

Evaluasi Pengaruh Pupuk Hayati terhadap Serapan Nitrogen Tanaman Kelapa Sawit Menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) di Bogor, Indonesia

Bayu Adirianto¹, Endang Krisnawati¹, Taufiq Bachtiar², Titis Pury Purboningtyas¹

¹Politeknik Pembangunan Pertanian Bogor, Indonesia ²Badan Riset dan Inovasi Nasional, Indonesia

Email: ¹bayu1189@yahoo.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh pupuk hayati terhadap serapan nitrogen pada tanaman kelapa sawit (*Elaeis guineensis*). Metode yang digunakan meliputi percobaan lapangan dengan desain acak lengkap (RAL) dan dilanjutkan dengan uji Duncan, dimana tanaman kelapa sawit diberi perlakuan pupuk hayati dengan variasi dosis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan pupuk hayati secara signifikan meningkatkan serapan nitrogen tanaman, yang diindikasikan oleh peningkatan kandungan nitrogen dalam jaringan tanaman. Perlakuan mencakup 4 jenis biofertilizer dengan 3 kadar yaitu 10, 20, dan 30 mL/L air serta dilaksanakan dalam 8 ulangan. Temuan penelitian mengindikasikan bahwa merek A memiliki dampak signifikan terhadap berat kering akar tanaman pada dosis 10 mL/L air, dengan berat kering akar mencapai 2,65 gram per tanaman. Namun, tingkat penyerapan nitrogen tertinggi ditemukan pada dosis 20 mL/L air, dengan penyerapan nitrogen mencapai 234,86 mg per tanaman.

Kata Kunci: berat kering akar, dosis, pupuk hayati, serapan nitrogen

Abstract

*This study aimed to evaluate the effect of biofertilizer on nitrogen uptake in oil palm (*Elaeis guineensis*) plants. The method used included a completely randomized field experiment (CRD) followed by a Duncan test, where oil palm plants were treated with biofertilizer at varying doses. The results showed that the use of biofertilizer significantly increased plant nitrogen uptake, as indicated by an increase in nitrogen content in plant tissue. The treatments included four types of biofertilizer at three concentrations: 10, 20, and 30 mL/L of water, with eight replications. The study findings indicated that brand A significantly impacted plant root dry weight at a dose of 10 mL/L of water, with root dry weight reaching 2.65 grams per plant. However, the highest nitrogen uptake rate was found at a dose of 20 mL/L of water, with nitrogen uptake reaching 234.86 mg per plant.*

Keywords: biofertilizer, doses, dry weight, nitrogen uptake

1. PENDAHULUAN

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) merupakan salah satu komoditas unggulan dalam sektor perkebunan Indonesia yang memberikan kontribusi signifikan terhadap perekonomian nasional. Peningkatan produktivitas kelapa sawit sangat bergantung pada ketersediaan dan efisiensi penyerapan unsur hara, terutama nitrogen (N), yang berperan penting dalam proses metabolisme dan pertumbuhan tanaman. Kecukupan kebutuhan nitrogen (N) pada tanaman akan menghasilkan pertumbuhan vegetatif yang maksimal, terlihat dari warna hijau tua pada daun. Namun, kelebihan nitrogen akan menghambat proses pembungaan dan pembentukan buah, sementara kekurangan nitrogen akan menyebabkan daun menjadi kuning, tanaman menjadi kerdil, hingga dapat menyebabkan gagal panen (Nurhayati, 2021; Triadiawarman et al., 2022). Hal ini sejalan dengan Murnita dan Taher (2021), penggunaan pupuk anorganik secara terus menerus tanpa disertai penambahan pupuk organik dapat mengakibatkan ketidakseimbangan unsur hara dalam tanah, kerusakan struktur tanah, dan penurunan mikrobiologi tanah. Peningkatan produktivitas kelapa sawit sangat bergantung pada ketersediaan dan efisiensi penyerapan unsur hara, terutama nitrogen (N), yang berperan penting dalam proses metabolisme dan pertumbuhan tanaman. Nitrogen merupakan komponen utama dalam sintesis asam amino, protein, klorofil, dan enzim, yang mendukung proses fotosintesis dan pertumbuhan vegetative.

