

Aplikasi Biofertilizer Pelarut Silika Berformulasi Dietanolamida Olein Sawit pada Berbagai Dosis NPK untuk Mendukung Pertumbuhan Bibit Kakao (*Theobroma cacao* L.)

Suria Paloh¹⁾, Nurmayulis¹⁾, Abdul Hasyim Sodiq¹⁾, Fitria Riomy Eris^{2*)}

¹⁾Program Studi Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Jalan Raya Palka Km. 03 Sindangsari, Kabupaten Serang, Provinsi Banten

²⁾Program Studi Teknologi Pangan, Fakultas Pertanian, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Jalan Raya Palka Km. 03 Sindangsari, Kabupaten Serang, Provinsi Banten

*Koresponden: fitria.eris@untirta.ac.id

ABSTRAK

Kakao (*Theobroma cacao* L.) merupakan salah satu komoditas bernilai ekonomi tinggi dan berkontribusi terhadap devisa Indonesia melalui industri pangan, minuman, dan farmasi. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi aplikasi biofertilizer pelarut silika berformulasi dietanolamida olein sawit pada berbagai dosis NPK terhadap pertumbuhan bibit kakao. Percobaan dilakukan menggunakan Rancangan Acak Kelompok faktorial dengan dua faktor. Faktor pertama adalah tiga formulasi pupuk hayati pelarut silika yang diperkaya biosurfaktan dietanolamida olein sawit, yaitu rizosfer kopi, rizosfer sawit, dan konsorsium. Faktor kedua adalah dosis NPK 16:16:16, yaitu 100%, 90%, dan 80% dari dosis rekomendasi. Terdapat 9 kombinasi perlakuan dengan 3 ulangan, sehingga diperoleh 27 satuan percobaan dan 54 bibit kakao. Parameter yang diamati meliputi tinggi tanaman, jumlah daun, diameter batang, dan tingkat kehijauan daun. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aplikasi biofertilizer berpengaruh nyata terhadap pertumbuhan bibit kakao. Formulasi konsorsium memberikan respons terbaik pada sebagian besar parameter pengamatan. Dosis NPK 80% juga menunjukkan hasil yang baik, bahkan kombinasi formulasi konsorsium dan 80% NPK menghasilkan respons tertinggi pada beberapa parameter. Hasil ini menunjukkan bahwa aplikasi biofertilizer pelarut silika berformulasi dietanolamida olein sawit berpotensi meningkatkan pertumbuhan bibit kakao sekaligus mendukung efisiensi pemupukan NPK hingga pengurangan 20% pada fase pembibitan.

Kata Kunci: bibit kakao, biofertilizer, biosurfaktan, dietanolamida olein sawit, pupuk NPK

Application of Silicate-Solubilizing Biofertilizer Formulated with Palm Olein Diethanolamide at Different NPK Rates to Support the Growth of Cocoa Seedlings (*Theobroma cacao* L.)

ABSTRACT

Cocoa (*Theobroma cacao* L.) is one of the commodities with high economic value and contributes to Indonesia's foreign exchange through the food, beverage, and pharmaceutical industries. This study evaluated the application of silicate-solubilizing biofertilizer formulated with palm olein diethanolamide at different NPK rates on the growth of cocoa seedlings. The experiment employed a factorial randomized block design with two factors. The first factor consisted of three silicate-solubilizing biofertilizer formulations enriched with palm olein diethanolamide biosurfactant, namely coffee rhizosphere, oil palm rhizosphere, and microbial consortium. The second factor was NPK 16:16:16 rate at 100%, 90%, and 80% of the recommended dose. The experiment comprised 9 treatment combinations with 3 replications, resulting in 27 experimental units and 54 cocoa seedlings. Observed variables included plant height, leaf number, stem diameter, and leaf greenness. The results showed that biofertilizer application significantly affected cocoa seedling growth. The consortium formulation produced the best response for most growth parameters. The 80% NPK rate also showed favorable results, and its combination with the consortium formulation produced the highest response in several variables. These findings indicate that silicate-solubilizing biofertilizer formulated with palm olein diethanolamide has the potential to improve cocoa seedling growth while supporting NPK fertilizer efficiency through a 20% dose reduction during the nursery stage.

Keywords : Biosurfactant, biofertilizer, cocoa seedlings, NPK fertilizer, palm olein diethanolamide

PENDAHULUAN

Kakao (*Theobroma cacao* L.) merupakan salah satu komoditas perkebunan tropis bernilai ekonomi tinggi yang berkontribusi terhadap devisa Indonesia melalui industri pangan, minuman, dan farmasi [1]. Data statistik perkebunan menunjukkan bahwa kakao masih menjadi salah satu komoditas penting nasional, namun produktivitasnya relatif rendah dan cenderung menurun sehingga perbaikan teknik budidaya, termasuk pengelolaan pemupukan pada fase pembibitan, masih diperlukan untuk mendukung pertumbuhan tanaman yang lebih optimal [2].

Salah satu tantangan dalam budidaya kakao adalah tingginya ketergantungan terhadap pupuk anorganik yang digunakan secara intensif. Pupuk NPK memang mampu menyediakan unsur hara makro esensial yang dibutuhkan tanaman, tetapi penggunaan berulang tanpa dukungan pengelolaan biologis yang memadai dapat menurunkan kualitas tanah dan mengurangi efisiensi pemupukan [3]. Oleh karena itu, strategi pemupukan tidak hanya perlu berorientasi pada penyediaan N, P, dan K, tetapi juga pada pemanfaatan unsur hara fungsional seperti silika (Si). Silika diketahui berperan penting dalam menunjang pertumbuhan tanaman, memperbaiki respons fisiologis, dan mendukung ketahanan tanaman terhadap berbagai cekaman [4]. Namun demikian, meskipun Si melimpah di dalam tanah, sebagian besar masih berada dalam bentuk mineral silikat yang sukar larut sehingga belum langsung tersedia untuk diserap tanaman. Pada umumnya, Si diserap tanaman dalam bentuk asam monosilikat $[\text{Si}(\text{OH})_4]$ dalam larutan tanah [5].

Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk meningkatkan ketersediaan Si dalam tanah adalah pemanfaatan biofertilizer pelarut silika berbasis mikroorganisme rizosfer. Mikroorganisme pelarut silika diketahui mampu melarutkan senyawa silikat, meningkatkan ketersediaan

Si, dan pada beberapa kasus juga menunjukkan sifat pemacu pertumbuhan tanaman [6][7]. Selain itu, isolat bakteri pelarut silika juga telah dilaporkan memiliki karakter plant growth-promoting traits dan kompetensi rizosfer yang baik, sehingga berpotensi mendukung pertumbuhan tanaman secara lebih efektif [8]. Pada tanaman kakao, Hasil penelitian Nurmayulis *et al.* menunjukkan bahwa mikroba dari rizosfer kakao berpotensi dikembangkan sebagai biofertilizer, sehingga membuka peluang pemanfaatan konsorsium mikroba lokal untuk menunjang pertumbuhan bibit dan pengelolaan pemupukan yang lebih baik [9].

Efektivitas biofertilizer tidak hanya dipengaruhi oleh jenis dan kompatibilitas mikroba, tetapi juga oleh formulasi produk yang digunakan. Salah satu pendekatan yang mulai dikembangkan adalah penggunaan biosurfaktan sebagai komponen formulasi. Biosurfaktan merupakan biomolekul aktif permukaan yang berpotensi memperbaiki dispersi formulasi, meningkatkan distribusi bahan aktif, dan mendukung efektivitas aplikasi dalam sistem pertanian [10][11]. Dalam konteks formulasi biofertilizer, dietanolamida (DEA) olein sawit dilaporkan mampu mempertahankan populasi konsorsium mikroba di atas standar minimal pupuk hayati serta menunjukkan karakteristik kimia formulasi yang mendukung penggunaannya sebagai carrier biofertilizer [12]. Meskipun demikian, dalam konteks pembibitan kakao, peran formulasi DEA olein sawit dalam mendukung kinerja biofertilizer tetap perlu dievaluasi secara hati-hati berdasarkan respons pertumbuhan tanaman.

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kombinasi pupuk hayati dan pupuk anorganik dapat mendukung pertumbuhan bibit kakao. Ramadhani *et al.* [13] melaporkan bahwa kombinasi pupuk hayati dan NPK mampu mendukung pertumbuhan bibit kakao di polibag, sedangkan Sodik *et al.* [3] dan Eris *et al.* [14] menunjukkan bahwa aplikasi biofertilizer berformulasi DEA olein

sawit berpotensi memperbaiki pertumbuhan bibit kakao. Namun, penelitian yang secara khusus mengevaluasi aplikasi biofertilizer pelarut silika berformulasi dietanolamida olein sawit pada berbagai dosis NPK untuk pembibitan kakao masih terbatas. Hingga saat ini, informasi mengenai respons pertumbuhan bibit kakao terhadap formulasi tersebut, terutama pada kondisi pengurangan dosis NPK, masih belum banyak dilaporkan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh aplikasi biofertilizer pelarut silika berformulasi dietanolamida olein sawit pada berbagai dosis NPK terhadap pertumbuhan bibit kakao. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh formulasi biofertilizer dan dosis NPK yang memberikan respons pertumbuhan terbaik pada fase pembibitan. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi awal mengenai potensi pengurangan dosis NPK hingga 20% tanpa menurunkan pertumbuhan bibit kakao pada kondisi penelitian ini.

BAHAN DAN METODE

Penelitian dilaksanakan di Kebun Percobaan Fakultas Pertanian Universitas Sultan Ageng Tirtayasa yang berlokasi di Karang Kitri, Desa Cikuya, Kecamatan Pabuaran, Kabupaten Serang, Provinsi Banten. Analisis mikrobiologi dan pengujian laboratorium dilakukan di Laboratorium Tanah dan Agroklimatologi Fakultas Pertanian Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Alat utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi peralatan lapangan dan laboratorium, antara lain cangkul, ayakan tanah, sekop, timbangan digital dan analitik, jangka sorong, meteran, Soil Plant Analysis Development (SPAD), autoklaf, Laminar Air Flow (LAF), inkubator, *shaker*, *magnetic stirrer*, *hotplate stirrer*, mikropipet, cawan petri, erlenmeyer, tabung reaksi, vortex, blender, oven, mikroskop, serta *hand sprayer*. Bahan yang digunakan meliputi bibit kakao (*Theobroma cacao* L.), tanah, arang sekam, pupuk kandang

sapi, pupuk hayati pelarut silika, biosurfaktan dietanolamida (DEA) olein sawit, pupuk NPK Mutiara (16:16:16), aquades, alkohol 70%, serta bahan media mikrobiologi berupa Nutrient Agar (NA), Nutrient Broth (NB), dan media Pikovskaya yang diperkaya silika murni.

Rancangan Penelitian

Penelitian menggunakan Rancangan Acak Kelompok (RAK) faktorial yang terdiri atas dua faktor. Faktor pertama adalah aplikasi pupuk hayati pelarut silika yang diperkaya biosurfaktan DEA olein sawit, terdiri atas tiga taraf (H1: Pupuk hayati pelarut Si rizosfer kopi + biosurfaktan DEA; H2: Pupuk hayati pelarut Si rizosfer sawit + biosurfaktan DEA; H3: Pupuk hayati pelarut Si konsorsium + biosurfaktan DEA). Faktor kedua adalah dosis pupuk anorganik (NPK 16:16:16) yang terdiri atas tiga taraf (A1: 100% NPK (3,768 g/bibit); A2 : 90% NPK (3,391 g/bibit); A3 : 80% NPK (3,014 g/bibit). Kombinasi kedua faktor menghasilkan 9 kombinasi perlakuan yang masing-masing diulang sebanyak tiga kali, sehingga diperoleh 27 satuan percobaan. Setiap satuan percobaan terdiri dari dua tanaman, sehingga total bibit kakao yang digunakan sebanyak 54 tanaman.

