni sebelum perlakuan untuk mengetahui kondisi awal tanah ultisol dan sesudah perlakuan untuk melihat perubahan akibat kombinasi pupuk P dan mikoriza arbuskular. Setiap kombinasi perlakuan (P0M0, P1M1, dst.) diukur sesuai rancangan acak lengkap (RAL), kemudian data pH dianalisis bersama parameter pertumbuhan dan serapan hara untuk menilai perbaikan sifat kimia tanah ultisol.

F. Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan menggunakan analisis sidik ragam (ANOVA) faktorial sesuai rancangan acak lengkap (RAL) dengan dua faktor perlakuan, yaitu dosis mikoriza arbuskular (M) dan dosis pupuk fosfat (P). Uji ANOVA digunakan untuk mengetahui pengaruh utama masing-masing faktor serta interaksi keduanya terhadap pertumbuhan dan serapan hara bibit kelapa sawit (semua parameter penelitian). Apabila hasil analisis menunjukkan perbedaan nyata pada taraf signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$) atau sangat nyata pada taraf 1% ($\alpha = 0,01$), maka dilanjutkan dengan uji pembandingan rata-rata (DMRT/ Duncan Multiple Range Test) guna menentukan perlakuan terbaik. Dengan pendekatan ini, data yang diperoleh dapat diinterpretasikan secara objektif, valid, dan representatif sesuai tujuan penelitian.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pertambahan tinggi tanaman

Hasil sidik ragam pada lampiran 2 menunjukkan tidak terjadi interaksi nyata antara kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap pertambahan tinggi tanaman pada bibit kelapa sawit *main nursery*. Pemberian pupuk P menunjukkan tidak terdapat beda nyata, demikian juga pemberian mikoriza arbuskular. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap pertambahan tinggi tanaman dapat di lihat pada, tabel 2.

Table 2. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap pertambahan tinggi tanaman (cm) bibit kelapa sawit di *main nursery*.

Pupuk P	Mikoriza			
	0 g	30 g	50	Rerata (cm)
0 g	3,20	4,00	5,00	4,07 a
5 g	4,40	6,60	3,40	4,80 a
10 g	6,00	5,20	6,20	5,80 a
Rerata	4,53 p	5,27 a	4,89 a	(-)

Keterangan : Angka rerata yang di ikuti huruf yang sama pada kolom atau baris menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan hasil uji DMRT 5 %.

(-) : Tidak terdapat interaksi nyata

Tabel 2 menunjukan bahwa pemberian pupuk P tidak berpengaruh nyata terhadap pertambahan tinggi tanaman bibit kelapa sawit di *main nursery* demikian juga pemberian mikoriza arbuskular tidak berpengaruh nyata.

Tidak adanya pengaruh yang signifikan dari perlakuan pupuk P diduga berkaitan dengan tingginya fiksasi hara fosfor di dalam tanah oleh unsur aluminium (Al) dan besi (Fe). Menurut Nurjaya, (2017) unsur P merupakan unsur *immobile* (tidak mudah bergerak, sehingga penyerapan hara oleh akar

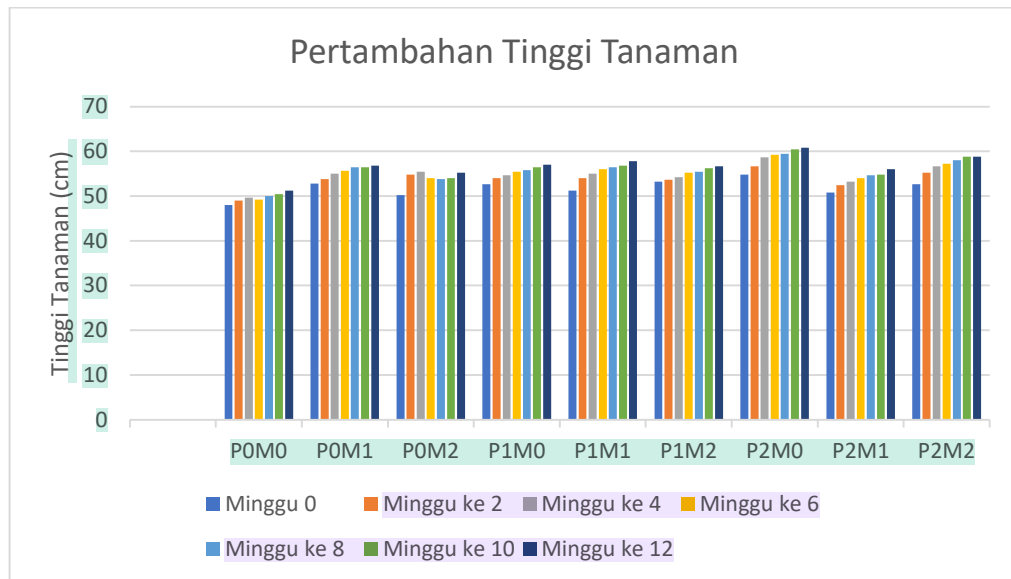
2

tanaman pada fase vegetatif awal masih terbatas dan belum memberikan pengaruh yang berbeda nyata pada parameter pertambahan tinggi tanaman.

Hasil perlakuan tunggal dari pemberian mikoriza arbuskular yang juga belum memberikan perbedaan nyata diduga terjadi karena fungi mikoriza arbuskular (FMA) masih memfokuskan perkembangannya pada pembentukan jaringan hifa eksternal dan kolonisasi perakaran terlebih dahulu. Sebagaimana dijelaskan oleh Smith & Read, (2008), pada tahap awal perkembangannya FMA mengalokasikan hasil fotosintesis tanaman untuk memperkuat arsitektur perakaran serta memperluas daerah serapan hara di rizosfer, sebelum mentranslokasikan energi secara nyata untuk pertumbuhan pemanjangan batang.

19

Meskipun hasil analisis sidik ragam tidak berbeda nyata, hasil dari data rerata pada Tabel 2 menunjukkan bahwa kombinasi dosis pupuk 5 g + mikoriza 30 g menghasilkan rerata pertambahan tinggi tanaman tertinggi, yaitu 6,60 cm. Hal ini menunjukkan bahwa dosis pupuk 5 g + mikoriza 30 g berada pada taraf yang efisien. Pemberian P dosis 5 g mampu menyediakan ketersediaan hara yang cukup tanpa menekan tingkat infeksi dan perkembangan mikoriza. Sebaliknya, pemberian P yang terlalu tinggi dapat menurunkan efektivitas simbiosis FMA, sedangkan tanpa pemberian P dosis 0 g ketersediaan nutrisi tanah kurang optimal untuk memicu sintesis jaringan baru pada titik tumbuh batang.



Gambar 1. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap pertambahan tinggi tanaman.

Pada Gambar 1, kondisi tinggi awal tanaman pada Minggu 0 berada pada kisaran yang tidak homogen, yaitu berkisar antara 48,0 cm P0M0 (kontrol) hingga 54,8 cm pada dosis pupuk 5 g + mikoriza 0 g. Oleh karena itu, evaluasi efektivitas perlakuan ditinjau berdasarkan pertambahan tinggi tanaman dari minggu ke-0 hingga minggu ke-12. Pada akhir pengamatan, pertambahan tinggi tanaman terbaik dicapai oleh kombinasi perlakuan dosis pupuk 5 g + mikoriza 30 g yaitu sebesar 6,6 cm, diikuti oleh perlakuan dosis pupuk 10 g + mikoriza 50 g sebesar 6,2 cm dan perlakuan dosis pupuk 10 g + mikoriza 0 g sebesar 6,0 cm. Sementara itu, tanpa perlakuan (kontrol) memberikan pertambahan tinggi terendah yaitu hanya sebesar 3,2 cm.