Pupuk hayati menjadi salah satu alternatif inovatif dalam sistem pertanian berkelanjutan. Pupuk ini mengandung mikroorganisme fungsional yang mampu meningkatkan ketersediaan unsur hara, termasuk nitrogen, melalui mekanisme biologis seperti fiksasi nitrogen, pelarutan senyawa organik, dan peningkatan aktivitas mikroba tanah (Nuraini & Yuliani, 2020). Beberapa mikroorganisme seperti *Azospirillum*, *Azotobacter*, dan *Rhizobium* diketahui efektif dalam meningkatkan serapan nitrogen dan mendukung pertumbuhan tanaman. Sementara itu, penelitian oleh Sudadi et al. (2020) menunjukkan bahwa aplikasi biofertilizer meningkatkan efisiensi penggunaan nitrogen dan mengurangi kebutuhan pupuk kimia hingga 25%. Selain itu, penggunaan pupuk hayati juga terbukti meningkatkan aktivitas mikroba tanah, memperbaiki struktur tanah, dan mendorong perakaran yang lebih sehat (Setiyono et al., 2015; Widiastuti & Yuniarti, 2020). Bakteri seperti *Pseudomonas geniculata* dan *Rhodopseudomonas* sp. terbukti berperan dalam merangsang pertumbuhan akar serta meningkatkan ketersediaan nitrogen melalui aktivitas metabolik dan simbiosis rizosfer. Bahkan, kombinasi pupuk hayati dengan pupuk anorganik dalam dosis efisien mampu menghasilkan pertumbuhan vegetatif dan serapan nitrogen yang lebih tinggi dibandingkan pemupukan tunggal.

Penggunaan pupuk hayati pada tanaman kelapa sawit masih memerlukan kajian lebih lanjut, terutama dalam konteks kondisi agroekosistem tropis yang beragam di Indonesia. Faktor seperti jenis tanah, kelembaban, suhu, dan umur tanaman dapat memengaruhi efektivitas mikroorganisme dalam pupuk hayati. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh aplikasi pupuk hayati terhadap serapan nitrogen pada bibit kelapa sawit berumur lima bulan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan strategi pemupukan yang efisien, ekonomis, dan berkelanjutan dalam sistem budidaya kelapa sawit. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan strategi pemupukan yang lebih efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan dalam budidaya kelapa sawit. Penelitian ini dilakukan untuk menguji pengaruh empat merek biofertilizer yang berbeda terhadap penyerapan nitrogen pada bibit kelapa sawit berumur lima bulan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Politeknik Pengembangan Pertanian Bogor, yang berlokasi di Bogor, Jawa Barat, Indonesia, dan disusun menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL). Bibit kelapa sawit SP540 (Dura x Pisifera) berumur tujuh hari berasal dari Pusat Penelitian Kelapa Sawit di Medan, Sumatera Utara, Indonesia, dan digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 1. Rancangan perlakuan pupuk hayati dalam serapan N

Kode	Perlakuan
P0	Bibit yang diberi pupuk daun dan tanpa pupuk hayati
P1	Pupuk hayati 1, 10 ml/l
P2	Pupuk hayati 1, 20 ml/l
P3	Pupuk hayati 1, 30 ml/l
P4	Pupuk hayati 2, 10 ml/l
P5	Pupuk hayati 2, 20 ml/l
P6	Pupuk hayati 2, 30 ml/l
P7	Pupuk hayati 3, 10 ml/l
P8	Pupuk hayati 3, 20 ml/l
P9	Pupuk hayati 3, 30 ml/l
P10	Pupuk hayati 4, 10 ml/l
P11	Pupuk hayati 4, 20 ml/l
P12	Pupuk hayati 4, 30 ml/l

Percobaan ini mencakup tiga belas perlakuan, dengan data dikumpulkan pada lima bulan pascaperlakuan. Setiap kelompok perlakuan terdiri dari delapan bibit, sehingga total bibit yang

digunakan adalah 104 bibit. Semua bibit kelapa sawit ditanam dalam polibag berukuran 12x18 cm, diisi dengan campuran tanah, kompos, dan sekam dengan perbandingan 2:1:1, dan disiram dua kali seminggu. Berat kering akar dan serapan nitrogen diukur.