Pelaksanaan Penelitian

Penelitian diawali dengan pembuatan pupuk hayati. Isolasi bakteri pelarut silika dilakukan dari tanah rizosfer tanaman perkebunan dengan metode pengenceran bertingkat hingga 10^{-7} . Sebanyak 0,1 mL suspensi tanah diinokulasikan pada media Nutrient Agar menggunakan metode *pour plate*. Koloni yang tumbuh kemudian dikarakterisasi menggunakan pewarnaan Gram dengan kristal violet, iodine, dan safranin. Uji fungsional bakteri pelarut silika dilakukan dengan metode gores pada media Pikovskaya yang diperkaya silika murni dan diinkubasi pada suhu ruang (± 25 °C) selama 24–120 jam. Isolat yang menunjukkan zona pelarutan silika selanjutnya diuji kompatibilitasnya pada

media NA dengan metode gores silang. Perbanyakkan bakteri dilakukan pada media Nutrient Broth menggunakan erlenmeyer steril dan diinkubasi pada shaker selama 48 jam hingga diperoleh suspensi bakteri dengan populasi optimal.

Selanjutnya dilakukan formulasi pupuk hayati dengan biosurfaktan dengan menambahkan biosurfaktan dietanolamida olein sawit sebanyak 5% (v/v) ke dalam suspensi pupuk hayati, kemudian dihomogenisasi menggunakan shaker pada kecepatan 180 rpm selama 15 menit.

Setelah formulasi selesai, dilakukan persiapan media tanam dan penanaman. Media tanam terdiri dari tanah, arang sekam, dan pupuk kandang sapi dengan perbandingan 2:1:1. Media dimasukkan ke dalam polybag berukuran 30 × 30 cm. Bibit kakao yang digunakan dipilih dengan kriteria seragam, sehat, dan memiliki sistem perakaran yang baik.

Aplikasi pupuk hayati dilakukan mulai 1 minggu setelah pindah tanam (MSPT) dan diulang setiap dua minggu hingga 9 MSPT dengan total lima kali aplikasi. Pupuk anorganik NPK diberikan sebanyak tiga kali pada umur 1, 3, dan 7 MSPT sesuai dengan dosis perlakuan. Pemeliharaan tanaman meliputi penyiraman, penyiangan gulma, serta pengendalian organisme pengganggu tanaman (OPT) selama masa penelitian.

Pengamatan dan Analisis Data

Pengamatan dilakukan pada umur 2, 4, 6, 8, dan 10 minggu setelah pindah tanam (MSPT) dengan parameter sebagai berikut: Tinggi tanaman (cm), diukur dari pangkal batang hingga titik tumbuh menggunakan meteran; Jumlah daun (helai), dihitung pada daun yang telah membuka sempurna dan berwarna hijau sehat; Diameter batang (cm), diukur menggunakan jangka sorong pada posisi 5 cm di atas permukaan tanah; Tingkat kehijauan daun (unit klorofil) diukur menggunakan alat SPAD dengan tiga titik

pengukuran pada daun (pangkal, tengah, ujung), kemudian dirata-ratakan. Data yang diperoleh dianalisis menggunakan analisis ragam (ANOVA) pada taraf kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$). Apabila hasil analisis menunjukkan perbedaan yang nyata, maka dilanjutkan dengan uji lanjut Duncan Multiple Range Test (DMRT) pada taraf 5% untuk membandingkan perbedaan antar perlakuan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tinggi Tanaman

Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa aplikasi pupuk hayati pelarut silika (Si) yang diperkaya biosurfaktan dietanolamida olein (DEA) sawit berpengaruh nyata terhadap tinggi tanaman bibit kakao pada umur 6, 8, dan 10 MSPT serta sangat nyata pada umur 4 MSPT. Dosis pupuk anorganik juga berpengaruh nyata pada seluruh waktu pengamatan (4–10 MSPT). Selain itu, interaksi antara kedua perlakuan berpengaruh nyata pada umur 4 dan 6 MSPT. Rata-rata tinggi tanaman disajikan pada Tabel 1.

Interaksi perlakuan menunjukkan bahwa kombinasi biofertilizer konsorsium berformulasi DEA olein sawit dengan dosis pupuk NPK 80% (H3A3) menghasilkan tinggi tanaman tertinggi pada umur 4 dan 6 MSPT. Hal ini menunjukkan adanya efek sinergis antara mikroorganisme pelarut hara dan pupuk anorganik dalam meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi tanaman. Mikroba dalam pupuk hayati mampu meningkatkan ketersediaan unsur hara melalui pelarutan mineral dan produksi fitohormon, sedangkan pupuk NPK menyediakan unsur hara makro secara langsung sehingga mempercepat pertumbuhan vegetatif tanaman. Fenomena sinergi tersebut juga dilaporkan oleh Ristikawati, yang menyatakan bahwa kombinasi pupuk hayati dan pupuk anorganik dapat meningkatkan tinggi tanaman melalui peningkatan ketersediaan hara di zona perakaran [15].