Selain pemberian pupuk P, aplikasi Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA) juga terbukti memberikan pengaruh positif terhadap laju pertambahan tinggi tanaman. Menurut Smith dan Read (2008), hifa eksternal FMA mampu memperluas jangkauan sistem perakaran tanaman hingga dapat menembus pori-

pori tanah mikro yang tidak mampu dijangkau oleh bulu akar biasa. Efek ini terlihat dari peningkatan pertambahan tinggi pada perlakuan tanpa pupuk P anorganik namun diberi mikoriza seperti dosis pupuk 0 g + mikoriza 50 g sebanyak 5,0 cm dan perlakuan dosis pupuk 0 g + mikoriza 30 g sebanyak 4,4 cm, yang nilainya lebih tinggi dibandingkan tanpa perlakuan (kontrol) 3,2 cm. Peranan mikoriza dalam hal ini adalah membantu melarutkan P yang terikat di dalam tanah sehingga dapat diserap oleh akar tanaman secara lebih efisien guna menunjang pemanjangan sel apikal.

Kombinasi perlakuan dosis pupuk 5 g + mikoriza 30 g mencatatkan hasil pertambahan tinggi tertinggi 6,6 cm disusul oleh perlakuan dosis pupuk 10 g + mikoriza 50 g sebanyak 6,2 cm. Pada perlakuan tersebut, kecukupan pasokan P dari pupuk berpadu sinergis dengan efisiensi penyerapan hara mikro serta air oleh hifa mikoriza. Kondisi rizosfer yang ideal ini memicu percepatan laju metabolisme dan pemanjangan jaringan pucuk tanaman. Secara umum, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi dosis pemupukan P yang tepat disertai inokulasi mikoriza mampu mendukung efisiensi laju pertumbuhan vegetatif dan pertambahan tinggi tanaman secara optimal. Sebagaimana dijelaskan oleh (Marlina *et al.*, 2026), status P tanah yang sudah tinggi cenderung dapat menurunkan tingkat kolonisasi FMA, sebab tanaman tidak lagi terlalu bergantung pada hubungan simbiosis untuk memenuhi kebutuhan unsur fosfornya. Secara umum, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemupukan P yang tepat disertai inokulasi mikoriza mampu mendukung efisiensi pertumbuhan vegetatif tanaman secara optimal.

2. Pertambahan diameter batang

Hasil sidik ragam pada lampiran 2 menunjukkan tidak terjadi interaksi nyata antara kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap pertambahan diameter batang pada bibit kelapa sawit *main nursery*. Pemberian pupuk P menunjukkan tidak terdapat beda nyata, demikian juga pemberian mikoriza arbuskular. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap pertambahan diameter batang dapat di lihat pada, tabel 3.

Table 3. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap pertambahan diameter batang (cm) bibit kelapa sawit di *main nursery*.

Pupuk P	Mikoriza			
	0 g	30 g	50 g	Rerata (cm)
0 g	1,28	1,40	1,38	1,35 a
5 g	1,37	1,43	1,27	1,36 a
10 g	1,24	1,27	1,41	1,30 a
Rerata	1,29 p	1,36 p	1,35 p	(-)

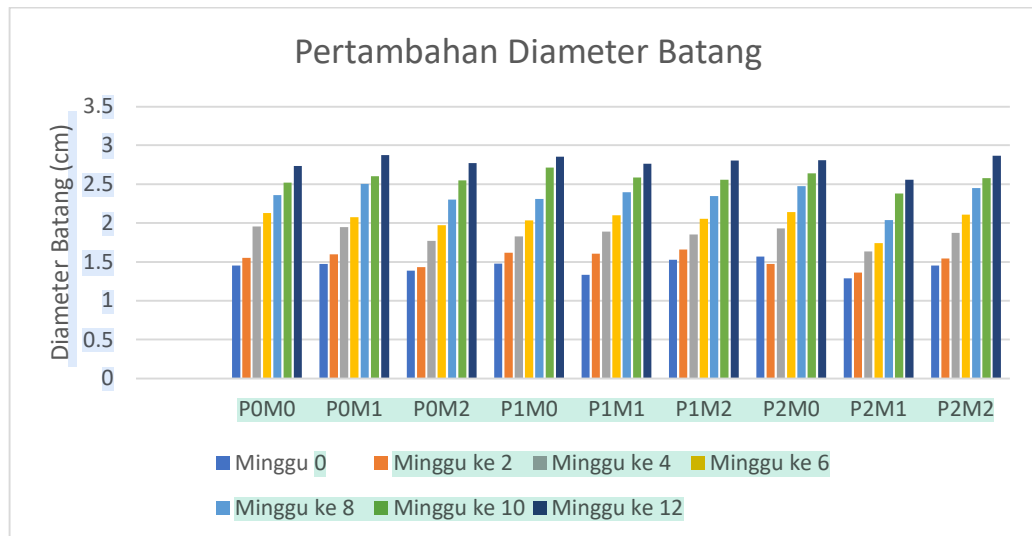
Keterangan : Angka rerata yang di ikuti huruf yang sama pada kolom atau baris menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan hasil uji DMRT 5 %.

(-) : Tidak terdapat interaksi nyata
Tabel 3 menunjukan bahwa pemberian pupuk P tidak berpengaruh nyata terhadap pertambahan diameter batang bibit kelapa sawit di *main nursery* demikian juga pemberian mikoriza arbuskular tidak berpengaruh nyata..

Tidak adanya pengaruh yang signifikan dari kedua faktor perlakuan ini diduga berkaitan erat dengan proses penyaluran hasil fotosintesis pada bibit usia muda. Pembentukan dan pembesaran diameter batang sangat bergantung pada pembelahan sel-sel kambium pembuluh. Pada fase awal pengamatan di *main nursery*, tanaman cenderung memprioritaskan energi fotosintesisnya untuk pembentukan serta pengembangan sistem akar untuk memaksimalkan

penyerapan nutrisi, ketimbang dialokasikan untuk pelebaran diameter batang. Selain itu, tingkat fiksasi fosfor yang tinggi oleh kation Al dan Fe pada media tanam masam membatasi jumlah P bebas yang siap diserap oleh tanaman. Hasil ini mengindikasikan bahwa parameter diameter batang lebih lambat responsnya terhadap perlakuan pemupukan jangka pendek. Menurut Adrianto dkk., (2023), pertumbuhan diameter batang pada tanaman kelapa sawit cenderung dipengaruhi oleh faktor waktu tumbuh yang lebih panjang dan perubahan struktural.

Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA) pada tahap awal perkembangannya lebih aktif membentuk miselium dan jangkauan hifa eksternal di dalam media tanam, sehingga kontribusinya terhadap pembesaran lingkaran batang belum terlihat secara nyata dalam rentang masa pengamatan. Meskipun hasil analisis sidik ragam tidak berbeda nyata, hasil dari data rerata pada Tabel 3 mencatat bahwa kombinasi perlakuan dosis 5 g pupuk P + 30 g mikoriza memberikan rerata pertambahan diameter batang tertinggi, yaitu mencapai 1,43 cm. Hal ini mengindikasikan bahwa perlakuan dosis 5 g pupuk P + 30 g mikoriza memberikan kondisi lingkungan rizosfer yang tergolong seimbang. Pemberian P dosis sedang (5 g) mampu memenuhi kebutuhan awal bibit tanpa menekan perkembangan kolonisasi FMA, sehingga proses sintesis protein dan pembelahan sel pembuluh pada batang berlangsung lebih baik dibanding perlakuan tanpa perlakuan (kontrol).