Tiga belas perlakuan dilaksanakan dan empat pupuk hayati diberikan pada bibit dengan interval setiap 30 hari, bergantian dengan pupuk daun (2 gram/liter air) selama lima bulan percobaan setiap 30 hari. Tabel 1 menguraikan perlakuan yang digunakan dalam penelitian pupuk hayati

Total sampel berjumlah 104. Analisis nitrogen dilakukan menggunakan metode Kjeldahl. Analisis statistik dilakukan menggunakan analisis varians (ANOVA, $p < 0,05$) untuk mengidentifikasi perbedaan statistik yang signifikan antar perlakuan. Uji Duncan (pada $p < 0,05$) digunakan untuk memastikan rata-rata yang berbeda secara statistik jika hasil ANOVA menunjukkan signifikansi.

Pupuk hayati dan pupuk daun yang terkandung seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Baik pupuk hayati “1” dan “4” mengandung genus *Pseudomonas*.

Tabel 2. Komposisi Biofertilizer

Merk	Kandungan mikroba
1	<i>Bacillus pumillus</i> <i>Debaryomyces hansenii</i> <i>Bacillus thuringiensis</i> <i>Meyerozyma</i> sp. <i>Bacillus methylotrophicus</i> <i>Pseudomonas geniculata</i>
2	<i>Micrococcus</i> sp.
3	<i>Rhodospseudomonas</i> sp
4	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, berat kering diperoleh setelah 5 bulan setelah tanam. P1 menunjukkan berat kering akar tertinggi dan berbeda nyata seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3. Semua biofertilizer berbeda nyata dengan kontrol, kecuali P4, P5, P7, P8, P9, dan P10. Hal ini menunjukkan bahwa P1 (bibit yang diberikan dengan pupuk hayati “1” pada dosis 10 ml/l air) menunjukkan tingkat berat kering akar yang lebih baik daripada P2 dan P3 (bibit yang diberikan pupuk hayati “1” pada dosis 20 dan 30 ml/l air). Berikut data berat kering akar tanaman setiap perlakuan pada Tabel 2. Dipersilakan untuk menambah bab sesuai dengan kebutuhan. Angka yang diikuti huruf yang sama pada kolom yang sama tidak menunjukkan perbedaan signifikan berdasarkan uji BNT 5%.

Total serapan nitrogen dihitung berdasarkan metode Kjeldahl. P2 (bibit dengan pupuk hayati “1” pada dosis 20 ml/l air) memiliki nilai total serapan nitrogen tertinggi yaitu 52 mg/tanaman dan berbeda nyata dibandingkan dengan P4 (bibit yang diberi pupuk daun dan diinokulasi secara buatan dengan pupuk hayati “B” pada dosis 10 ml/l air). Sementara itu, P2 dan P3 (bibit yang diinokulasi secara buatan dengan pupuk hayati “A” pada dosis 30 ml/l air) tidak berbeda nyata antara kedua perlakuan. Bilangan yang diikuti oleh huruf yang sama dalam kolom yang sama tidak memiliki perbedaan yang nyata berdasarkan uji BNT 5%.

Pada penelitian ini, berat kering akar tanaman menunjukkan bahwa perlakuan pupuk hayati memberikan pengaruh yang berbeda terhadap pertumbuhan sistem perakaran tanaman. Berdasarkan hasil analisis statistik, terlihat adanya perbedaan nyata di antara perlakuan yang diuji.

Perlakuan P1 (2,65 g) menunjukkan berat kering akar tertinggi dan berada dalam kelompok huruf abc, yang menandakan bahwa nilainya tidak berbeda nyata terhadap beberapa perlakuan lain seperti P2 (2,53 g) dan P6 (2,24 g) yang juga berada dalam kelompok huruf yang tumpang tindih (abc, ab). Ini menunjukkan bahwa pemberian pupuk hayati pada perlakuan-perlakuan tersebut mampu meningkatkan pertumbuhan akar secara signifikan dibandingkan kontrol (P0).

