

Artikel Penelitian

## Substitusi Pupuk NPK Berbasis Ecoenzyme-Ekstrak Azolla Melalui Pengaturan Frekuensi Aplikasi Pada Bibit Kelapa Sawit

Sakiah\*, Eka Bobby Febrianto, Ramedo Lumban Gaol, Muhammad Hanafi

Budiaya Perkebunan, Institut Teknologi Sawit Indonesia, Jl. Willem Iskandar (Jl Pancing), Medan, Sumatera Utara

### INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 16 Juni 2026  
Revisi Akhir: 05 Juli 2026  
Diterbitkan Online: 06 Juli 2026

### KATA KUNCI

Liquid Organic Fertilizer  
*Pre-Nursery*  
Soil Organic Carbon  
Seedling Biomass

### KORESPONDENSI

Phone: +62 813-6172-1930  
E-mail: [sakiah@itsi.ac.id](mailto:sakiah@itsi.ac.id)

### A B S T R A K

Tahap pra-pembibitan merupakan fase kritis dalam menghasilkan bibit kelapa sawit yang kuat dan seragam. Pemupukan organik cair menawarkan alternatif yang menjanjikan untuk mengurangi ketergantungan pada pupuk anorganik serta mendukung pengelolaan pembibitan yang lebih berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh substitusi pupuk NPK dengan campuran *ecoenzyme* dan ekstrak *Azolla* pada frekuensi aplikasi yang berbeda terhadap pertumbuhan bibit kelapa sawit. Percobaan disusun dalam rancangan acak lengkap non-faktorial dengan empat perlakuan dan empat ulangan: M0 = NPK 15-15-6-4, M1 = *ecoenzyme* 2 mL L<sup>-1</sup> air + ekstrak *Azolla* 20 mL diaplikasikan setiap hari, M2 = *ecoenzyme* 2 mL L<sup>-1</sup> air + ekstrak *Azolla* 40 mL diaplikasikan setiap 3 hari, dan M3 = *ecoenzyme* 2 mL L<sup>-1</sup> air + ekstrak *Azolla* 60 mL diaplikasikan setiap 7 hari. Variabel yang diamati meliputi tinggi bibit, diameter batang, jumlah daun, berat segar, berat kering, dan sifat kimia tanah terpilih sebagai data pendukung. Hasil menunjukkan bahwa penggantian NPK dengan campuran *ecoenzyme*-ekstrak *Azolla* meningkatkan tinggi bibit dan diameter batang pada tahap pertumbuhan selanjutnya serta menghasilkan biomassa yang lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan kontrol NPK, sementara jumlah daun tetap relatif serupa di antara perlakuan. Perlakuan substitusi juga cenderung meningkatkan karbon organik tanah, sedangkan pH tanah dan nitrogen total tetap relatif stabil. Temuan ini menunjukkan bahwa ekstrak *ecoenzyme*-*Azolla* memiliki potensi sebagai alternatif pemupukan yang lebih berkelanjutan untuk pengelolaan pra-pembibitan kelapa sawit.

### PENDAHULUAN

Pembibitan kelapa sawit *pre-nursery* merupakan tahapan penting dalam menghasilkan bibit kelapa sawit yang sehat dan jagur. Upaya pemeliharaan bibit melalui pemupukan dan penyiraman yang tepat dapat meminimalisir jumlah bibit afkir. Pupuk yang digunakan pada *pre-nursery* masih mengandalkan pupuk kimia yaitu urea dengan dosis 2 gram per liter air untuk 100 bibit dan NPK 15-15-6-4 dengan dosis 2,5 gram per polybag (Purba & Sipayung, 2017). Media tanam bibit kelapa sawit sekarang ini bersumber dari tanah-tanah dengan tingkat kesuburan rendah, peran pupuk organik menjadi sangat penting dalam penyediaan bibit yang sehat, sehingga diperlukan eksplorasi pupuk organik penyubstitusi pupuk kimia.

Produksi pupuk organik di Indonesia telah berkembang pesat, berdasarkan data Kementerian Pertanian, Direktorat Pupuk dan Pestisida, jumlah pupuk organik yang terdaftar di Indonesia pada tahun 2017 berjumlah 182 jenis dan terus meningkat hingga tahun 2022 mencapai 312 jenis atau naik 71% dalam kurun waktu 5 tahun. Pemerintah melalui Direktorat Pupuk dan Pestisida telah menyalurkan pupuk organik granul bersubsidi, jumlah pupuk yang telah disalurkan dari tahun 2017-2021 mencapai 3.316.926 ton. Kebijakan tersebut merupakan wujud komitmen pemerintah dalam menggalakkan dan mendorong masyarakat menggunakan pupuk organik.