Tabel 1. Rata-rata tinggi tanaman bibit kakao (*Theobroma cacao* L.) pada aplikasi pupuk hayati pelarut silika diperkaya biosurfaktan dietanolamida olein sawit dan dosis pupuk anorganik

Umur Tanaman (MSPT)	Pupuk Hayati Pelarut Si + Biosurfaktan DEA	Dosis Pupuk Anorganik			Rata-rata
		A1	A2	A3	
	cm.....			
4	H1	40,93 c	42,87 bc	43,27 bc	42,36
	H2	44,72 b	41,87 bc	42,40 bc	42,99
	H3	44,30 b	42,67 bc	48,10 a	45,02
	Rata-rata	43,32	42,47	44,59	
6	H1	42,67 b	45,13 b	45,30 b	44,37
	H2	45,23 b	43,73 b	44,60 b	44,52
	H3	45,98 b	44,03 b	52,20 a	47,40
	Rata-rata	44,63	44,30	47,37	
8	H1	45,13	47,60	47,47	46,73 b
	H2	47,35	45,00	47,67	46,67 b
	H3	48,05	46,83	54,77	49,88 a
	Rata-rata	46,84 b	46,48 b	49,97 a	
10	H1	47,90	49,58	49,80	49,09 b
	H2	49,63	47,33	49,60	48,86 b
	H3	50,08	48,73	57,17	51,99 a
	Rata-rata	49,21 b	48,55 b	52,19 a	

Keterangan: Angka-angka yang diikuti huruf yang sama pada atau kolom yang sama menunjukkan berbeda tidak nyata berdasarkan uji DMRT pada taraf 5%.

Pengaruh perlakuan mandiri pupuk hayati terlihat jelas pada umur 8 dan 10 MSPT, dimana perlakuan H3 (pupuk hayati konsorsium) menunjukkan tinggi tanaman tertinggi. Hal ini berkaitan dengan keberadaan bakteri rizosfer seperti *Bacillus*, *Pseudomonas*, dan *Rhizobacter* yang diketahui berperan sebagai *plant growth promoting rhizobacteria* (PGPR). Mikroorganisme tersebut mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui mekanisme fiksasi nitrogen, pelarutan fosfat, produksi fitohormon, serta peningkatan aktivitas metabolisme tanaman. Ramadhani *et al.* [13] menjelaskan bahwa bakteri pemacu pertumbuhan tanaman dapat merangsang aktivitas meristem sehingga meningkatkan pembelahan dan pemanjangan sel tanaman. Selain itu, bakteri dari kelompok *Proteobacteria* seperti *Pseudomonas*, *Azospirillum*, dan *Bacillus* dilaporkan mampu meningkatkan ketersediaan N dan P di dalam tanah sehingga mendukung pertumbuhan vegetatif tanaman [16]. Sukumar *et al.* juga

melaporkan bahwa beberapa strain *Bacillus* memiliki kemampuan melarutkan silika yang dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman [17].

Pengaruh dosis pupuk anorganik menunjukkan bahwa perlakuan A3 (80% NPK) menghasilkan tinggi tanaman yang lebih tinggi dibandingkan dosis lainnya pada umur 8 dan 10 MSPT. Hasil ini menunjukkan bahwa pada kondisi penelitian ini aplikasi biofertilizer memungkinkan pengurangan dosis NPK hingga 20% tanpa menurunkan pertumbuhan tinggi tanaman sehingga kebutuhan pupuk anorganik dapat dikurangi tanpa menurunkan pertumbuhan tanaman. Unsur hara N, P, dan K pada pupuk NPK berperan penting dalam mendukung pertumbuhan vegetatif tanaman melalui pembentukan jaringan tanaman dan proses metabolisme [18]. Kombinasi pupuk hayati dan pengurangan dosis pupuk anorganik dapat menjadi strategi pemupukan yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Jumlah Daun

Jumlah daun merupakan indikator penting pertumbuhan vegetatif tanaman karena berkaitan langsung dengan kapasitas fotosintesis. Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa aplikasi pupuk hayati

pelarut silika yang diperkaya biosurfaktan DEA berpengaruh nyata terhadap jumlah daun pada umur 4, 8, dan 10 MSPT, sedangkan dosis pupuk anorganik berpengaruh nyata pada seluruh waktu pengamatan. Namun, tidak terdapat interaksi yang signifikan antara kedua perlakuan tersebut (Tabel 2.)

Tabel 2. Rata-rata jumlah daun bibit kakao (*Theobroma cacao* L.) pada aplikasi pupuk hayati pelarut silika diperkaya biosurfaktan dietanolamida olein sawit dan dosis pupuk anorganik

Umur Tanaman (MSPT)	Pupuk Hayati Pelarut Si + Biosurfaktan DEA	Dosis Pupuk Anorganik			Rata-rata
		A1	A2	A3	
.....helai.....					
4	H1	6,00	7,17	7,00	6,72 ab
	H2	6,83	5,33	7,00	6,39 b
	H3	7,17	6,83	8,00	7,33 a
	Rata-rata	6,67 ab	6,44 b	7,33 a	
6	H1	9,67	8,50	9,67	9,28
	H2	9,67	7,33	10,33	9,11
	H3	10,00	7,17	13,50	10,22
	Rata-rata	9,78 ab	7,67 b	11,17 a	
8	H1	9,83	9,17	10,33	9,78 b
	H2	10,00	7,83	10,67	9,50 b
	H3	11,00	9,83	14,67	11,83 a
	Rata-rata	10,28 ab	8,94 b	11,89 a	
10	H1	14,17	12,67	12,83	13,22 ab
	H2	12,17	10,33	13,00	11,83 b
	H3	13,50	12,33	19,17	15,00 a
	Rata-rata	13,28 ab	11,78 b	15,00 a	

Keterangan: Angka-angka yang diikuti huruf yang sama pada atau kolom yang sama menunjukkan berbeda tidak nyata berdasarkan uji DMRT pada taraf 5%.

Perlakuan pupuk hayati konsorsium (H3) menghasilkan jumlah daun tertinggi pada umur 4, 8, dan 10 MSPT. Hal ini berkaitan dengan kemampuan konsorsium mikroba dalam meningkatkan ketersediaan unsur hara penting bagi tanaman. Mikroorganisme rizosfer mampu menambat nitrogen dari udara, melarutkan fosfor yang terikat dalam tanah, serta menghasilkan senyawa pemacu pertumbuhan tanaman. Nitrogen berperan penting dalam pembentukan klorofil dan jaringan daun, sedangkan fosfor berperan dalam proses pembelahan sel dan transfer energi melalui senyawa ATP. Dengan

meningkatnya ketersediaan unsur hara tersebut, pembentukan daun menjadi lebih optimal.