Tabel 3. Berat Kering Akar

Perlakuan	Berat Kering Akar (gram/tanaman)
P0	1,41a
P1	2,65abc
P2	2,53abc
P3	2,32ab
P4	1,78a
P5	1,7a
P6	2,24ab
P7	1,72a
P8	1,79a
P9	1,97a
P10	1,94a
P11	2,19ab
P12	2,15ab

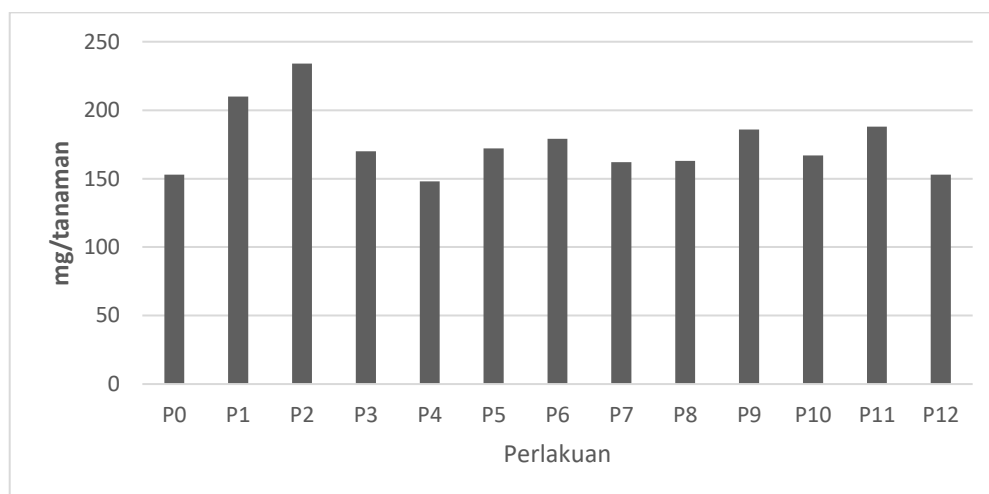
Tabel 4. Total Serapan N

Perlakuan	Total Serapan N (mg/tanaman)
P0	153.83a
P1	210.04bc
P2	234.87c
P3	170.84ab
P4	148.95a
P5	172.42ab
P6	179.26ab
P7	162.40ab
P8	163.84ab
P9	186.97ab
P10	167.58ab
P11	188.72ab
P12	153.83abc

Sebaliknya, perlakuan P0 (kontrol, tanpa pupuk hayati) menghasilkan berat kering akar terendah (1,41 g) dan berada dalam kelompok huruf a, yang menandakan bahwa nilai ini berbeda nyata dibandingkan perlakuan seperti P1, P2, P3, dan P6 yang memiliki nilai lebih tinggi dan berbeda kelompok huruf. Beberapa perlakuan seperti P3 (2,32 g) dan P12 (2,15 g) termasuk dalam kelompok ab, menunjukkan bahwa meskipun tidak tertinggi, namun hasilnya cukup baik dan tidak berbeda nyata dengan perlakuan terbaik (P1). Hasil uji pengukuran serapan N ditampilkan pada Gambar 1.

Gambar 1 menunjukkan bahwa perlakuan P2 kemungkinan merupakan dosis pupuk nitrogen yang paling optimal atau kombinasi yang efektif, seperti pemupukan nitrogen dengan pupuk hayati atau organik. Sebaliknya, perlakuan P0 dan P4 menunjukkan kandungan nitrogen yang lebih rendah, yang kemungkinan merupakan perlakuan kontrol (tanpa pupuk) atau perlakuan dengan dosis pupuk nitrogen yang rendah atau kurang tersedia bagi tanaman. Perlakuan ini dapat dianggap efektif dalam meningkatkan pertumbuhan akar. data ini menunjukkan bahwa pemberian nitrogen yang tepat, baik dalam dosis, bentuk, maupun metode aplikasinya sangat berpengaruh terhadap efisiensi serapan nitrogen

oleh tanaman. Perbedaan yang signifikan antar perlakuan menunjukkan bahwa tidak semua perlakuan memberikan hasil yang setara, sehingga pemilihan perlakuan harus mempertimbangkan efektivitas dan efisiensi pemupukan. Nitrogen merupakan unsur hara makro esensial yang sangat penting bagi tanaman kelapa sawit. Unsur ini berperan dalam pembentukan klorofil, sintesis protein, enzim, serta pertumbuhan daun dan pelepah yang optimal. Tanaman sawit yang kekurangan nitrogen umumnya menunjukkan gejala klorosis (daun menguning), pertumbuhan terhambat, dan produksi tandan buah segar (TBS) yang menurun.