Gambar 2. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap diameter batang bibit kelapa sawit.

Pada Gambar 2, kondisi diameter awal tanaman pada Minggu 0 berada pada kisaran yang tidak homogen, yaitu berkisar antara 1,28 cm pada perlakuan dosis 10 g pupuk P + 30 g mikoriza, hingga 1,56 cm pada dosis 10 g pupuk + 0 g mikoriza. Oleh karena itu, evaluasi efektivitas perlakuan lebih tepat ditinjau berdasarkan pertambahan diameter batang dari minggu ke-0 hingga minggu ke-12. Pada akhir pengamatan, pertambahan diameter batang tertinggi dicapai oleh perlakuan dosis 5 g pupuk P + 30 g mikoriza yaitu sebesar 1,43 cm, disusul oleh perlakuan dosis 10 g pupuk P + 50 g mikoriza sebesar 1,41 cm dan perlakuan dosis 0 g pupuk P + 30 g mikoriza sebesar 1,40 cm. Sementara itu, pertambahan diameter batang terendah dicatatkan oleh perlakuan dosis 10 g pupuk P + 0 g mikoriza yaitu hanya sebesar 1,24 cm, diikuti oleh perlakuan dosis 5 g pupuk P + 30 g mikoriza sebesar 1,27 cm, dan perlakuan dosis 5 g pupuk P + 50 g mikoriza sebesar 1,27 cm, serta tanpa perlakuan (kontrol) sebesar 1,28 cm.

Peningkatan diameter batang yang terjadi secara konsisten dari minggu ke-0 hingga minggu ke-12 pada seluruh perlakuan menandakan bahwa tanaman

berada dalam fase pertumbuhan vegetatif aktif. Pertambahan diameter batang merupakan salah satu parameter makro yang mencerminkan laju pembelahan sel-sel meristem kambium vaskuler serta akumulasi jaringan pembuluh (xilem dan floem). Proses fisiologis ini sangat bergantung pada ketersediaan hara di dalam media tanam serta energi metabolik yang dihasilkan oleh tanaman. Unsur hara fosfor (P) merupakan makronutrien esensial yang berperan langsung dalam transfer energi (ATP), sintesis asam nukleat, serta pembentukan jaringan baru bagi tanaman (Marschner, 2012). Ketersediaan fosfor yang mencukupi merangsang laju pembelahan sel-sel kambium vaskuler sehingga proses penebalan batang dapat berlangsung secara berkelanjutan.

Selain pemupukan P, aplikasi fungi mikoriza arbuskular (FMA) memberikan kontribusi positif terhadap perkembangan diameter batang, terutama pada kondisi ketersediaan P tanah yang terbatas. Hifa eksternal FMA mampu memperluas jangkauan penyerapan perakaran hingga menembus pori-pori tanah mikro yang tidak dapat dijangkau oleh bulu akar biasa (Smith & Read, 2008). Efek ini terlihat nyata pada perlakuan tanpa pemupukan P anorganik, di mana inokulasi mikoriza pada perlakuan dosis 0 g pupuk P + 30 g mikoriza sebesar 1,40 cm dan perlakuan dosis 0 g pupuk P + 50 g mikoriza sebesar 1,38 cm, mampu memberikan pertambahan diameter yang jauh lebih tinggi dibandingkan tanpa perlakuan (kontrol) sebesar 1,28 cm. Peran utama mikoriza dalam kondisi ini adalah membantu melarutkan unsur P yang terikat di dalam tanah agar dapat diserap akar secara lebih efisien guna mendukung penebalan batang.

Kombinasi perlakuan dosis 5 g pupuk P + 30 g mikoriza mencatatkan hasil pertambahan diameter terbaik sebesar 1,43 cm disusul oleh perlakuan dosis 10 g pupuk P + 50 g mikoriza sebesar 1,41 cm. Pada perlakuan tersebut, kecukupan pasokan P dari pupuk berpadu sinergis dengan efisiensi penyerapan hara mikro dan air oleh hifa mikoriza, menciptakan kondisi rizosfer yang ideal bagi penebalan jaringan batang. Sebaliknya, pada perlakuan dosis P tinggi tanpa mikoriza meskipun diameter akhirnya terlihat tinggi secara mutlak karena ukuran awal yang memang sudah paling besar 1,56 cm, laju pertumbuhannya justru paling rendah 1,24 cm. Hal ini diduga berkaitan dengan tidak adanya bantuan hifa mikoriza dalam mengoptimalkan penyerapan hara seimbang, serta tingginya kadar P terlarut yang tanpa perbaikan struktur perakaran dapat membatasi efisiensi laju pembelahan sel kambium jangka panjang.

2 3. Pertambahan jumlah helai daun

1 Hasil sidik ragam pada lampiran 3 menunjukkan tidak terjadi interaksi nyata antara kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap pertambahan jumlah helai daun pada bibit kelapa sawit *main nursery*. Pemberian pupuk P menunjukkan tidak terdapat beda nyata, demikian juga pemberian mikoriza arbuskular. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap pertambahan jumlah helai daun dapat dilihat pada, tabel 4. 5

Table 4. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap pertambahan jumlah helai daun bibit kelapa sawit di main nursery.

Pupuk P	Mikoriza			
	0 g	30 g	50 g	Rerata (helai)
0 g	3,80	3,20	4,00	3,67 a
5 g	3,80	4,00	4,00	3,93 a
10 g	3,40	3,20	3,40	3,33 a
Rerata	3,67 p	3,47 p	3,80 p	(-)

Keterangan : Angka rerata yang di ikuti huruf yang sama pada kolom dan baris menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan hasil uji DMRT 5 %.

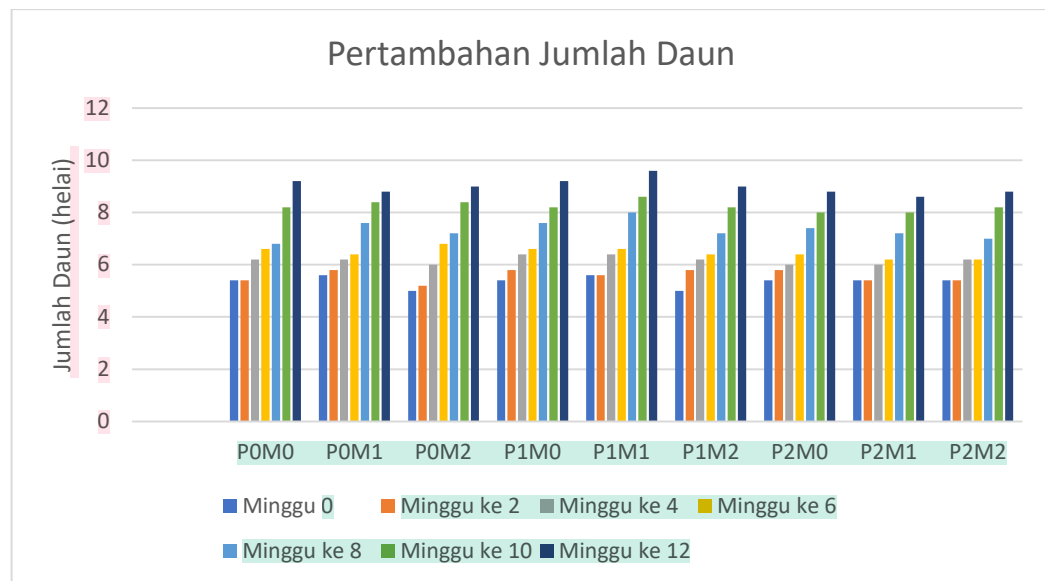
(-) : Tidak terdapat interaksi nyata

Tabel 4 menunjukkan bahwa pemberian pupuk P tidak berpengaruh nyata terhadap pertambahan jumlah helai daun bibit kelapa sawit di main nursery demikian juga pemberian mikoriza arbuskular tidak berpengaruh nyata.

