

Pengaruh Pupuk Hayati terhadap Serapan Fosfor dan Pertumbuhan Bibit Kelapa Sawit dengan Rancangan Acak Lengkap

Bayu Adirianto^{*1}, Endang Krisnawati², Taufiq Bachtiar³, Titis Pury Purboningtyas⁴

^{1, 2, 4}Jurusan Pertanian, Politeknik Pembangunan Pertanian Bogor, Indonesia.

³Pusat Riset Lingkungan dan Teknologi Bersih Tangerang Selatan, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Indonesia.

Email: ¹bayuadirianto@gmail.com, ²krisnawatistpp@gmail.com, ³tauf012@brin.go.id,
⁴titispurypurboningtyas@gmail.com

Abstrak

Penggunaan pupuk anorganik secara berulang memiliki dampak buruk terhadap lingkungan, contohnya mengganggu pertumbuhan tumbuhan dan kondisi tanah. Salah satu cara yang digunakan untuk mengurangi penggunaan pupuk anorganik adalah dengan memanfaatkan mikroba sebagai agen biologis. Penelitian ini bertujuan mengukur pengaruh penerapan biofertilizer dari merek A, B, C, dan D terhadap pertumbuhan vegetatif serta kemampuan penyerapan fosfor pada tanaman kelapa sawit kecambah. Penelitian ini dilaksanakan di Politeknik Pertanian Komunitas Bogor. Penelitian menggunakan desain acak lengkap (RAL) dan dilanjutkan dengan uji Duncan. Perlakuan terdiri dari 4 merek biofertilizer dengan 3 dosis yaitu 10, 20, dan 30 mL/L air serta memiliki 8 ulangan. Hasil penelitian menemukan bahwa merek A memiliki pengaruh signifikan terhadap berat kering tanaman pada dosis 10 mL/L air dengan nilai berat kering sebesar 2,65 gram per tanaman. Namun, nilai penyerapan fosfor tertinggi terjadi pada dosis 20 mL/L air dengan penyerapan fosfor mencapai 52 mg per tanaman. Penelitian ini menunjukkan potensi penggunaan pupuk hayati sebagai alternatif ramah lingkungan untuk meningkatkan efisiensi fosfor dalam budidaya kelapa sawit.

Kata kunci: berat kering, dosis, pupuk hayati, serapan P

Abstract

Repeated use of inorganic fertilizers can have a negative impact on the environment, such as disrupting plant growth and degrading soil quality. One of the methods to reduce dependence on inorganic fertilizers is through the use of microbes as biological agents. This study aims to evaluate the effect of biofertilizer application from brands A, B, C, and D on vegetative growth and phosphorus absorption ability in oil palm sprouts. The research was conducted at the Bogor Community Agricultural Polytechnic using a completely randomized design (CRD) followed by Duncan's test. The treatments consisted of four biofertilizer brands with three doses, namely 10, 20, and 30 mL per liter of water, each with eight replications. The results showed that the application of biofertilizer brand A at a dose of 10 mL per liter of water had a significant effect on plant dry weight, with a dry weight of 2.65 grams per plant. Meanwhile, the highest phosphorus absorption was recorded at a dose of 20 mL per liter of water, which amounted to 52 mg per plant. This study demonstrates the potential use of biofertilizers as an environmentally friendly alternative to improve phosphorus efficiency in oil palm cultivation.

Keywords: biofertilizer, doses, dry weight, P uptake

1. PENDAHULUAN

Salah satu penghasil devisa terbesar ada pada Industri kelapa sawit. Hal ini dikarenakan banyaknya produk yang dapat diproduksi dari kelapa sawit, antara lain bahan baku pangan, kosmetik, pakan, energi dan lain-lain (Ariyanti et al., 2019). Pesatnya perkembangan industri kelapa sawit harus diiringi dengan peningkatan produktivitas (Bindrianes et al., 2017). Saat ini produktivitas kelapa sawit masih belum tercapai secara optimal. Hal ini dikarenakan teknologi produksi dalam budidaya belum dilakukan secara efektif dan efisien. Budidaya kelapa sawit masih sangat bergantung pada pemberian

pupuk anorganik (Kamyab et al., 2017). Jika dilihat dari ketersediaan unsur hara yang cepat, pupuk anorganik lebih baik dibandingkan pupuk organik (Dimkpa et al., 2020).