Selain itu, aktivitas mikroba juga dapat meningkatkan ketersediaan unsur mikro seperti Fe yang berperan dalam sintesis klorofil dan proses fotosintesis daun^[19]. Peningkatan jumlah daun yang terjadi pada perlakuan pupuk hayati konsorsium menunjukkan bahwa interaksi mikroorganisme dengan sistem perakaran tanaman mampu meningkatkan aktivitas fisiologis tanaman sehingga mendukung pertumbuhan vegetatif yang lebih baik. Dosis

pupuk anorganik 80% NPK (A3) juga menghasilkan jumlah daun tertinggi dibandingkan dosis lainnya. Hasil ini menunjukkan bahwa pengurangan dosis pupuk anorganik tidak menurunkan pertumbuhan tanaman apabila dikombinasikan dengan aplikasi pupuk hayati. Hal tersebut mengindikasikan bahwa keberadaan mikroorganisme dalam pupuk hayati mampu meningkatkan efisiensi penyerapan unsur hara oleh tanaman.

Diameter Batang

Diameter batang digunakan dalam menilai vigor tanaman karena berkaitan

dengan perkembangan jaringan vaskular serta kekuatan struktural tanaman dalam menopang pertumbuhan tajuk. Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa aplikasi biofertilizer pelarut silika berformulasi dietanolamida olein sawit berpengaruh nyata terhadap diameter batang bibit kakao pada umur 6, 8, dan 10 MSPT, sedangkan dosis pupuk anorganik secara mandiri tidak memberikan pengaruh yang nyata. Namun demikian, interaksi antara kedua perlakuan berpengaruh nyata pada umur 4 dan 6 MSPT (Tabel 3).

Tabel 3. Rata-rata diameter batang bibit kakao (*Theobroma cacao* L.) pada aplikasi pupuk hayati pelarut silika diperkaya biosurfaktan dietanolamida olein sawit dan dosis pupuk anorganik

Umur Tanaman (MSPT)	Pupuk Hayati Pelarut Si + Biosurfaktan DEA	Dosis Pupuk Anorganik			Rata-rata
		A1	A2	A3	
.....cm.....					
4	H1	0,71 ab	0,64 b	0,64 b	0,66
	H2	0,66 b	0,62 b	0,62 b	0,63
	H3	0,62 b	0,79 a	0,78 a	0,73
	Rata-rata	0,66	0,68	0,68	
6	H1	0,79 abc	0,71 c	0,74 bc	0,75
	H2	0,76 bc	0,70 c	0,70 c	0,72
	H3	0,70 c	0,87 a	0,84 ab	0,80
	Rata-rata	0,75	0,76	0,76	
8	H1	0,84	0,76	0,84	0,81 b
	H2	0,85	0,79	0,82	0,82 b
	H3	0,91	0,90	0,91	0,91 a
	Rata-rata	0,87	0,82	0,85	
10	H1	0,91	0,95	0,97	0,94 b
	H2	1,04	0,96	0,95	0,99 b
	H3	1,21	1,16	1,10	1,15 a
	Rata-rata	1,05	1,02	1,01	

Keterangan: Angka-angka yang diikuti huruf yang sama pada atau kolom yang sama menunjukkan berbeda tidak nyata berdasarkan uji DMRT pada taraf 5%

Kombinasi perlakuan H3A2 hingga H3A3 menunjukkan diameter batang yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan lainnya. Hasil ini mengindikasikan bahwa pembesaran

diameter batang lebih berkaitan dengan tersedianya hara secara bertahap dan berkelanjutan di zona perakaran dibandingkan dengan suplai hara yang tinggi tetapi bersifat

sesaat. Dalam konteks ini, bakteri pelarut fosfat diketahui dapat meningkatkan akuisisi fosfor tanaman melalui pelarutan, mobilisasi, dan mineralisasi P, terutama melalui produksi asam organik dan enzim terkait fosfat, sehingga mendukung pertumbuhan akar dan jaringan tanaman yang lebih baik^[20]. Penelitian Biswas *et al*^[21] menunjukkan bahwa inokulasi phosphate-solubilizing bacteria pada sumber P sukar larut mampu meningkatkan ketersediaan P di tanah, menekan fiksasi P, dan mempertahankan suplai P yang lebih stabil sepanjang fase pertumbuhan tanaman. Walaupun penelitian tersebut dilakukan pada gandum, mekanisme biologis yang ditunjukkan tetap relevan untuk menjelaskan bahwa peningkatan diameter batang pada bibit kakao dapat dipacu oleh pasokan fosfor yang lebih efisien dan berkelanjutan di daerah perakaran.

Pada tanaman kakao sendiri, komunitas bakteri indigenous di rizosfer telah dilaporkan memiliki sifat fungsional yang mendukung pertumbuhan, termasuk kemampuan melarutkan fosfat. Studi pada rizosfer kakao fine-flavor di Peru menunjukkan bahwa komunitas bakterinya didominasi oleh kelompok Bacillaceae, dan sebagian isolat memperlihatkan kemampuan melarutkan fosfat serta menghasilkan siderofor. Temuan ini memperkuat bahwa rizosfer kakao memang menyediakan ruang ekologis yang sesuai bagi bakteri fungsional yang berpotensi mendukung pertumbuhan vegetatif bibit, termasuk peningkatan diameter batang^[22]. Selain fosfor, komponen bakteri pelarut silika dalam pupuk hayati juga berpotensi berkontribusi terhadap pertumbuhan batang. Raturi *et al*.^[7] menjelaskan bahwa silicate-solubilizing bacteria dapat meningkatkan ketersediaan Si melalui proses bioweathering dan melalui produksi metabolit seperti asam organik, sehingga Si yang semula berada dalam bentuk tidak larut menjadi lebih tersedia bagi tanaman. Dengan meningkatnya Si tersedia di sekitar akar, tanaman memiliki peluang lebih besar untuk memperoleh

manfaat fisiologis dari unsur tersebut selama fase pertumbuhan vegetatif.