Peran literasi melalui berbagai media turut memperkenalkan produk-produk pupuk organik ke tengah masyarakat sehingga masyarakat turut berperan aktif mengolah dan menghasilkan pupuk organik yang bahan bakunya mudah didapatkan dan mudah dalam pembuatannya (Murdiana dkk., 2022; Sakiah dkk., 2023, 2024). Salah satunya yaitu *ecoenzyme*. *Ecoenzyme* merupakan cairan berwarna coklat beraroma segar hasil fermentasi buah dan atau sayuran, molase dan air dengan perbandingan 3 : 1 : 10 (buah/sayur : molase : air) (Hasanah dkk., 2020); (Eshtiaghi & Nakthong, 2020). Pembuatan *ecoenzyme* terbilang mudah dan murah sehingga banyak kalangan mengadopsi teknologi ini untuk mengurangi timbunan limbah organik terutama buah-buahan.

Hasil penelitian pemanfaatan *ecoenzyme* pada tanaman jahe merah telah dilaporkan Purwaningsih dkk., (2023), yakni *ecoenzyme* mampu meningkatkan jumlah anakan, bobot kering akar, dan bobot kering rimpang serta secara nyata meningkatkan kandungan fenolik jahe merah. Sipayung dkk., (2023) melaporkan perbedaan dosis (1%, 3% dan 5%) dan cara pengaplikasian (disiram dan disemprot) *ecoenzyme* berbeda nyata terhadap tinggi tanaman namun penggunaan NPK 0,2 g (kontrol) lebih baik dibanding *ecoenzyme*. Hastuti & Titiaryanti, (2022) juga melaporkan, interaksi variasi dosis *ecoenzyme* (0%, 5%, 10% dan 15%) dan pupuk NPK (0 mL, 50 mL, 75 mL, 100 mL) tidak berpengaruh nyata terhadap pertumbuhan bibit kelapa sawit *pre-nursery* tetapi penggunaan *ecoenzyme* dosis 15% lebih baik dibanding perlakuan lainnya.

Selain buah dan sayuran, bahan baku pupuk organik yang berpotensi dari lahan pertanian adalah *Azolla sp.* *Azolla sp* merupakan tumbuhan paku air berwarna hijau, kaya Nitrogen yang ketersediannya melimpah di wilayah tropis dan sub tropis (Suyana dkk., 2001). Zakarya & Nadhirah, (2021) mengemukakan, setelah 140 hari inkubasi pupuk hayati *Azolla*, kompos dan sianobakteri menunjukkan ketersediaan N pada akhir inkubasi *Azolla* sebesar 73%, lebih tinggi dibanding kompos dan sianobakteri. Aplikasi *Azolla* dapat mengurangi penggunaan pupuk fosfat dan nitrogen hingga 50% dari jumlah pupuk yang direkomendasikan pada tanaman padi. Korsa dkk., (2024) melaporkan, ekstrak *Azolla* merupakan biofertilizer yang mengandung N, P, Mg dan Fe. Penggunaan ekstrak *Azolla* pada tanaman padi dapat meningkatkan hasil gabah sebesar 51-57% dan hasil biologis sebesar 21-37% dari control.

Merujuk pada pemaparan diatas, pemanfaatan *ecoenzyme* secara tunggal maupun kombinasi dengan pupuk kimia menunjukkan hasil yang kurang optimal pada bibit kelapa sawit *pre-nursery*, oleh karena *Azolla* memiliki potensi sebagai sumber hara dan bahan organik yang baik, maka pada penelitian ini digunakan campuran *ecoenzyme* dan ekstrak *Azolla* sebagai pupuk yang disiramkan pada media tanam bibit kelapa sawit *pre-nursery* dengan frekuensi penyiraman yang berbeda. Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan kombinasi *ecoenzyme* dan ekstrak *Azolla* sebagai pengganti penuh pupuk NPK 15-15-6-4, disertai pengaturan frekuensi aplikasi, untuk mengevaluasi respons pertumbuhan bibit kelapa sawit dan perubahan sifat kimia tanah. Penelitian bertujuan untuk mengetahui pengaruh substitusi pupuk NPK melalui *ecoenzyme*-ekstrak *Azolla* yang diaplikasikan dengan rentang waktu yang berbeda terhadap pertumbuhan bibit kelapa sawit *pre-nursery*.

## TINJAUAN PUSTAKA

### *Ecoenzyme*

*Ecoenzyme* merupakan larutan hasil fermentasi limbah organik, terutama sisa buah dan sayuran, dengan molase/gula dan air. Produk ini banyak dikembangkan sebagai bentuk pemanfaatan limbah organik rumah tangga sekaligus sebagai bahan cair multifungsi untuk pertanian, pengelolaan lingkungan, dan sanitasi. Hasanah dkk. (2020) menjelaskan bahwa *ecoenzyme* berasal dari fermentasi limbah buah, sayuran, dan bahan organik lainnya, serta telah dimanfaatkan dalam produksi padi organik dan desinfektan.