Keunggulan pupuk anorganik selama ini membuat petani dan perkebunan kelapa sawit hanya memperhatikan kepentingan sesaat dengan pemberian tersebut. Petani hanya mengutamakan hasil panen yang tinggi. Hal ini berdampak buruk terhadap lingkungan seperti tanaman dan tanah dalam jangka panjang. Dari sisi ekonomi, ketergantungan terhadap pupuk anorganik juga menambah biaya operasional dalam budidaya. Mikroba yang digunakan sebagai pupuk hayati bisa membantu mengurangi penggunaan pupuk anorganik. Pupuk hayati akan membantu ketersediaan unsur hara (Ji et al., 2020). Dengan demikian, mikroba juga menghasilkan metabolit sekunder berupa asam organik, fitohormon (*auksin*, *giberelin*), antibiotik, kitinolitik dan lain-lain (Liu et al., 2023).

Mikroba akan berasosiasi dengan akar tanaman sehingga dapat merangsang pertumbuhan tanaman melalui mekanisme tersebut (Kamaruzzaman et al., 2020). Selain itu, aktivitas mikroba dalam tanah memiliki dampak yang kuat pada sifat fisiknya dan pada saat yang sama juga berperan penting dalam menjalankan praktik ramah lingkungan seperti bioremediasi dan pengendalian hayati fitopatogen dalam tanah pertanian. Dengan demikian, mikroorganisme tanah telah diterima sebagai bioindikator kesehatan dan aktivitas tanah (Prasad et al., 2017). Mikroba yang berdekatan dengan akar tanaman, menghasilkan fitohormon yang mempengaruhi perkecambahan biji, perluasan sistem akar untuk meningkatkan penyerapan nutrisi (Antar et al., 2021).

Berbeda dengan penelitian Ji et al. (2020) yang menggunakan *Trichoderma* untuk meningkatkan kualitas tanaman sawi, penelitian ini mengevaluasi efektivitas mikroba *Pseudomonas*, *Bacillus*, dan *Rhodopseudomonas* dalam meningkatkan serapan fosfor pada bibit kelapa sawit. Sementara itu, penelitian Kamaruzzaman et al. (2020) lebih fokus pada karakterisasi PGPR yang tahan timbal, sedangkan penelitian ini mengkaji aplikasi langsung berbagai merek pupuk hayati komersial dengan dosis yang berbeda.

Bibit kelapa sawit berumur satu sampai enam bulan setelah semai. Pembibitan merupakan salah satu kunci keberhasilan produktivitas. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh berbagai jenis dan dosis pupuk hayati terhadap serapan fosfor dan pertumbuhan vegetatif bibit kelapa sawit, khususnya untuk mengevaluasi dampak dari pemberian biofertilizer merek A, B, C, dan D terhadap serapan P pada bibit kelapa sawit.

2. METODE PENELITIAN

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

Percobaan dilakukan dengan tiga belas perlakuan dan data diambil pada umur 5 bulan setelah perlakuan. Setiap perlakuan terdiri dari delapan bibit. Dengan demikian, jumlah total bibit yang digunakan adalah 104 bibit. Semua bibit kelapa sawit ditanam dalam polybag (12x18 cm) yang berisi campuran tanah:kompos:sekam (2:1:1) dan disiram dua kali seminggu. Penelitian dilakukan pada kondisi lingkungan dengan suhu rata-rata 28-32°C, kelembaban relatif 75-85%, dan pH media tanam berkisar 6,0-6,5. Berat kering total dan serapan fosfor diukur.