Tidak adanya pengaruh yang nyata dari perlakuan pemupukan P berkaitan erat dengan sifat perkembangan vegetatif bibit sawit. Inisiasi dan diferensiasi calon daun baru pada titik tumbuh (meristem apikal) membutuhkan waktu serta ketersediaan hara yang seimbang. Pada media tanah masam atau tanah berkembang lanjut, maraknya fiksasi unsur P oleh kation Al dan Fe membatasi ketersediaan fosfor bebas yang dapat diserap tanaman, sehingga belum mampu memicu percepatan pembentukan helai daun baru secara signifikan. Pada perlakuan fungi mikoriza arbuskular (FMA) yang belum memberikan dampak nyata diduga terjadi karena alokasi energi fotosintesis dan nutrisi hasil serapan hifa diprioritaskan untuk pemulihan serta pengembangan sistem perakaran di dalam media tanam (Watoni *et al.*, 2020). Pembentukan organ daun baru menuntut akumulasi hara N dan P yang cukup di jaringan tajuk sebelum akhirnya dapat mengekspresikan pembentukan daun baru yang mekar

sempurna.

Meskipun hasil analisis sidik ragam tidak berbeda nyata, hasil dari data rerata pada Tabel 4 mencatat bahwa kombinasi perlakuan dosis 5 g pupuk P + 30 g mikoriza dan perlakuan dosis 5 g pupuk P + 50 g mikoriza memberikan penambahan jumlah daun terbanyak, yakni 4,00 helai. Pada pengaruh tunggal pupuk P, perlakuan dosis 5 g pupuk juga menghasilkan rerata tertinggi sebesar 3,93 helai. Hal ini menunjukkan bahwa pemberian P dosis sedang (5 g pupuk) menciptakan kondisi lingkungan tanah yang lebih optimal bagi bibit tanpa mengganggu proses kolonisasi fungi mikoriza.



Gambar 3. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap pertambahan jumlah helai daun bibit kelapa sawit.

Pada gambar 3 kondisi jumlah daun awal bibit kelapa sawit pada Minggu 0 berada pada kisaran yang tidak homogen, yaitu berkisar antara 5,0 helai (P0M2, P1M2) hingga 5,6 helai (P0M1, P1M1). Oleh karena itu, evaluasi efektivitas perlakuan lebih tepat ditinjau berdasarkan pertambahan jumlah helai daun dari minggu ke-0 hingga minggu ke-12. Pada akhir pengamatan,

pertambahan jumlah daun tertinggi dicapai oleh perlakuan P0M2, P1M1, dan P1M2 yaitu masing-masing sebesar 4,0 helai, disusul oleh perlakuan P0M0 dan P1M0 sebesar 3,8 helai. Sementara itu, pertambahan jumlah daun terendah dicatatkan oleh perlakuan P0M1 (3,2 helai), P2M1 (3,2 helai), serta P2M0 dan P2M2 (masing-masing 3,4 helai).

1 Peningkatan jumlah daun yang terjadi secara berkelanjutan dari minggu ke-0 hingga minggu ke-12 pada seluruh perlakuan menandakan bahwa bibit kelapa sawit berada dalam fase pertumbuhan vegetatif aktif. Proses diferensiasi organ baru ini memerlukan ketersediaan energi metabolik yang tinggi serta suplai hara esensial, khususnya fosfor (P). Unsur P berperan vital dalam pembentukan *Adenosine triphosphate* (ATP) dan sintesis asam nukleat yang memacu aktivitas pembelahan sel meristematik di pucuk tanaman. Selain ketersediaan P, keberadaan fungi mikoriza arbuskular (FMA) memberikan kontribusi fisiologis melalui jangkauan hifa eksternal yang memperluas area penyerapan hara dan air di rizosfer (Smith & Read, 2008). Inokulasi FMA juga diketahui memicu sintesis fitohormon endogen seperti sitokinin, yang berperan penting dalam merangsang pembelahan sel serta diferensiasi primordium daun baru. Hal ini terlihat dari tingginya pertambahan jumlah daun pada perlakuan P1M1, P1M2, dan P0M2 (4,0 helai), yang menunjukkan bahwa ketersediaan P yang moderat dikombinasikan dengan pemanfaatan mikoriza mampu memberikan kondisi ideal bagi pembentukan organ daun. Perlakuan dengan dosis pupuk P tinggi (P2M0, P2M1, dan P2M2) mencatatkan pertambahan jumlah daun yang relatif lebih rendah (3,2–3,4 helai). Fenomena ini diduga

berkaitan dengan pergeseran alokasi fotoasimilat (sumber energi) yang lebih banyak ditranslokasikan untuk penebalan jaringan batang dan pemanjangan dan volume akar terlebih dahulu dari pada pembentukan primordium daun baru. Di samping itu, konsentrasi P terlarut yang tinggi di dalam tanah dapat menekan efisiensi kolonisasi FMA serta memicu interaksi antagonis terhadap penyerapan hara mikro seperti Seng (Zn) yang berperan dalam pembentukan auksin dan perkembangan daun.

4. Berat segar tajuk

Hasil sidik ragam pada lampiran 3 menunjukkan tidak terjadi interaksi nyata antara kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap berat segar tajuk pada bibit kelapa sawit *main nursery*. Pemberian pupuk P menunjukkan tidak terdapat beda nyata, demikian juga pemberian mikoriza arbuskular. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap berat segar tajuk dapat di lihat pada, tabel 5.

Table 5. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap berat segar tajuk bibit (g) kelapa sawit di main nursery.

Pupuk P	Mikoriza			
	0 g	30 g	50 g	Rerata (g)
0 g	61,36	61,84	61,00	62,08 a
5 g	63,40	71,20	63,92	65,49 a
10 g	55,60	62,28	64,28	60,72 a
Rerata	60,12 p	65,10 p	63,06 p	(-)

Keterangan : Angka rerata yang di ikuti huruf yang sama pada kolom dan baris menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan hasil uji DMRT 5 %.

(-) : Tidak terdapat interaksi nyata

Tabel 5 menunjukan bahwa pemberian pupuk P tidak berpengaruh nyata

terhadap berat segar tajuk bibit kelapa sawit di *main nursery* demikian juga pemberian mikoriza arbuskular tidak berpengaruh nyata.