Gambar 1. Hasil Pengukuran Serapan Nitrogen

Secara umum, pemberian pupuk hayati pada sebagian besar perlakuan memberikan efek positif terhadap pertumbuhan akar tanaman jika dibandingkan dengan kontrol. Hal ini sejalan dengan peran mikroorganisme dalam pupuk hayati yang dapat meningkatkan ketersediaan dan serapan unsur hara, khususnya nitrogen, serta merangsang pertumbuhan akar melalui produksi zat pengatur tumbuh (fitohormon). Namun, tidak semua perlakuan menunjukkan perbedaan yang signifikan. Beberapa perlakuan seperti P4 (1,78 g), P5 (1,70 g), dan P7 (1,72 g) masih berada dalam kelompok huruf **a**, yang menunjukkan tidak berbeda nyata dengan kontrol. Hal ini bisa disebabkan oleh ketidaksesuaian jenis mikroorganisme dengan kondisi tanah, dosis yang kurang tepat, atau interaksi yang belum optimal.

Pupuk hayati "1" mengandung *Bacillus pumilus*. Menurut Deng et al. (2022), *Bacillus pumilus* memiliki kemampuan untuk mendegradasi selulosa serta bahan organik kompleks lainnya. Penggunaan campuran media pupuk kandang dengan *Bacillus pumilus* dapat meningkatkan ketersediaan nutrisi dalam media tersebut. Tanaman dapat menyerap nutrisi lebih banyak yang berdampak positif pada biomassa. Hal ini terbukti dengan perbedaan signifikan pada berat kering untuk perlakuan P1 dan P2 dibandingkan dengan P0 (kontrol positif). Pupuk hayati "1" juga mengandung khamir *Debaryomyces hansenii*. Khamir ini berfungsi sebagai pengendali penyakit serta merangsang mekanisme imun tanaman. Selain itu, biofertilizer "A" juga memiliki *Bacillus thuringiensis* yang dikenal menghasilkan antibiotik dan berperan sebagai PGPR (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria*), yang mencakup produksi agen pengendali hayati yang menghambat atau membunuh patogen, serta menciptakan lingkungan yang kondusif bagi tanaman (Naik et al., 2019).

Bakteri PGPR *Pseudomonas geniculate* juga terdapat dalam biofertilizer "1". Menurut Gopalakrishnan et al. (2015), bakteri ini dapat meningkatkan secara signifikan berat kering, berat batang, dan kandungan P. Penelitian ini menunjukkan bahwa semua mikroba yang terkandung dalam pupuk hayati "1" memberikan peningkatan signifikan pada berat kering akar, dengan dosis optimal 10 ml/liter air, sedangkan serapan N pada pembibitan kelapa sawit menunjukkan dosis terbaik 20 ml/liter air. *Pseudomonas geniculata* merupakan salah satu jenis bakteri PGPR yang berfungsi sebagai agen hayati penunjang pertumbuhan tanaman. Bakteri ini hidup di zona perakaran (rizosfer) dan memberikan berbagai manfaat bagi tanaman, khususnya dalam meningkatkan efisiensi penyerapan unsur hara, termasuk nitrogen. Sebagai salah satu bakteri PGPR (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria*),

Pseudomonas geniculata dikenal memiliki sejumlah mekanisme penting dalam meningkatkan pertumbuhan dan serapan nitrogen oleh tanaman. Bakteri ini mampu menghasilkan senyawa fitohormon seperti IAA (*Indole Acetic Acid*), melarutkan fosfat, meningkatkan aktivitas mikroba tanah lain, dan dalam beberapa strain, berperan dalam fiksasi nitrogen bebas secara non-simbiotik. Dalam perlakuan P2, kemungkinan besar terjadi kombinasi optimal antara inokulasi *Pseudomonas geniculata* dan dosis pupuk nitrogen yang tepat, sehingga bakteri dapat bekerja sinergis dengan ketersediaan nitrogen anorganik, menghasilkan peningkatan serapan nitrogen yang signifikan oleh tanaman.