13 (tiga belas) perlakuan telah dilakukan. Empat biofertilizer diaplikasikan pada bibit dengan frekuensi sekali per bulan sesuai dengan interval perlakuan dan bergantian dengan pupuk daun (2 gram/liter air) selama lima bulan percobaan, sehingga total aplikasi pupuk hayati adalah 5 kali selama periode penelitian. Berikut Tabel 1 menjelaskan perlakuan dalam penelitian pupuk hayati.

Pupuk hayati dan pupuk daun yang terkandung seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Baik pupuk hayati "A" dan "D" mengandung genus *Pseudomonas*.

Seluruh sampel berjumlah 104. Analisis unsur P dengan metode pengabuan basah dengan HNO₃. Analisis statistik menggunakan analisis varians (ANOVA, $p < 0,05$) guna untuk mengidentifikasi apakah terdapat perbedaan signifikan secara statistik antara perlakuan. Uji Duncan (pada $p < 0,05$) digunakan untuk menentukan mean mana yang berbeda secara statistik jika ANOVA signifikan. Analisis statistik

dilakukan menggunakan software SPSS versi 25 dengan kriteria nilai F tabel pada taraf kepercayaan 95%. Perlakuan dianggap berbeda nyata jika nilai F hitung > F tabel, kemudian dilanjutkan dengan uji Duncan untuk menentukan perbedaan antar perlakuan dengan menggunakan notasi huruf yang berbeda.

Tabel 1. Perlakuan Biofertilizer dalam Penyerapan Hara P.

Kode	Perlakuan
P0	Bibit yang diberi pupuk daun dan tidak diinokulasi (kontrol positif)
P1	Merk "A" dengan dosis 10 ml/l air
P2	Merk "A" dengan dosis 20 ml/l air
P3	Merk "A" dengan dosis 30 ml/l air
P4	Merk "B" dengan dosis 10 ml/l air
P5	Merk "B" dengan dosis 20 ml/l air
P6	Merk "B" dengan dosis 30 ml/l air
P7	Merk "C" dengan dosis 10 ml/l air
P8	Merk "C" dengan dosis 20 ml/l air
P9	Merk "C" dengan dosis 30 ml/l air
P10	Merk "D" dengan dosis 10 ml/l air
P11	Merk "D" dengan dosis 20 ml/l air
P12	Merk "D" dengan dosis 30 ml/l air

Tabel 2. Komposisi Biofertilizer dan Pupuk Daun

Pupuk hayati	Pupuk daun
A Bacillus pumillus	Total N 20%
Debaryomyces hansenii	P2O5 15%
Bacillus thuringiensis	K2O 15%
Meyerozyma sp.	Magnesium (Mg)
Bacillus methylotrophicus	Mangan (Mn)
Pseudomonas geniculata	Boron (B)
B Micrococcus sp.	Copper (Cu)
C Rhodospseudomonas sp	Cobalt (Co)
D Pseudomonas aeruginosa	Zinc (Zn)
	Aneurin
	Laktoflavin
	Nicotinin
	Asam amida

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil

3.1.1. Berat Kering Total Tanaman

Pada penelitian ini, berat kering diperoleh setelah 5 bulan setelah tanam. P2 menunjukkan berat kering total tertinggi dan berbeda nyata seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.3. Semua biofertilizer berbeda nyata dengan kontrol. Sementara itu, P3, P5, P6, P9, P10, P11, dan P12 tidak memperlihatkan perbedaan yang signifikan di antara perlakuannya. Selain itu, P4, P7, dan P8 tidak menampakkan perbedaan yang signifikan di antara semuanya.