Meskipun hasil analisis sidik ragam tidak berbeda nyata, data rerata pada Tabel 8 menunjukkan bahwa faktor tunggal P1 (dosis pupuk 5 g) menghasilkan rerata berat segar tajuk tertinggi yaitu 65,49 g, sedangkan pada faktor mikoriza dicapai oleh dosis 30 g yaitu sebesar 65,10 g. Hal ini menunjukkan bahwa dosis P1 dan M1 berada pada taraf yang efisien. Pemberian P dosis 5 g mampu mendukung proses fotosintesis dan pembentukan jaringan vegetatif tajuk secara optimal, sehingga kadar air dan akumulasi sel tajuk terjaga dengan baik. pemberian pupuk P yang terlalu tinggi dosis 10 g cenderung tidak efisien karena penambahan hara berlebih tidak lagi meningkatkan pembentukan biomassa basah, sedangkan tanpa pemberian P dosis 0 g pupuk laju pembelahan sel jaringan tajuk kurang optimal akibat keterbatasan nutrisi. pemberian mikoriza dosis 30 g (M1) telah memadai untuk memperluas jangkauan penyerapan air dan hara P dari media tanah yang kemudian ditranslokasikan ke bagian atas tanaman.

5. Berat kering tajuk

Hasil sidik ragam pada lampiran 4 menunjukkan tidak terjadi interaksi nyata antara kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap berat kering tajuk pada bibit kelapa sawit *main nursery*. Pemberian pupuk P menunjukkan tidak terdapat beda nyata, demikian juga pemberian mikoriza arbuskular. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap berat kering tajuk dapat di lihat pada, tabel 6.

Table 6. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap berat kering tajuk bibit (g) kelapa sawit di main nursery.

Pupuk P	Mikoriza			
	0 g	30 g	50 g	Rerata (g)
0 g	19,44	19,04	19,16	19,57 a
5 g	20,52	22,00	20,28	20,57 a
10 g	17,20	19,88	20,32	19,13 a
Rerata	19,05 p	20,30 p	19,92 p	(-)

Keterangan : Angka rerata yang di ikuti huruf yang sama pada kolom dan baris menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan hasil uji DMRT 5 %

(-) : Tidak terdapat interaksi nyata

Tabel 6 menunjukan bahwa pemberian pupuk P tidak berpengaruh nyata terhadap berat kering tajuk bibit kelapa sawit di main nursery demikian juga pemberian mikoriza arbuskular tidak berpengaruh nyata.

Meskipun hasil analisis sidik ragam tidak berbeda nyata, data rerata pada Tabel 6 menunjukkan bahwa faktor tunggal dosis pupuk 5 g menghasilkan rerata berat kering tajuk tertinggi yaitu 20,57 g, sedangkan pada faktor mikoriza dicapai oleh dosis 30 g yaitu sebesar 20,30 g. Hal ini menunjukkan bahwa dosis 5 g pupuk dan 30 g mikoriza berada pada taraf yang efisien dalam pembentukan akumulasi biomassa padat (asimilat) tajuk. Berat kering tajuk mencerminkan total materi organik hasil fotosintesis yang ditranslokasikan dan diendapkan pada organ atas tanaman, khususnya daun dan pelepah.

Pemberian P dosis 5 g mampu menyediakan kebutuhan hara fosfor dan energi (ATP) yang memadai untuk mendukung pembentukan klorofil serta proses fotosintesis secara optimal. Sebaliknya, tanpa pemberian P dosis 0 g pembentukan biomassa tajuk menjadi terbatas akibat defisiensi hara P, sedangkan pada dosis 10 g pupuk penambahan hara berlebih tidak lagi

meningkatkan akumulasi bahan kering tajuk. Sementara itu, pemberian mikoriza dosis 30 g telah memadai untuk mengoptimalkan penyerapan hara P dari media tanah yang kemudian ditranslokasikan ke organ atas tanaman guna pembentukan sel-sel daun dan pelepah baru. Penambahan dosis mikoriza hingga 50 g tidak memberikan perbedaan nyata karena laju translokasi hara dan alokasi hasil fotosintesis pada bagian tajuk telah mencapai kondisi seimbang.

6. Panjang akar

Hasil sidik ragam pada lampiran 4 menunjukkan terjadi interaksi nyata antara kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap panjang akar tanaman pada bibit kelapa sawit *main nursery*. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap panjang akar tanaman dapat dilihat pada tabel 7.

Table 7. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap panjang akar bibit (cm) kelapa sawit di *main nursery*.

Pupuk P	Mikoriza			Rerata (cm)
	0 g	30 g	50 g	
0 g	47,00 f	54,70 bc	62,10 a	
5 g	53,80 cd	53,00 cd	54,60 bc	
10 g	50,00 e	51,20 de	57,20 b	
Rerata				(+)

Keterangan : Angka rerata yang diikuti huruf yang sama pada kolom dan baris menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan hasil uji DMRT 5 %.

(+) : Interaksi nyata

Tabel 7 menunjukkan bahwa adanya interaksi nyata antara perlakuan pupuk P dan mikoriza arbuskular terhadap parameter panjang akar. Kombinasi perlakuan dosis 0 g Pupuk P + 50 g Mikoriza menghasilkan rerata tertinggi yaitu 62,10 cm, yang berbeda nyata dengan seluruh kombinasi perlakuan lainnya. Sebaliknya,

rerata terendah ditunjukkan oleh tanpa perlakuan (kontrol) sebesar 47,00 cm.

79 Terjadinya interaksi yang nyata ini membuktikan bahwa efek mikoriza arbuskular terhadap perpanjangan akar sangat dipengaruhi oleh tingkat ketersediaan pupuk fosfor di dalam media tanam. Pada kondisi tanpa pemupukan P ketersediaan fosfor tanah tergolong terbatas atau berada dalam keadaan terfiksasi oleh kation Al dan Fe. Keterbatasan unsur P ini memicu mekanisme adaptasi alami tanaman bersama fungi mikoriza arbuskular (FMA) dosis tinggi 50 g untuk memanjangkan sistem perakaran untuk menjangkau zona rizosfer yang lebih luas (Lestari *et al.*, 2018). Aplikasi mikoriza arbuskular memicu pembentukan hifa eksternal dan memproduksi zat pengatur tumbuh seperti auksin yang dapat merangsang pembelahan serta pemanjangan sel-sel pada tudung dan ujung akar (*root tip*). Morfologi yang kompleks dan adaptif terutama sistem perakaran memungkinkan tumbuh optimal pada berbagai kondisi lahan termasuk tanah marginal seperti ultisol, dan hubungan simbiotik dengan mikoriza arbuskular meningkatkan efisiensi penyerapan hara pada tanah kurang subur (Watoni *et al.*, 2020). Ketika dosis mikoriza ditingkatkan hingga 50 g tanpa penambahan pupuk P sintesis, kolonisasi FMA berkembang optimal karena tanaman menyerahkan alokasi asimilatnya untuk membentuk jaringan simbiosis akar-jamur yang kuat.

Sebaliknya, pada perlakuan yang diberi pupuk P dosis sedang hingga tinggi pada perlakuan dosis 5 g dan 10 g, panjang akar yang dihasilkan cenderung lebih pendek dibandingkan perlakuan dosis 0 g pupuk + 50 g mikoriza. Hal ini terjadi karena ketersediaan fosfor yang memadai dari pupuk

sintesis menyebabkan tanaman tidak perlu merespons kecemasan kekurangan hara dengan memanjangkan akarnya secara agresif (Nurbaity *et al.*, 2025). Sementara itu, rerata panjang akar terendah pada tanpa perlakuan (kontrol) menghasilkan 47,00 cm mengindikasikan bahwa tanpa pasokan pupuk P dan tanpa bantuan mikoriza, bibit kelapa sawit mengalami hambatan pembelahan sel akar akibat defisiensi fosfor .

7. Volume akar

Hasil sidik ragam pada lampiran 5 menunjukkan terjadi interaksi nyata antara kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap panjang akar pada bibit kelapa sawit *main nursery*. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap volume akar tanaman dapat di lihat pada, tabel 8.