Pupuk hayati "2" mengandung *Micrococcus* sp. yang dikenal dapat menanggulangi bakteri patogen *Sclerotium rolfsii* (Safriani et al., 2020). *Micrococcus* juga dimanfaatkan dalam bioremediasi berkat kemampuannya untuk mengubah senyawa hidrokarbon menjadi sumber energi. Bioremediasi adalah teknik yang digunakan untuk mendegradasi atau mendetoksifikasi polutan, baik organik maupun anorganik, dengan memanfaatkan agen biologis (Melati, 2020). Pada lingkungan tanah, *Micrococcus* sp. juga berkontribusi dalam menstabilkan mikroflora tanah, mendukung aktivitas mikroba lain, dan menjaga keseimbangan biokimia di zona perakaran. Beberapa strain *Micrococcus* bahkan mampu menghasilkan senyawa pengatur tumbuh seperti IAA dalam jumlah kecil, yang dapat merangsang perpanjangan akar dan memperluas area serapan hara. Namun, karena aktivitas fiksasi nitrogen langsungnya sangat terbatas dan kemampuannya dalam melarutkan hara juga relatif rendah, peningkatan kandungan nitrogen tanaman akibat peran *Micrococcus* sp. cenderung tidak sebesar bakteri PGPR lainnya. Hal ini kemungkinan menjelaskan mengapa perlakuan P4–P6 tidak menghasilkan peningkatan kandungan nitrogen setinggi perlakuan lain yang menggunakan bakteri dengan kapasitas fiksasi nitrogen lebih tinggi.

Pada dosis 30 ml/l air, pengukuran serapan N menunjukkan hasil yang lebih rendah dibandingkan kontrol. Namun, pada dosis 20 mL/L air, terdapat peningkatan serapan N yang lebih baik dibandingkan dengan kontrol. Pupuk hayati "3" yang mengandung *Rhodospseudomonas* sp. dapat meningkatkan berat kering, tinggi, panjang akar, serta persentase perkecambahan pada tanaman tomat, menurut Koh et al. (2007). Perlakuan P7 hingga P9 dalam grafik kandungan nitrogen pada tanaman kelapa sawit menunjukkan nilai yang tergolong sedang hingga tinggi, dengan P9 mencatat kandungan nitrogen lebih tinggi dibanding P7 dan P8. Perlakuan ini melibatkan bakteri *Rhodospseudomonas* sp., maka peningkatan kandungan nitrogen tersebut dapat dijelaskan berdasarkan peran penting bakteri ini sebagai fotosintetik non-sulfur bacteria (PNSB) yang berfungsi sebagai biofertilizer multifungsi. *Rhodospseudomonas* sp. memiliki enzim nitrogenase yang mampu mengubah nitrogen atmosfer (N_2) menjadi amonia (NH_3) yang tersedia bagi tanaman. Meskipun fiksasinya tidak sebesar bakteri leguminosa, kontribusinya penting dalam sistem tanah rendah N.