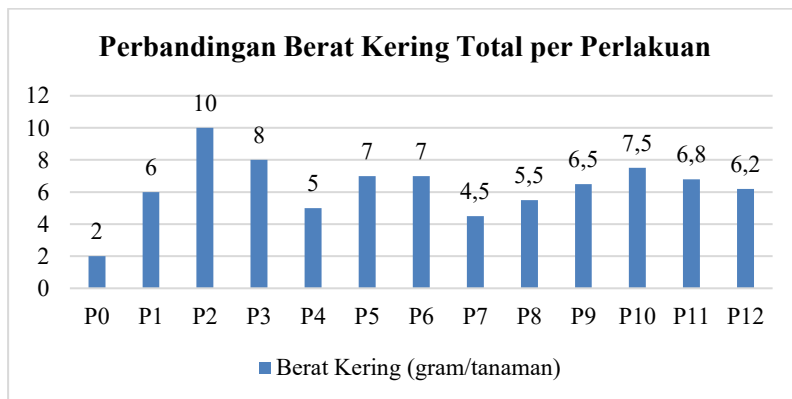
Hal ini menunjukkan bahwa P2 (bibit yang diinokulasi secara artifisial dengan pupuk hayati "A" pada dosis 20 ml/l air) menunjukkan tingkat berat kering yang lebih baik daripada P3 (bibit yang diinokulasi secara artifisial dengan pupuk hayati "A" pada dosis 30 ml/l air). Berikut data berat kering total tanaman setiap perlakuan pada Tabel 3.

Tabel 3. Total Berat Kering

Perlakuan	Total Berat Kering (gram/tanaman)
P0	6,82 a
P1	9,57 bc
P2	10,43 c
P3	9,25 abc
P4	7,01 ab
P5	8,34 abc
P6	9,06 abc
P7	7,40 ab
P8	7,69 ab
P9	8,36 abc
P10	7,94 abc
P11	8,47 abc
P12	9,08 abc

Keterangan: Angka yang diikuti oleh huruf yang sama pada kolom yang sama tidak menunjukkan perbedaan yang nyata berdasarkan uji BNT 5%.

Total serapan fosfor dihitung berdasarkan metode pengabuan basah dengan HNO₃. P2 (bibit yang diinokulasi secara buatan dengan pupuk hayati “A” pada dosis 20 ml/l air) memiliki nilai total serapan fosfor 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.



Gambar 1. Perbandingan Berat Kering Total per Perlakuan

Grafik 1 menunjukkan pola yang jelas bahwa semua perlakuan pupuk hayati memberikan peningkatan berat kering dibandingkan kontrol (P0). Tren tertinggi terlihat pada perlakuan P2, sedangkan perlakuan P4, P7, dan P8 menunjukkan peningkatan yang relatif lebih rendah namun masih lebih baik dari kontrol. Pola ini mengindikasikan bahwa komposisi mikroba dalam pupuk hayati "A" memiliki sinergisme yang optimal untuk pertumbuhan bibit kelapa sawit.

3.1.2. Total Serapan Fosfor

Total serapan fosfor dihitung berdasarkan metode pengabuan basah dengan HNO₃. P2 (bibit yang diinokulasi secara buatan dengan pupuk hayati "A" pada dosis 20 ml/l air) memiliki nilai total serapan fosfor 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

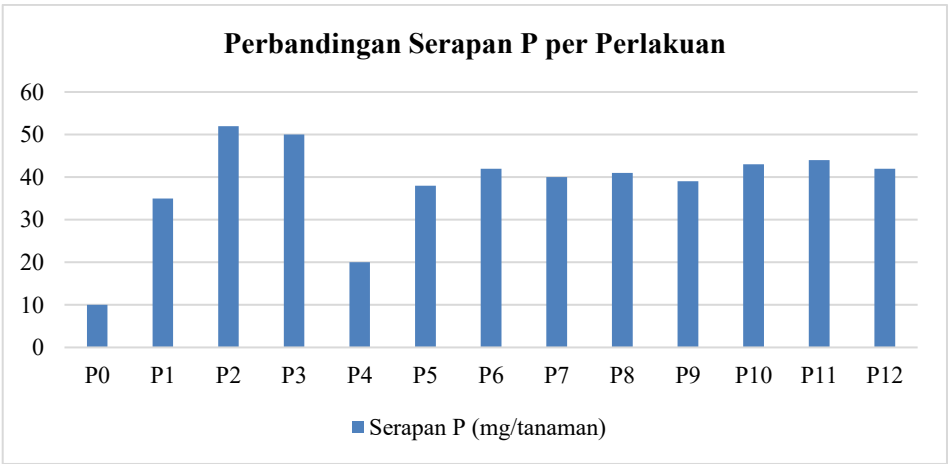
itu, P2 dan P3 (bibit yang diinokulasi secara buatan dengan pupuk hayati "A" pada dosis 30 ml/l air) tidak berbeda nyata antara kedua perlakuan.