Karena pupuk hayati yang digunakan berbasis konsorsium mikroba, respons yang lebih baik pada perlakuan H3 sesuai dengan hasil penelitian Liu *et al*^[23] menunjukkan bahwa inokulasi konsorsium mikroba secara umum memberikan peningkatan pertumbuhan tanaman yang lebih besar dibandingkan inokulasi strain tunggal, terutama karena adanya efek sinergis antaranggota konsorsium. Oleh sebab itu, keunggulan perlakuan H3 pada diameter batang bibit kakao diduga tidak hanya berasal dari satu mekanisme tunggal, tetapi dari kerja bersama beberapa kelompok mikroba yang meningkatkan efisiensi biofertilisasi di rizosfer.

Keberhasilan pupuk hayati juga sangat ditentukan oleh kemampuan mikroba untuk bertahan dan mengkolonisasi rizosfer secara efektif. Manfaat PGPR terhadap pertumbuhan tanaman sangat bergantung pada keberhasilan kolonisasi rizosfer, yang dipengaruhi oleh kemotaksis, pembentukan biofilm, dan produksi metabolit sekunder^[24]. Dengan demikian, peningkatan diameter batang pada penelitian ini masuk akal apabila formulasi pupuk hayati yang digunakan mampu mendukung kolonisasi mikroba yang lebih stabil di sekitar akar kakao

Ketersediaan Si yang lebih baik penting karena Si dikenal sebagai unsur tanah yang bernilai dalam menunjang pertumbuhan tanaman dan ketahanan terhadap cekaman. Khan menegaskan bahwa mobilisasi Si di rizosfer, termasuk oleh mikrobioma tanah, berkaitan dengan peningkatan pertumbuhan tanaman dan penguatan respons fisiologis tanaman terhadap kondisi lingkungan yang kurang menguntungkan^[4]. Dalam penelitian ini, kondisi tersebut dapat membantu mempertahankan pertumbuhan batang bibit kakao sehingga diameter batang pada perlakuan pupuk hayati yang lebih tinggi menjadi lebih besar.

Penambahan biosurfaktan dietanolamida olein sawit dalam formulasi pupuk hayati

diduga turut mendukung efektivitas formulasi, meskipun mekanisme spesifiknya belum dievaluasi secara langsung dalam penelitian ini. Secara umum, biosurfaktan memiliki sifat aktif-permukaan yang berpotensi meningkatkan dispersi formulasi dalam media tanam serta memperbaiki interaksi pada antarmuka tanah-akar. Dalam bidang pertanian, biosurfaktan juga semakin banyak dikaji karena potensinya dalam menunjang kesehatan tanah, meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman, serta mendukung fungsi biostimulasi. Oleh karena itu, peran dietanolamida olein sawit lebih tepat diposisikan sebagai komponen formulasi yang membantu memperbaiki distribusi mikroba dan efektivitas interaksinya di zona perakaran, bukan sebagai mekanisme kausal yang telah dibuktikan secara langsung [25].

Tingkat Kehijauan Daun

Tingkat kehijauan daun diukur menggunakan alat SPAD merupakan indikator tidak langsung kandungan klorofil daun yang berkaitan dengan kapasitas fotosintesis tanaman. Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa aplikasi biofertilizer pelarut silika berformulasi dietanolamida olein sawit serta dosis pupuk anorganik berpengaruh sangat nyata terhadap tingkat kehijauan daun pada umur 10 MSPT. Interaksi antara kedua perlakuan yang menunjukkan bahwa respons kehijauan daun tidak hanya ditentukan oleh masing-masing faktor secara terpisah, tetapi juga oleh sinergi keduanya dalam meningkatkan ketersediaan dan efisiensi pemanfaatan hara (Tabel 4).

Tabel 4. Rata-rata tingkat kehijauan daun (unit klorofil) bibit kakao (*Theobroma cacao* L.) pada aplikasi pupuk hayati pelarut silika diperkaya biosurfaktan dietanolamida olein sawit dan dosis pupuk anorganik

Umur Tanaman (MSPT)	Pupuk Hayati Pelarut Si + Biosurfaktan DEA	Dosis Pupuk Anorganik			Rata-rata
		A1	A2	A3	
.....unit klorofil.....					
10 MSPT	H1	38,27 c	38,03 c	37,87 c	38,06
	H2	39,17 bc	39,72 bc	41,57 b	40,15
	H3	38,87 bc	40,87 bc	45,08 a	41,61
	Rata-rata	38,77	39,54	41,51	

Keterangan: Angka-angka yang diikuti huruf yang sama pada atau kolom yang sama menunjukkan berbeda tidak nyata berdasarkan uji DMRT pada taraf 5%

Nilai SPAD tertinggi diperoleh pada kombinasi perlakuan H3A3. Hasil ini menunjukkan bahwa formulasi biofertilizer konsorsium pada dosis NPK 80% mampu mendukung tingkat kehijauan daun yang lebih baik dibandingkan kombinasi perlakuan lainnya. Nilai SPAD yang lebih tinggi mengindikasikan kondisi fisiologis daun yang lebih baik dan diduga berkaitan dengan kecukupan hara serta aktivitas rizosfer yang lebih mendukung. Peningkatan nilai SPAD pada perlakuan tersebut mengindikasikan

bahwa tanaman memiliki kandungan klorofil yang lebih baik, yang erat kaitannya dengan ketersediaan nitrogen dan fosfor sebagai unsur utama dalam sintesis klorofil dan aktivitas enzimatis fotosintesis. Dalam kondisi ini, konsorsium mikroba berperan dalam meningkatkan ketersediaan hara melalui fiksasi nitrogen, pelarutan fosfat, dan peningkatan kompetensi rizosfer, sehingga penyerapan unsur hara oleh akar menjadi lebih efisien. Karakter bakteri pelarut silika yang juga memiliki sifat pemacu pertumbuhan

tanaman telah ditunjukkan oleh Cruz *et al.*^[8] yang melaporkan bahwa isolat silicate-solubilizing bacteria memiliki kompetensi rizosfer dan potensi sebagai agen pemacu pertumbuhan tanaman.