Table 8. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap volume akar bibit (ml) kelapa sawit di main nursery.

Pupuk P	Mikoriza			Rerata (ml)
	0 g	30 g	50 g	
0 g	38,60 d	47,60 bc	40,60 cd	
5 g	43,30 bcd	49,40 b	60,00 a	
10 g	44,60 bcd	44,60 bcd	47,60 bc	
Rerata				(+)

Keterangan : Angka rerata yang di ikuti huruf yang sama pada kolom dan baris menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan hasil uji DMRT 5 %.

(+) : Interaksi nyata

Tabel 8 menunjukkan bahwa terdapat interaksi nyata antara dosis pupuk P dan mikoriza terhadap parameter volume akar. Kombinasi perlakuan dosis 5 g Pupuk P + 50 g Mikoriza menghasilkan rerata tertinggi yaitu 60,00 ml, yang berbeda nyata dari seluruh kombinasi perlakuan lainnya. Sebaliknya, rerata terendah ditunjukkan oleh perlakuan kontrol yaitu sebesar 38,60 ml.

Terjadinya interaksi yang signifikan pada kombinasi perlakuan dosis 5 g P + 50 g Mikoriza memperlihatkan adanya hubungan keterpaduan antara ketersediaan hara fosfor awal dengan tingkat kolonisasi mikoriza. Pada fase awal pertumbuhan, pupuk fosfat sangat dibutuhkan untuk merangsang perkembangan akar yang sehat dan luas, yang selanjutnya meningkatkan kemampuan tanaman dalam menyerap air dan unsur hara dari tanah (Rivae, 2025). Pemberian pupuk P dosis sedang (5 g) berperan sebagai *starter nutrient* yang menyediakan ketersediaan unsur P awal untuk mendukung pembentukan energi (ATP) bagi proses metabolisme dan pembelahan sel-sel perakaran. Ketersediaan P pada taraf ini tidak menekan perkecambahan spora fungi mikoriza arbuskular (FMA). Ketika dipadukan dengan inokulasi mikoriza dosis 50 g kelimpahan jamur FMA mampu menginfeksi perakaran secara masif hifa eksternal mikoriza tidak hanya memanjang, tetapi juga merangsang percabangan akar lateral dan pembentukan bulu-bulu akar baru, membuat arsitektur sistem perakaran mengalami penebalan dan perluasan volume secara nyata.

Pada perlakuan dengan dosis P lebih tinggi seperti dosis 10 g P + 50 g mikoriza rerata volume akar mengalami penurunan menjadi 47,60 cm, karena pemberian pupuk fosfat dalam jumlah berlebih cenderung menurunkan tingkat ketergantungan simbiotik bibit terhadap FMA. Ketersediaan P yang tinggi di media tanah memberi sinyal fisiologis bagi tanaman untuk mengurangi alokasi fotosintat ke mikoriza, sehingga perkembangan hifa dan penambahan volume perakaran menjadi berkurang.

Pada perlakuan dosis 0 g P + 50 g mikoriza tanaman merespon

kekurangan hara P dengan pemanjangan akar dengan panjang akar mencapai 62,10 cm sebagai strategi penjelajahan hara (*root foraging*). Namun, karena tidak ada pasokan pupuk P sama sekali, pembentukan cabang-cabang akar sekunder menjadi terbatas sehingga volume akarnya relatif rendah yaitu 40,60 ml. Sebaliknya, pada perlakuan dosis 5 g P + 50 g Mikoriza adanya tambahan pupuk P dosis yang optimal membuat energi dari fotosintesis bisa dialokasikan untuk percabangan dan penebalan akar lateral, sehingga menghasilkan volume akar yang paling besar yaitu 60,00 ml.

2 8. Berat segar akar

1 Hasil sidik ragam pada lampiran 6 menunjukkan tidak terjadi interaksi nyata antara kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap berat segar akar pada bibit kelapa sawit *main nursery*. Pemberian pupuk P menunjukkan tidak terdapat beda nyata, demikian juga pemberian mikoriza arbuskular. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap pertambahan tinggi tanaman dapat di lihat pada, tabel 9.

1 *Table 9. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap berat segar akar bibit (g) kelapa sawit di main nursery.*

Pupuk P	Mikoriza			Rerata (g)
	0 g	30 g	50 g	
0 g	27,20	32,28	28,20	29,36 a
5 g	32,20	38,16	35,68	35,34 a
10 g	27,16	34,04	33,84	31,68 a
Rerata	28,98 p	34,82 p	32,57 p	(-)

2 **Keterangan** : Angka rerata yang di ikuti huruf yang sama pada kolom dan baris menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan hasil uji DMRT 5 %.

1 **(-)** : Tidak terdapat interaksi nyata

Tabel 9 menunjukan bahwa pemberian pupuk P tidak berpengaruh nyata

terhadap berat segar akar bibit kelapa sawit di *main nursery* demikian juga pemberian mikoriza arbuskular tidak berpengaruh nyata.

Berat segar akar adalah bobot total perakaran yang ditimbang secara langsung setelah pembongkaran dan pembersihan media tanam. Sebagian besar porsi dari berat segar akar (sekitar 70–80%) terdiri dari kandungan air di dalam sel-sel perakaran. Karena volume air di dalam jaringan akar sangat dipengaruhi oleh kelembapan media tanam dan laju transpirasi pada saat pemanenan, nilai berat segar menjadi sangat beragam sehingga tidak ada perbedaan yang signifikan antar perlakuan.

Meskipun hasil analisis sidik ragam tidak berbeda nyata, data rerata pada tabel 9 menunjukkan bahwa faktor tunggal dosis pupuk 5 g menghasilkan rerata berat segar akar tertinggi yaitu 35,34 g, sedangkan pada faktor mikoriza dicapai oleh perlakuan dosis 30 g yaitu sebesar 34,82 g. Hal ini menunjukkan bahwa dosis 5 g pupuk P dan 30 g mikoriza berada pada taraf yang efisien. Pemberian P dosis 5 g mampu menyediakan energi (ATP) yang cukup untuk pembelahan sel perakaran, sehingga sel-sel akar dapat berkembang dan menampung air secara optimal. Sebaliknya, pemberian P yang terlalu tinggi 10 g tidak lagi meningkatkan kapasitas penampungan air jaringan akar, sedangkan tanpa pemberian pupuk P dosis 0 g pembentukan jaringan akar kurang optimal. Sementara itu, pemberian mikoriza dosis 30 g telah memadai untuk membentuk jaringan hifa eksternal yang membantu menyerap air dari pori-pori mikro tanah sehingga sel perakaran tetap terisi air

9. Berat kering akar

Hasil sidik ragam pada lampiran 6 menunjukkan tidak terjadi interaksi nyata antara kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap berat kering akar pada bibit kelapa sawit *main nursery*. Pemberian pupuk P menunjukkan tidak terdapat beda nyata, demikian juga pemberian mikoriza arbuskular. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap berat kering akar dapat di lihat pada, tabel 10.

Table 10. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap berat kering akar bibit (g) kelapa sawit di *main nursery*.

Pupuk P	Mikoriza			
	0 g	30 g	50 g	Rerata (g)
0 g	9,36	10,48	9,04	9,62 a
5 g	11,04	11,88	11,16	11,36 a
10 g	8,32	11,80	10,80	10,30 a
Rerata	9,57 p	11,38 p	10,33 p	(-)

Keterangan : Angka rerata yang di ikuti huruf yang sama pada kolom dan baris menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan hasil uji DMRT 5 %.