Tabel 4. Total Serapan P

Perlakuan	Total Serapan P (mg/tanaman)
P0	30,63 ab
P1	39,35 abc
P2	52,00 c
P3	51,23 c
P4	28,12 a
P5	34,80 ab
P6	42,09 bc
P7	29,39 ab
P8	32,76 ab
P9	41,11 abc
P10	41,03 abc
P11	36,60 ab
P12	40,46 abc

Keterangan: Angka yang diikuti oleh huruf yang sama pada kolom yang sama tidak menunjukkan perbedaan yang nyata berdasarkan uji BNT 5%.

Data pada Tabel 4 menunjukkan bahwa perlakuan P2 dan P3 (pupuk hayati "A" dosis 20 dan 30 ml/l air) menghasilkan serapan fosfor tertinggi masing-masing 52,00 mg/tanaman dan 51,23 mg/tanaman, yang secara statistik tidak berbeda nyata namun signifikan dibandingkan kontrol. Perlakuan P4 (pupuk hayati "B" dosis 10 ml/l air) menunjukkan serapan fosfor terendah sebesar 28,12 mg/tanaman, bahkan lebih rendah dari kontrol. Hal ini mengindikasikan bahwa dosis dan jenis mikroba berpengaruh terhadap kemampuan serapan fosfor tanaman.



Gambar 2. Perbandingan Serapan P per Perlakuan

Grafik 2 memperlihatkan pola serapan fosfor yang bervariasi antar perlakuan. Terlihat jelas bahwa perlakuan P2 dan P3 menunjukkan puncak tertinggi, sementara P4 menunjukkan nilai terendah. Pola ini menunjukkan bahwa tidak semua pupuk hayati memiliki efektivitas yang sama dalam meningkatkan serapan fosfor, dan terdapat dosis optimal untuk setiap jenis pupuk hayati. Perlakuan dengan pupuk hayati "C" dan "D" (P7-P12) menunjukkan kinerja yang bervariasi namun cenderung lebih konsisten dibandingkan pupuk hayati "B".

3.2. Diskusi

Pada penelitian ini, nilai berat kering P1 dan serapan total fosfor P2 paling tinggi. Disarankan agar bibit yang diinokulasi secara artifisial dengan pupuk hayati “A” dosis 20 ml/l air menunjukkan potensi serapan fosfor yang baik pada bibit kelapa sawit. Pupuk hayati “A” mengandung *Bacillus pumilus*. Deng & Wang (2022) melaporkan bahwa *Bacillus pumilus* dapat mendegradasi selulosa dan bahan organik kompleks lainnya. Campuran media pupuk kandang menggunakan *Bacillus pumilus* dapat meningkatkan ketersediaan unsur hara media.

Hasil ini selaras dengan Naik et al. (2019) yang menunjukkan bahwa *Bacillus thuringiensis* mampu meningkatkan penyerapan P melalui peningkatan aktivitas enzim fosfatase. Tanaman dapat menyerap unsur hara lebih banyak yang berdampak pada biomassa. Hal ini ditunjukkan dengan hasil berat kering yang berbeda nyata untuk perlakuan P1 dan P2 dibandingkan dengan P0 (kontrol positif). Pupuk hayati “A” juga mengandung khamir yaitu *Debaryomyces hansenii*. Khamir ini diketahui berfungsi sebagai pengendali penyakit dan merangsang mekanisme imun tanaman.