Dosis optimal dalam penelitian ini adalah 30 mL/L air. Di samping itu, bakteri ini memiliki kemampuan berpigmen fotosintetik, bisa menambat N_2 dari udara, dan mampu mereduksi nitrat (Suryani et al, 2021). Pupuk hayati "4" mengandung *Pseudomonas aeruginosa*, yang dikenal dapat merangsang aktivitas enzim peroksidase pada kedelai, mengurangi presentase kerdil (Siadi et al., 2017). Enzim peroksidase berfungsi dalam mengatur ketahanan tanaman terhadap patogen (Brimcombe et al., 2001). Hasil riset menunjukkan bahwa dosis 10 ml/l air tidak berdampak pada berat kering akar, namun pada dosis 20 dan 30 ml/l air berpengaruh terhadap berat kering akar. Sementara itu, untuk penyerapan N, dosis 20 dan 30 ml/l air menunjukkan hasil yang lebih tinggi dibandingkan dosis 10 ml/l air. Eningkatan tertinggi pada P2 mengindikasikan bahwa kombinasi bakteri ini dengan dosis pupuk nitrogen yang optimal memberikan sinergi yang kuat. Bakteri tersebut membantu menyediakan nitrogen, menstimulasi pertumbuhan akar, dan meningkatkan efisiensi serapan hara. Oleh karena itu, penggunaan *Pseudomonas geniculata* sebagai biofertilizer potensial sangat direkomendasikan dalam sistem pertanian sawit berkelanjutan yang ingin mengurangi ketergantungan terhadap pupuk kimia tanpa menurunkan hasil tanaman.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, aplikasi pupuk hayati “1” memberikan pengaruh nyata terhadap peningkatan berat kering akar dan serapan nitrogen (N) tanaman kelapa sawit. Perlakuan terbaik diperoleh pada dosis yang berbeda untuk masing-masing parameter. Berat kering akar tertinggi dicapai pada dosis 10 mL/L air, dengan nilai 2,65 gram/tanaman, menunjukkan bahwa pada dosis ini aktivitas mikroba dalam pupuk hayati optimal dalam merangsang pertumbuhan sistem perakaran. Akar yang lebih berkembang mampu mengeksplorasi tanah lebih luas dan menyerap hara secara lebih efisien.

Sementara itu, serapan nitrogen tertinggi tercatat pada dosis 20 mL/L air, yaitu sebesar 234,87 mg/tanaman. Hal ini menunjukkan bahwa pada dosis yang lebih tinggi, kandungan mikroba aktif dalam pupuk hayati berperan maksimal dalam meningkatkan ketersediaan dan penyerapan nitrogen oleh tanaman, baik melalui mekanisme fiksasi nitrogen, pelarutan hara, maupun stimulasi pertumbuhan akar.

Dengan demikian, dapat direkomendasikan bahwa pupuk hayati “1” efektif digunakan untuk mendukung pertumbuhan dan efisiensi serapan hara tanaman kelapa sawit. Untuk tujuan penguatan sistem perakaran, dosis 10 mL/L air sudah cukup optimal, sedangkan untuk meningkatkan serapan nitrogen, dosis 20 mL/L air memberikan hasil terbaik. Strategi pemupukan dapat disesuaikan dengan kebutuhan spesifik tanaman: jika fokus pada pertumbuhan vegetatif dan eksplorasi akar, maka digunakan dosis 10 mL/L; namun bila fokus pada efisiensi hara, terutama nitrogen, maka disarankan menggunakan dosis 20 mL/L.

DAFTAR PUSTAKA

- Antar, M. Gopal, P. Msimbira, L.A., Naamala, J. Nazari, M. Overbeek, W., Backer, R., Smith, D.L. (2021). *Inter-organismal signaling in the rhizosphere*. In *Rhizosphere Biology: Interactions Between Microbes and Plants*. Springer.
- Ariyanti, M., Rosniawaty, S., Indrawan, R.A. (2019). The growth of immature oil palms with the application of organic fertilizers from oil palm midribs and humic acid. *Palm Oil Research Journal*, 27(2), 71-82. <https://doi.org/10.22302/iopri.jur.jpks.v27i2.84>.
- Bindrianes, S., Kemala, N., Busyra, R.K. (2017). Labor productivity of oil palm harvest and the factors that influence it in the Batanghari business unit at PTPN VI Jambi. *Agrica Journal*, 10(2), 74. <https://doi.org/10.31289/agrica.v10i2.1094>.
- Deng, Y.; Wang, S.Y. (2022). Sorption of Cellulases in Biofilm Enhances Cellulose Degradation by *Bacillus subtilis*. *Microorganisms Journal*, 10(8), 1505. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10081505>.
- Gopalakrishnan S., Srinivas V., Prakash B., Sathya A., Vijayabharathi R. (2015). Plant growth-promoting traits of *Pseudomonas geniculata* isolated from chickpea nodules. *3 Biotech*. 5(5):653-661. <https://dx.doi.org/10.1007/s13205-014-0263-4>.
- Ji, S., Liu, Z., Liu, B., Wang, Y., and Wang, J. (2020). The effect of Trichoderma biofertilizer on the quality of flowering Chinese cabbage and the soil environment. *Scientia Horticulturae*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109069>.
- Kamaruzzaman, M.A., Abdullah, S.R.S., Hasan, H.A., Hassan, M., Othman, A. R., and Idris, M. (2020). Characterisation of Pb-resistant plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) from *Scirpus grossus*. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101456>.
- Kamyab, H., Chelliapan, S., Din, M.F.M., Shahbazian-Yassar, R., Rezanian, S., Khademi, T., Kumar, A., and Azimi, M. (2017). Evaluation of Lemna minor and Chlamydomonas to treat palm oil mill effluent and fertilizer production. *Journal of Water Process Engineering*, 17, 229–236. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.04.007>.
- Koh, Rae-Hyun and Song, Hong-Gyu. (2007). Effects of application of Rhodopseudomonas sp. on seed germination and growth of tomato under axenic conditions. *Journal of microbiology and biotechnology*, 17. 1805-10. <https://doi.org/10.29303/jmbc.v1i1>.
- Melati, I. (2020). *Teknik Bioremediasi: Keuntungan, Keterbatasan dan Prospek Riset*. Pusat Penelitian Limnologi LIPI.