(-) : Tidak terdapat interaksi nyata

Tabel 10 menunjukan bahwa pemberian pupuk P tidak berpengaruh nyata terhadap berat kering akar bibit kelapa sawit di *main nursery* demikian juga pemberian mikoriza arbuskular tidak berpengaruh nyata.

Hasil analisis sidik ragam pada lampiran 6 menunjukkan tidak berbeda nyata. Data rerata pada tabel 10 menunjukkan bahwa faktor tunggal perlakuan dosis pupuk 5 g menghasilkan rerata berat kering akar tertinggi yaitu 11,36 g, sedangkan pada faktor mikoriza dicapai oleh perlakuan dosis 30 g yaitu sebesar 11,38 g. Hal ini menunjukkan bahwa dosis 5 g pupuk P dan 30 gmikoriza berada pada taraf yang efisien dalam pembentukan akumulasi biomassa padat akar.

Berbeda dengan berat segar yang dipengaruhi oleh fluktuasi kadar air, berat kering mencerminkan hasil fotosintesis yang ditranslokasikan menjadi jaringan struktural akar seperti dinding sel. Pemberian P dosis 5 g mampu memenuhi kebutuhan energi (ATP) dan unsur hara esensial untuk penyusunan materi padat akar secara optimal. Sebaliknya, tanpa pemberian P dosis 0 g pembentukan biomassa akar terbatas akibat defisiensi hara, sedangkan pada dosis 10 g penambahan hara berlebih tidak lagi meningkatkan laju akumulasi bahan kering perakaran. Sementara itu, pemberian mikoriza dosis 30 g telah memadai untuk mengoptimalkan penyerapan hara P terikat yang kemudian dialokasikan untuk pembentukan biomassa akar.

10. Kandungan fosfor daun %

Table 11. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap serapan hara P pada daun bibit (%) kelapa sawit di main nursery.

No	Kode	Hasil kadar P (%)
1	P0M0 (kontrol)	0,67 %
2	P0M1 (0 g P + 30 g Mikoriza)	0,71 %
3	P0M2 (0 g P + 50 g Mikoriza)	0,76 %
4	P1M0 (5 g P + 0 g Mikoriza)	0,84 %
5	P1M1 (5 g P + 30 g Mikoriza)	0,86 %
6	P1M2 (5 g P + 50 g Mikoriza)	0,90 %
7	P2M0 (10 g P + 0 g Mikoriza)	0,77 %
8	P2M1 (10 g P + 30 g Mikoriza)	0,86 %
9	P2M2 (10 g P + 50 g Mikoriza)	0,83 %

Tabel 11 menunjukkan rerata serapan hara P pada daun bibit kelapa sawit di main nursery meningkat dari tanpa perlakuan pupuk P sebanyak 0,71% ke perlakuan dosis 5 g pupuk P sebanyak 0,86%, namun mengalami penurunan pada

perlakuan dosis 10 g pupuk P sebanyak 0,82%. Peningkatan kadar P daun pada perlakuan dosis 5 g mengindikasikan bahwa pasokan P tersebut berada pada taraf optimum untuk mendukung pertumbuhan vegetatif bibit kelapa sawit, terutama dalam pembentukan jaringan daun baru, sintesis ATP, dan pengembangan sistem perakaran. Sebaliknya, penurunan pada dosis 10 g menunjukkan hasil yang semakin menurun. Pada pembibitan utama dengan volume media *polybag* yang terbatas, pemberian pupuk P berlebih memicu kejenuhan serapan akar atau meningkatkan fiksasi P oleh kation Al/Fe tanah, sehingga efisiensi translokasi hara P menuju organ daun justru menurun (Same, 2011).

Perlakuan faktor mikoriza arbuskular menunjukkan tren peningkatan kadar P daun bibit kelapa sawit yang konsisten secara linier, yaitu dari perlakuan tanpa mikoriza sebanyak 0,76%, perlakuan dosis 30 g mikoriza sebanyak 0,81%, hingga perlakuan dosis 50 g mikoriza sebanyak 0,83%. Kenaikan secara bertahap ini memperlihatkan bahwa peningkatan taraf perlakuan mikoriza arbuskular berperan nyata dalam mengoptimalkan kondisi rizosfer bibit di *main nursery*. Penelitian Basri, (2018) menyampaikan bahwa Perlakuan mikoriza mampu memperluas jangkauan penyerapan akar dalam *polybag* serta membantu memobilisasi ion fosfat yang terikat pada media tanam, sehingga suplai hara P yang sudah terserap oleh akar dan ditranslokasikan ke daun menjadi lebih berkelanjutan seiring bertambahnya umur bibit.

Kombinasi perlakuan dosis 5 g pupuk + 30 g mikoriza menghasilkan rerata serapan P daun tertinggi sebanyak 0,90%, sedangkan tanpa perlakuan (kontrol) menghasilkan nilai terkecil yaitu 0,67%. Tingginya hasil serapan hara

P pada perlakuan dosis 5 g pupuk + 50 g mikoriza di sebabkan oleh sinergi antara kecukupan suplai fosfor dari pemberian 5 g pupuk dan efisiensi serapan akar yang maksimal dari pemberian 50 g mikoriza. Interaksi ini menciptakan lingkungan rizosfer yang ideal bagi metabolisme bibit kelapa sawit di *main nursery*, menjadikan perlakuan dosis 5 g pupuk + 50 g mikoriza sebagai kombinasi perlakuan paling potensial dalam memacu pertumbuhan serta serapan hara pada bibit kelapa sawit.

11. Perubahan pH media sesudah perlakuan

Hasil sidik ragam pada lampiran 6 menunjukkan tidak terjadi interaksi nyata antara kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap perubahan pH media pada bibit kelapa sawit *main nursery*. Pemberian pupuk P menunjukkan tidak terdapat beda nyata, sedangkan pemberian mikoriza arbuskular menunjukkan pengaruh beda nyata terhadap perubahan pH. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap perubahan pH media tanam dapat dilihat pada Tabel 12.

Table 12. Pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap perubahan pH media tanah bibit kelapa sawit di main nursery.

Pupuk P	Mikoriza			Rerata (pH)
	M0 (0 g)	M1 (30 g)	M2 (50)	
P0 (0 g)	0,50	0,70	0,80	0,66 a
P1 (5 g)	0,20	0,80	1,30	0,76 a
P2 (50 g)	0,60	0,90	1,30	0,93 a
Rerata	0,43 r	0,80 q	1,13 p	(-)

Keterangan : Angka rerata yang di ikuti huruf yang sama pada kolom dan baris menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan hasil uji DMRT 5 %.

(-) : Tidak terdapat interaksi nyata

Tabel 12 menunjukkan bahwa tidak terdapat interaksi signifikan antara

1 perlakuan Pupuk P dan mikoriza terhadap parameter perubahan PH media setelah perlakuan. Rerata perubahan pH media tanah menunjukkan bahwa perlakuan mikoriza arbuskular memberikan pengaruh yang berbeda nyata secara mandiri. Dosis mikoriza 50 g menghasilkan rerata perubahan pH tertinggi sebesar 1,13 yang berbeda nyata dengan mikoriza 30 g sebesar 0,80 dan tanpa mikoriza sebesar 0,43. Sebaliknya, perlakuan pupuk P tidak memberikan perbedaan yang nyata antar taraf perlakuan (0 g, 5 g, dan 10 g pupuk P).