Selain itu, *Bacillus thuringiensis* juga terkandung dalam biofertilizer “A” yang diketahui menghasilkan antibiotik dan sebagai PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) yang mencakup produksi agen pengendali hayati yang menonaktifkan atau membunuh patogen, menyediakan lingkungan yang sehat bagi tanaman (Naik et al., 2019). Bakteri PGPR *Pseudomonas geniculate* juga terdapat dalam biofertilizer “A”. Menurut Gopalakrishnan et al. (2015), bakteri ini secara signifikan dapat meningkatkan berat kering, berat batang dan kandungan P. Hasil penelitian ini menunjukkan semua mikroba yang terdapat dalam pupuk hayati “A” secara signifikan meningkatkan berat kering dengan dosis terbaik adalah 10 ml/liter air dan serapan P pada pembibitan kelapa sawit dengan dosis terbaik adalah 20 ml/liter air.

Pupuk hayati “B” mengandung *Micrococcus* sp. yang diketahui dapat mengendalikan bakteri patogen *Sclerotium rolfsii* (Safriani et al., 2020). *Micrococcus* juga dapat dimanfaatkan sebagai agen bioremediasi karena sifatnya yang mampu menggunakan senyawa hidrokarbon sebagai sumber energi. Bioremediasi adalah teknik yang digunakan untuk menurunkan atau mendetoksifikasi polutan organik dan anorganik melalui agen biologis. (Melati, 2020). Pada dosis 10 ml/l air, hasil pengukuran serapan P lebih kecil dibandingkan kontrol. Namun pada dosis 30 mL/L air menunjukkan berat kering dan serapan P lebih baik dibandingkan kontrol.

Pupuk hayati “C” mengandung *Rhodospseudomonas* sp. Menurut Koh & Song (2007), bakteri ini dapat meningkatkan berat kering, tinggi, panjang akar dan persentase perkecambahan tanaman tomat. Dosis terbaik pada penelitian ini adalah 30 mL/L air. Selain itu, Bakteri ini mempunyai ciri berpigmen fotosintetik dan dapat menambat N₂ udara serta mampu mereduksi nitrat (Suryani & Taupiquirrahman, 2021).

Pupuk hayati “D” mengandung *Pseudomonas aeruginosa*. Bakteri ini diketahui dapat menginduksi aktivitas enzim peroksidase pada tanaman kedelai, sehingga dapat menurunkan persentase kerdil (Siadi et al., 2017). Enzim peroksidase adalah salah satu enzim yang membantu tanaman dalam bertahan melawan penyakit yang disebabkan oleh patogen (Hiraga et al., 2001). Hasil penelitian menunjukkan bahwa dosis 10 - 30 ml/l air tidak berpengaruh terhadap berat kering. Sementara itu, pada penyerapan P, dosis 20 dan 30 ml/l air lebih tinggi dibandingkan dosis 10 ml/l air.

Hasil penelitian ini menunjukkan konsistensi dengan penelitian sebelumnya mengenai efektivitas PGPR dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman. Ji et al. (2020) melaporkan bahwa aplikasi *Trichoderma* biofertilizer dapat meningkatkan kualitas tanaman sawi melalui perbaikan lingkungan tanah. Penelitian Kamaruzzaman et al. (2020) juga menunjukkan bahwa karakterisasi PGPR yang tepat dapat memberikan manfaat signifikan bagi pertumbuhan tanaman. Namun, penelitian ini memberikan kontribusi spesifik dengan mengevaluasi empat merek komersial yang berbeda pada tanaman kelapa sawit, yang belum banyak diteliti sebelumnya.