Selain ditentukan oleh hara makro, peningkatan kehijauan daun pada penelitian ini juga sangat mungkin berkaitan dengan meningkatnya ketersediaan silika dalam tanah. Etesami dan Schaller menjelaskan bahwa bakteri pelarut silika tidak hanya berperan dalam meningkatkan ketersediaan Si, tetapi juga dapat memperbaiki dinamika fosfor di tanah melalui interaksi biologis pada rizosfer^[26]. Dalam konteks bibit kakao, kondisi ini penting karena peningkatan ketersediaan Si dapat mendukung stabilitas fisiologis tanaman, memperbaiki efisiensi penggunaan air dan hara, serta menunjang proses pembentukan klorofil. Dengan demikian, peningkatan nilai SPAD pada perlakuan H3A3 menunjukkan bahwa integrasi pupuk hayati pelarut silika dan pengurangan dosis pupuk anorganik tidak menurunkan performa fisiologis tanaman, tetapi justru meningkatkan efisiensi fungsi daun sebagai organ fotosintetik.

Kekuatan hasil penelitian ini juga didukung oleh karakter mikroba yang berasal dari rizosfer kakao. Nurmayulis *et al.*^[9] melaporkan bahwa mikroba dari rizosfer kakao berpotensi dikembangkan sebagai biofertilizer dan dalam penelitiannya secara spesifik dikaji dalam bentuk konsorsium dengan penambahan biosurfaktan diethanolamide. Temuan tersebut relevan dengan hasil penelitian ini, karena menunjukkan bahwa penggunaan konsorsium mikroba yang sesuai dengan lingkungan perakaran kakao dapat meningkatkan efektivitas kolonisasi dan aktivitas biologis di rizosfer. Kondisi rizosfer yang lebih aktif akan meningkatkan penyerapan hara yang dibutuhkan dalam pembentukan klorofil, sehingga daun menunjukkan tingkat kehijauan yang lebih tinggi.

Efektivitas formulasi pupuk hayati pada penelitian ini juga diduga diperkuat oleh penambahan biosurfaktan DEA olein sawit. Silva *et al.*^[10] menegaskan bahwa biosurfaktan merupakan biomolekul yang menjanjikan untuk aplikasi pertanian karena dapat berfungsi sebagai adjuvan yang meningkatkan distribusi bahan aktif pada sistem pertanian. Dalam formulasi pupuk hayati, fungsi ini penting karena biosurfaktan dapat memperbaiki penyebaran suspensi mikroba, meningkatkan kontak antara inokulan dengan permukaan akar, serta mendukung kolonisasi mikroba pada zona perakaran. Datta *et al.*^[11] juga menunjukkan bahwa biosurfaktan mikroba memiliki beragam aplikasi dalam pertanian berkelanjutan, termasuk dalam meningkatkan mobilisasi senyawa di tanah dan mendukung efektivitas input hayati

KESIMPULAN

Aplikasi biofertilizer pelarut silika berformulasi dietanolamida olein sawit berpengaruh terhadap pertumbuhan bibit kakao. Formulasi konsorsium (H3) menunjukkan respons terbaik pada sebagian besar parameter pengamatan, yaitu tinggi tanaman, jumlah daun, diameter batang, dan tingkat kehijauan daun. Dosis pupuk anorganik 80% NPK juga memberikan respons yang baik pada sebagian besar parameter, sehingga menunjukkan bahwa pada kondisi penelitian ini pengurangan dosis NPK sebesar 20% masih dapat dilakukan tanpa menurunkan pertumbuhan bibit kakao. Interaksi antara formulasi biofertilizer dan dosis NPK terjadi pada tinggi tanaman umur 4 dan 6 MSPT serta diameter batang umur 4 dan 6 MSPT, yang menunjukkan bahwa respons pertumbuhan awal bibit kakao dipengaruhi oleh kombinasi kedua perlakuan. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa aplikasi biofertilizer pelarut silika berformulasi dietanolamida olein sawit, terutama formulasi konsorsium pada dosis NPK 80%, berpotensi mendukung