Peningkatan dosis mikoriza terbukti secara nyata mampu mendorong kenaikan pH media tanah menuju kondisi yang lebih netral. Hal ini menunjukkan bahwa aplikasi mikoriza arbuskular, khususnya pada dosis 50 g, sangat efektif dalam merekayasa dan mengoreksi tingkat kemasaman tanah pada media jenis Ultisol. Mekanisme kenaikan pH tanah oleh fungi mikoriza arbuskular (FMA) berkaitan erat dengan aktivitas biokimia di wilayah rizosfer, hifa eksternal mikoriza merangsang pertumbuhan senyawa-senyawa organik serta memicu pelepasan ikatan fosfat yang terikat oleh *ion Aluminium* (Al) dan *Ferrum* (Fe), proses pelepasan P bebas serta penyerapan hara oleh jaringan hifa mengubah keseimbangan penyerapan unsur hara P yang sudah tersedia dan dapat diserap oleh akar (Nurmasyitah *et al.*, 2013). Sebaliknya, pada perlakuan tanpa mikoriza, aktivitas biokimia rizosfer terbatas sehingga perubahan pH tanah relatif rendah yaitu 0,43. Sementara itu, perlakuan pupuk P yang tidak berbeda nyata menunjukkan bahwa penambahan pupuk P anorganik secara mandiri tidak serta-merta mengubah reaksi atau pH tanah. Pemberian pupuk P pada taraf dosis 5 g maupun dosis 10 g lebih berperan dalam menyediakan pasokan unsur fosfat

terlarut, namun tidak secara langsung mengubah tingkat ke asaman tanah ultisol tanpa ditunjang oleh aktivitas mikroorganisme hayati pelarut hara.

Pemberian kombinasi pupuk P dan mikoriza arbuskular pada media tanah Ultisol memiliki keterkaitan yang sangat erat dalam rekayasa kondisi rizosfer serta arsitektur akar bibit kelapa sawit. Inokulasi mikoriza secara mandiri dengan dosis 50 g mampu meningkatkan pH tanah Ultisol hingga 1,13 menuju kondisi netral melalui aktivitas biokimia hifa eksternal yang melepaskan ikatan fosfat dari kation Aluminium (Al) dan Besi (Fe). Pada perlakuan tanpa pupuk P dosis 0 g dengan mikoriza dosis 50 g, keterbatasan P terlarut memicu mekanisme adaptasi berupa pemanjangan akar utama (root foraging) hingga mencapai panjang akar tertinggi yaitu 62,10 cm. Namun, ketika diberikan pupuk P dosis 5 g P sebagai starter nutrient yang dipadukan dengan mikoriza 50 g, energi fotosintesis dialihkan untuk percabangan akar lateral dan pembentukan bulu akar baru, sehingga menghasilkan volume akar terbesar yaitu 60,00 ml. Kenaikan pH serta perluasan volume perakaran dan jaringan hifa eksternal ini menurunkan fiksasi P dan memperluas area kontak untuk penyerapan, yang kemudian menghasilkan serapan hara P daun tertinggi sebesar 0,90% pada perlakuan pupuk P dosis 5 g dengan mikoriza dosis 30 g.

Hubungan antar-parameter tersebut tidak semuanya menunjukkan kecenderungan linier, melainkan mengikuti pola hubungan yang spesifik. Panjang akar dan volume akar tidak berbanding lurus karena adanya trade-off adaptasi pemanjangan akar lebih dominan saat terjadi keterbatasan hara P pada perlakuan tanpa pupuk + 50 g mikoriza untuk penjelajahan, sedangkan

pembesaran volume akar terjadi ketika hara P berada pada tingkat kecukupan pada perlakuan pupuk 5 g + 50 g mikoriza untuk mendukung percabangan akar lateral. Sebaliknya, volume akar berbanding lurus dengan serapan hara P pada kondisi optimum, di mana volume akar terbesar yaitu 60,00 ml memfasilitasi serapan hara P daun tertinggi (0,90%). Perubahan pH berbanding lurus dengan serapan P secara tidak langsung, karena peningkatan pH akibat mikoriza membantu melepaskan unsur P yang terikat oleh kation Al/Fe. Sementara itu, dosis pupuk P terhadap serapan P tidak menunjukkan hubungan berbanding lurus, melainkan membentuk kurva optimum, yaitu serapan P meningkat dari tanpa pupuk P (0,71%) menjadi dosis 5 g P (0,86%), lalu menurun pada dosis 10 g P (0,82%) akibat kejenuhan serapan pada media polybag.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilaksanakan mengenai pengaruh kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular terhadap pertumbuhan dan serapan hara bibit kelapa sawit di main nursery pada media tanah ultisol, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Perlakuan kombinasi pupuk P dengan mikoriza arbuskular berpengaruh nyata terhadap panjang dan volume akar, di mana kombinasi perlakuan dosis 0 g P + 50 g mikoriza menghasilkan panjang akar tertinggi yaitu 62,10 cm dan perlakuan dosis 5 g P + 50 g FMA menghasilkan volume akar terbesar yaitu 60,00 ml. Sebaliknya, interaksi tidak berpengaruh nyata ($p > 0,05$) terhadap pertumbuhan vegetatif (tinggi, diameter, jumlah daun), biomassa, serapan hara P daun, maupun pH tanah. Secara deskriptif data laboratorium, serapan hara P daun tertinggi dicapai pada kombinasi perlakuan dosis 5 g P + 30 g mikoriza yaitu 0,90%, yang juga secara konsisten menunjukkan kecenderungan rerata pertambahan pertumbuhan fisik terbaik (tinggi 6,60 cm; diameter 1,43 cm; jumlah daun 4,00 helai).
2. Pemberian pupuk P berpengaruh tidak nyata ($p > 0,05$) terhadap seluruh parameter penelitian, meliputi pertumbuhan vegetatif (pertambahan tinggi, diameter batang, jumlah daun), akumulasi biomassa tajuk dan akar, serapan hara P daun, serta perubahan pH tanah Ultisol.
3. Pemberian mikoriza arbuskular berpengaruh nyata terhadap perubahan pH tanah Ultisol, di mana dosis 50 g mikoriza menghasilkan peningkatan pH

tertinggi sebesar 1,13 menuju kondisi yang lebih netral. Sebaliknya, faktor tunggal ini berpengaruh tidak nyata ($p > 0,05$) terhadap parameter pertumbuhan vegetatif fisik, biomassa bibit, maupun serapan hara P daun.

B. Saran

1. Homogenitas bahan tanam Penelitian selanjutnya disarankan melakukan seleksi bahan tanam yang lebih ketat pada Minggu 0 agar kondisi awal seperti tinggi, diameter, dan jumlah daun yang homogen, sehingga keragaman data awal tidak memengaruhi evaluasi penambahan pertumbuhan.
2. Analisis parameter tambahan yaitu kualitas simbiosis disarankan untuk mengukur persentase derajat kolonisasi/infeksi FMA pada akar serta mengukur kadar P-tersedia tanah untuk memantau dinamika fiksasi Al/Fe dan efisiensi pelarutan P di rizosfer.
3. Pengamatan bibit kelapa sawit disarankan untuk diperpanjang melebihi 12 minggu. Perpanjangan waktu ini diperlukan agar proses penyerapan dan penyaluran hara oleh mikoriza dari dalam tanah menuju daun berjalan optimal, pembelahan sel kambium untuk penebalan batang dapat berlangsung maksimal, serta akumulasi bahan padat (biomassa) pada seluruh organ tanaman dapat terukur.