Penelitian ini terbatas pada fase bibit dalam polibag, sehingga pengujian lanjutan pada skala lapangan diperlukan untuk validasi lebih lanjut. Selain itu, penelitian dilakukan dalam kondisi terkontrol dengan media tanam yang telah distandarisasi, sehingga respons pada kondisi lapangan dengan variasi tanah yang berbeda mungkin akan menunjukkan hasil yang berbeda. Durasi penelitian selama 5 bulan

juga perlu diperpanjang untuk melihat efek jangka panjang aplikasi pupuk hayati terhadap produktivitas kelapa sawit hingga fase produksi.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi bahwa pupuk hayati "A" memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan berat kering dan serapan fosfor bibit kelapa sawit dibandingkan dengan pupuk hayati merek B, C, dan D. Temuan utama menunjukkan bahwa aplikasi pupuk hayati "A" mampu meningkatkan berat kering tanaman hingga 52,9% dan serapan fosfor hingga 69,8% dibandingkan kontrol. Hal ini mengindikasikan bahwa kombinasi mikroba dalam pupuk hayati "A" yang terdiri dari *Bacillus pumilus*, *Debaryomyces hansenii*, *Bacillus thuringiensis*, *Meyerozyma* sp., *Bacillus methylotrophicus*, dan *Pseudomonas geniculata* memiliki sinergisme yang optimal dalam meningkatkan pertumbuhan dan penyerapan nutrisi pada bibit kelapa sawit. Dosis optimal yang diperoleh dari penelitian ini bervariasi tergantung parameter yang diukur. Untuk peningkatan berat kering tanaman, dosis optimal pupuk hayati "A" adalah 10 mL/L air dengan hasil 9,57 gram/tanaman, sedangkan untuk maksimalisasi serapan fosfor, dosis optimal adalah 20 mL/L air dengan hasil 52,00 mg/tanaman. Perbedaan dosis optimal ini menunjukkan bahwa mekanisme peningkatan biomassa dan serapan fosfor melibatkan jalur metabolisme yang berbeda dalam interaksi mikroba-tanaman.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa biofertilizer berbasis konsorsium *Bacillus* dan *Pseudomonas* memiliki potensi besar sebagai alternatif pupuk fosfor ramah lingkungan dalam budidaya kelapa sawit. Kontribusi ilmiah dari penelitian ini adalah memberikan bukti empiris tentang efektivitas pupuk hayati komersial dengan komposisi mikroba spesifik untuk meningkatkan efisiensi fosfor pada fase pembibitan kelapa sawit. Temuan ini dapat menjadi dasar pengembangan teknologi biofertilizer yang lebih efektif dan berkelanjutan. Sehingga berdasarkan hasil penelitian, direkomendasikan penggunaan pupuk hayati "A" dengan dosis 20 mL/L air untuk aplikasi praktis di pembibitan kelapa sawit, karena dosis ini memberikan keseimbangan optimal antara peningkatan berat kering dan serapan fosfor. Namun, diperlukan penelitian lanjutan di lahan terbuka dengan skala yang lebih besar untuk menguji efektivitas jangka panjang dan konsistensi hasil dalam berbagai kondisi agroklimat. Selain itu, perlu dilakukan analisis ekonomis untuk mengevaluasi kelayakan penggunaan pupuk hayati sebagai substitusi atau komplemen pupuk anorganik dalam sistem produksi kelapa sawit komersial.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada PT. Great Giant Pineapple dan Badan Riset dan Inovasi Nasional yang telah mendukung penelitian ini.

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* (pp. 255–293). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6125-2_13
- Ariyanti, M., Maxiselly, Y., Rosniawaty, S., & Indrawan, R. A. (2019). The Growth of Oil Palm with Oil Palm Midrib Organic Fertilizer and Humic Acid. *Jurnal Penelitian Kelapa Sawit*, 27(2), 71–82. <https://doi.org/10.22302/iopri.jur.jpks.v27i2.84>
- Bindrianes, S., Kemala, N., & Busyra, R. K. (2017). Produktivitas Tenaga Kerja Panen Kelapa Sawit dan Faktor-Faktor yang Mempengaruhinya pada Unit Usaha Batanghari di PTPN VI Jambi. *JURNAL AGRICA*, 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*, 10(8), 1505. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10081505>
- Dimkpa, C. O., Andrews, J., Sanabria, J., Bindraban, P. S., Singh, U., Elmer, W. H., Gardea-Torresdey, J. L., & White, J. C. (2020). Interactive Effects of Drought, Organic Fertilizer, and Zinc Oxide Nanoscale and Bulk Particles on Wheat Performance and Grain Nutrient Accumulation. *Science*