- Naik, K., Mishra, S., Srichandan, H., Singh, P. K., and Sarangi, P. K. (2019). Plant growth promoting microbes: potential link to sustainable agriculture and environment. *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101326>.
- Nuraini D, Yuliani S. (2020). Efektivitas pupuk hayati dalam meningkatkan serapan nitrogen pada tanaman kelapa sawit. *Jurnal Agroindustri Perkebunan* 12(1):45-53. <https://doi.org/10.25181/aip.v4i2.45>.
- Nurhayati, D. R. (2021). *Pengantar Nutrisi Tanaman*. UNISRI Press.
- Murnita, M., & Taher, Y. A. (2021). Dampak pupuk organik dan anorganik terhadap perubahan sifat kimia tanah dan produksi tanaman padi (*Oriza sativa* L.). *Menara Ilmu: Jurnal Penelitian Dan Kajian Ilmiah*, 15(2). <https://doi.org/10.31869/mi.v16i1.3108>.
- Prasad, R., Shivay, Y.S. and Kumar, D. (2017). *Current status, challenges, and opportunities in rice production*. Rice production worldwide. Springer.
- Safriani, S., Fitri, L., and Ismail, Y. (2020). Isolation of Potential Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) from Cassava (*Manihot esculenta*) Rhizosphere Soil. *Journal of Biology & Biology Education*, 12(3), 459-468. <https://doi.org/10.15294/biosaintifika.v12i3.25905>.
- Setiyono, T. D., et al. (2015). Efek kombinasi pupuk hayati dan pupuk kimia terhadap pertumbuhan dan serapan hara. *Agrivita*, 37(1), 44–52. <https://doi.org/10.17503/agrivita.v47i1.4447>
- Siadi, I.K., Khalimi, K., Nyana, I.D.N., Raka, I.G.N. (2017). The Effectiveness of PGPR Compost Formulation in Increasing Soybean Plant Resistance to Soybean Stunt Virus. *Agrotrop journal*, 7 (2): 210 – 217. <https://doi.org/10.24843/AJoAS.2017.v07.i02.p12>.
- Sudadi, S., Wibowo, A., & Kusuma, Z. (2020). Efisiensi pupuk nitrogen pada padi sawah dengan aplikasi biofertilizer. *Jurnal Agroekoteknologi*, 12(3), 212–220. <https://doi.org/10.51852/jaa.v8i1.715>.
- Suryani, Y dan Taupiqurrahman, O. (2021). *Mikrobiologi Dasar*. LP2M UIN. Bandung
- Triadiawarman, D., Aryanto, D., dan Krisbiyantoro, J. (2022). Peran Unsur Hara Makro terhadap Pertumbuhan dan Hasil Bawang Merah. *Agrifor*, 21(1), 27–32. <https://doi.org/10.31293/agrifor.v21i1.5795>.
- Widiastuti, E., & Yuniarti, Y. (2020). Pupuk hayati dan dampaknya terhadap kesuburan tanah dan pertumbuhan tanaman. *Jurnal Pertanian Berkelanjutan*, 5(1), 56–62. <https://doi.org/10.30605/perbal.v13i1.4713>