pertumbuhan bibit kakao pada fase pembibitan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Sultan Ageng Tirtayasa atas dukungan selama penelitian ini melalui Hibah Penelitian Internal dengan nomor kontrak B/290/un.43.9/PT.01.03/2024.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Nurlina and H. A. A. Selvina, "Kelayakan finansial usahatani kakao organik (studi kasus: kelompok tani Sidodadi Kabupaten Gunungkidul)," in *Proc. Semin. Nas. Pembangunan dan Pendidikan Vokasi Pertanian*, vol. 5, no. 1, pp. 101–109, 2024.
- [2] Direktorat Statistik Tanaman Pangan, Hortikultura, dan Perkebunan, *Statistik Perkebunan Jilid I 2022–2024*. Direktorat Jenderal Perkebunan, Kementerian Pertanian, 2024.
- [3] A. H. Sodik, R. S. Taufan, Nurmayulis, and R. E. Fitria, "Aplikasi pupuk hayati diperkaya biosurfaktan dietanolamida olein sawit dengan interval waktu yang berbeda pada bibit kakao (*Theobroma cacao* L.)," *Jurnal Agroekoteknologi*, vol. 15, no. 1, pp. 80–91, 2023.
- [4] A. L. Khan, "Silicon: A valuable soil element for improving plant growth and CO₂ sequestration," *Journal of Advanced Research*, vol. 71, pp. 43–54, 2025, doi: 10.1016/j.jare.2024.05.027.
- [5] L. P. Santi and D. H. Goenadi, "Solubilization of silicate from quartz mineral by potential silicate-solubilizing bacteria," *Menara Perkebunan*, vol. 85, no. 2, pp. 95–104, 2017.
- [6] V. Bist *et al.*, "Silicon-solubilizing media and its implication for characterization of bacteria to mitigate biotic stress," *Frontiers in Plant Science*, vol. 11, no. 28, pp. 1–19, 2020.
- [7] G. Raturi *et al.*, "Exploration of silicate solubilizing bacteria for sustainable agriculture and silicon biogeochemical cycle," *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 166, pp. 827–838, 2021, doi: 10.1016/j.plaphy.2021.06.039.
- [8] J. A. Cruz *et al.*, "Identification and profiling of silicate-solubilizing bacteria for plant growth-promoting traits and rhizosphere competence," *Rhizosphere*, vol. 23, p. 100566, 2022.
- [9] Nurmayulis, A. H. Sodik, F. R. Eris, D. Hastuti, Y. R. Denny, and D. N. Susilowati, "Molecular identification of microbes from the soil rhizosphere of cocoa as a potential biofertilizer," *AGRIVITA Journal of Agricultural Science*, vol. 45, no. 1, pp. 124–130, 2023.
- [10] M. d. G. C. Silva *et al.*, "Biosurfactants: Promising biomolecules for agricultural applications," *Sustainability*, vol. 16, no. 1, p. 449, 2024.
- [11] D. Datta *et al.*, "Microbial biosurfactants: Multifarious applications in sustainable agriculture," *Microbiological Research*, vol. 279, p. 127551, 2024.
- [12] F. R. Eris, Nurmayulis, and A. H. Sodik, "Population test and chemical characteristics of the rhizosphere microbial consortium enriched with palm oil olein biosurfactant," *Malaysian Journal of Soil Science*, vol. 29, pp. 210–218, 2025.
- [13] R. F. Ramadhani, H. Rudi, Hayata, and E. W., "Pertumbuhan bibit kakao (*Theobroma cacao* L.) pada berbagai kombinasi pupuk anorganik NPK dan pupuk hayati bioneensis di polibag," *Jurnal Media Pertanian*, vol. 9, no. 1, pp. 19–28, 2024.
- [14] F. R. Eris, I. P. Sari, Nurmayulis, A. H. Sodik, and Yardha, "Application technique and concentration of biofertilizer from rhizosphere of cocoa (*Theobroma cacao* L.) given biosurfactant diethanolamide oil palm on the growth of cocoa seedlings," in *Proc. 7th Int. Conf.*

- Agriculture, Environment, and Food Security*, vol. 1302, pp. 1–8, 2024.
- [15] D. Ristikawati, “Respon pertumbuhan dan hasil kentang (*Solanum tuberosum* L.) dataran medium varietas DTO 28 terhadap dosis pupuk NPK dan PGPR,” Skripsi, Universitas Brawijaya, 2017.
- [16] Y. Yang, N. Wang, X. Guo, Y. Zhang, and B. Ye, “Comparative analysis of bacterial community structure in the rhizosphere of maize by high-throughput pyrosequencing,” *PLoS ONE*, vol. 12, no. 5, pp. 1–11, 2017.
- [17] K. Sukumar, S. Ganti, and G. Muralitharan, “Experimental studies on isolation and characterization of silicate solubilizing *Bacillus tequilensis* SKSSB09,” *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, vol. 11, no. 4, pp. 135–140, 2023.
- [18] E. M. L. Tobing, R. Santi, and A. S. Moch, “Pengaruh dosis dan cara pemberian pupuk anorganik terhadap pertumbuhan kakao (*Theobroma cacao* L.) belum menghasilkan klon Sulawesi 1 kultivasi,” *Jurnal Agrikultura*, vol. 30, no. 2, pp. 46–52, 2019.
- [19] H. P. Hartono, R. Saiku, and F. Hanik, “Pengaruh pemberian PGPR *Bacillus* sp. dan *Pseudomonas* sp. asal akar bambu apus terhadap pertumbuhan tanaman jagung (*Zea mays* L.),” *Jurnal Ilmiah Membangun Desa dan Pertanian (JIMDP)*, vol. 9, no. 3, pp. 294–304, 2024.
- [20] A. Bargaz *et al.*, “Benefits of phosphate solubilizing bacteria on belowground crop performance for improved crop acquisition of phosphorus,” *Microbiological Research*, vol. 252, p. 126842, 2021, doi: 10.1016/j.micres.2021.126842.
- [21] S. S. Biswas *et al.*, “Phosphate solubilizing bacteria inoculated low-grade rock phosphate can supplement P fertilizer to grow wheat in sub-tropical inceptisol,” *Rhizosphere*, vol. 23, p. 100556, 2022, doi: 10.1016/j.rhisph.2022.100556.
- [22] J. S. Crisostomo-Panuera *et al.*, “Diversity and functional assessment of indigenous culturable bacteria inhabiting fine-flavor cacao rhizosphere: Uncovering antagonistic potential against *Moniliophthora roreri*,” *Heliyon*, vol. 10, no. 7, p. e28453, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e28453.
- [23] X. Liu, S. Mei, and J. F. Salles, “Inoculated microbial consortia perform better than single strains in living soil: A meta-analysis,” *Applied Soil Ecology*, vol. 190, p. 105011, 2023, doi: 10.1016/j.apsoil.2023.105011.
- [24] A. Zboralski and M. Filion, “Genetic factors involved in rhizosphere colonization by phytobeneficial *Pseudomonas* spp.,” *Computational and Structural Biotechnology Journal*, vol. 18, pp. 3539–3554, 2020, doi: 10.1016/j.csbj.2020.11.025.
- [25] E. Pierre *et al.*, “Applications of rhamnolipid biosurfactants in agriculture,” *Plant Stress*, vol. 15, p. 100749, 2025, doi: 10.1016/j.stress.2025.100749.
- [26] H. Etesami and J. Schaller, “Improving phosphorus availability to rice through silicon management in paddy soils: A review of the role of silicate-solubilizing bacteria,” *Rhizosphere*, vol. 27, p. 100749, 2023.