- of *The Total Environment*, 722, 137808. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137808>
- Gopalakrishnan, S., Srinivas, V., Prakash, B., Sathya, A., & Vijayabharathi, R. (2015). Plant Growth-Promoting Traits of *Pseudomonas* Chickpea Nodules. *3 Biotech*, 5(5), 653–661. <https://doi.org/10.1007/s13205-014-0263-4>
- Hiraga, S., Sasaki, K., Ito, H., Ohashi, Y., & Matsui, H. (2001). A Large Family of Class III Plant Peroxidases. *Plant and Cell Physiology*, 42(5), 462–468. <https://doi.org/10.1093/pcp/pce061>
- Ji, S., Liu, Z., Liu, B., Wang, Y., & Wang, J. (2020). The Effect of Trichoderma Biofertilizer on the Quality of Flowering Chinese Cabbage and the Soil Environment. *Scientia Horticulturae*, 262, 109069. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109069>
- Kamaruzzaman, M. A., Abdullah, S. R. S., Hasan, H. A., Hassan, M., Othman, A. R., & Idris, M. (2020). Characterisation of Pb-resistant Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) from *Scirpus Grossus*. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 23, 101456. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101456>
- Kamyab, H., Chelliapan, S., Din, M. F. M., Shahbazian-Yassar, R., Rezania, S., Khademi, T., Kumar, A., & 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, R.-H., & Song, H.-G. (2007). Effects of Application of *Rhodopseudomonas* sp. on Seed Germination and Growth of Tomato under Axenic Conditions. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 17(11). <https://doi.org/10.1021/ac00084a002>
- Liu, Q., Cheng, L., Nian, H., Jin, J., & Lian, T. (2023). Linking Plant Functional Genes to Rhizosphere Microbes: A Review. *Plant Biotechnology Journal*, 21(5), 902–917. <https://doi.org/10.1111/pbi.13950>
- Melati, I. (2020). Teknik Bioremediasi: Keuntungan, Keterbatasan dan Prospek Riset. *Prosiding Seminar Nasional Biotik VIII 2020*, 8(1). <https://jurnal.ar-raniry.ac.id/index.php/PBiotik/article/view/9650>
- Naik, K., Mishra, S., Srichandan, H., Singh, P. K., & Sarangi, P. K. (2019). Plant Growth Promoting Microbes: Potential Link to Sustainable Agriculture and Environment. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 21, 101326. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101326>
- Prasad, R., Shivay, Y. S., & Kumar, D. (2017). Current Status, Challenges, and Opportunities in Rice Production. In B. S. Chauhan, K. Jabran, & G. Mahajan (Eds.), *Rice Production Worldwide*. Springer International Publishing. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-47516-5>
- Safriani, S. R., Fitri, L., & Ismail, Y. S. (2020). Isolation of Potential Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) from Cassava (*Manihot esculenta*) Rhizosphere Soil. *Biosaintifika: Journal of Biology & Biology Education*, 12(3). <https://journal.unnes.ac.id/nju/biosaintifika/article/view/25905>
- Siadi, I. K., Khalimi, K., Nyana, I. D. N., & Raka, I. G. N. (2017). Efektivitas PGPR Formulasi Kompos dalam Meningkatkan Ketahanan Tanaman Kedelai terhadap Soybean Stunt Virus. *Agrotrop: Journal on Agriculture Science*, 7(2). <https://ojs.unud.ac.id/index.php/agrotrop/article/view/41181>
- Suryani, Y., & Taupiquirrahman, O. (2021). *Mikrobiologi Dasar* (1st ed.). LP2M UIN SGD Bandung. https://perpustakaan.usni.ac.id/index.php?id=7467&keywords=&p=show_detail