Dalam konteks pertanian, *ecoenzyme* mulai dikaji sebagai pupuk organik cair atau biostimulan karena mengandung senyawa hasil fermentasi, bahan organik terlarut, dan unsur hara dalam jumlah bervariasi, tergantung bahan baku dan proses fermentasinya. Irmansyah dkk. (2024) melaporkan bahwa *ecoenzyme* dari limbah rumah tangga seperti kulit buah dan sayuran digunakan sebagai pupuk organik cair pada sorgum, dan konsentrasi 27,9 mL L<sup>-1</sup> meningkatkan pertumbuhan dan hasil, termasuk diameter batang, bobot basah, dan bobot kering.

Kajian lain menunjukkan bahwa *ecoenzyme* dapat berperan sebagai bahan pendukung pertumbuhan ketika dikombinasikan dengan bahan organik lain. Narang dkk. (2024) melaporkan bahwa kompos yang dipersiapkan dengan

*ecoenzyme* 10% menunjukkan efek peningkatan pertumbuhan tertinggi pada *Phaseolus vulgaris*, dengan pH akhir kompos berada pada kisaran netral. Temuan ini mengindikasikan bahwa *ecoenzyme* berpotensi sebagai bahan yang membantu proses dekomposisi dan perbaikan kualitas bahan organik, bukan sebagai pupuk mineral cepat tersedia. Penelitian pada bibit kelapa sawit telah dilaporkan bahwa penggunaan *ecoenzyme* memberikan respons yang tidak selalu sama antar parameter. Sipayung dkk. (2023) menunjukkan bahwa perbedaan konsentrasi dan cara aplikasi *ecoenzyme* dapat memengaruhi tinggi bibit kelapa sawit *pre-nursery*, namun kontrol NPK masih menunjukkan respons yang lebih baik pada beberapa kondisi. Hastuti dan Titiaryanti (2022) juga melaporkan bahwa kombinasi *ecoenzyme* dan NPK pada bibit kelapa sawit *pre-nursery* tidak selalu memberikan pengaruh nyata pada seluruh parameter pertumbuhan, tetapi konsentrasi *ecoenzyme* tertentu cenderung memberi respons lebih baik. Temuan tersebut menunjukkan bahwa *ecoenzyme* sebagai input organik cair memiliki efek yang bersifat kontekstual dan tidak dapat dipisahkan dari dosis, frekuensi aplikasi, serta sumber hara pendamping.

### ***Azolla* sebagai Pupuk Organik dan Biofertilizer**

*Azolla* merupakan tumbuhan paku air yang banyak dikaji sebagai pupuk organik dan biofertilizer karena kemampuannya bersimbiosis dengan sianobakteri penambat nitrogen. Simbiosis ini memungkinkan *Azolla* menyumbangkan nitrogen biologis ke sistem pertanian, sehingga berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap pupuk nitrogen anorganik. Kajian terbaru menegaskan bahwa *Azolla* memiliki peran penting dalam pertanian berkelanjutan karena pertumbuhannya cepat, kandungan biomasnya tinggi, dan potensinya sebagai sumber hara organik, terutama nitrogen.

Sebagai biofertilizer, *Azolla* banyak digunakan dalam sistem sawah karena mampu menyumbang nitrogen, meningkatkan bahan organik tanah, menekan kehilangan nitrogen, serta mendukung efisiensi pupuk anorganik. Yao dkk. (2018) melaporkan bahwa *Azolla* mampu menambat sekitar 44–52 kg N ha<sup>-1</sup> per musim tanam, meningkatkan hasil padi 8–14%, serta menurunkan kehilangan nitrogen melalui volatilisasi dan kehilangan N bertanda isotop. Meskipun penelitian tersebut dilakukan pada padi sawah, temuan ini penting sebagai dasar bahwa *Azolla* berperan bukan hanya sebagai sumber N, tetapi juga sebagai pengatur dinamika N dalam sistem tanah–tanaman.

Selain sebagai sumber nitrogen, *Azolla* juga mengandung unsur hara lain dan bahan organik yang berperan memperbaiki kesuburan tanah. Korsa dkk. (2024) menyebutkan bahwa *Azolla* dimanfaatkan dalam berbagai bidang, termasuk sebagai biofertilizer, pakan ternak, pengendali gulma dan nyamuk, serta bahan pendukung sistem pertanian terpadu. Hal ini menunjukkan bahwa fungsi *Azolla* tidak terbatas pada penyediaan N, tetapi juga mencakup kontribusi terhadap siklus hara dan peningkatan bahan organik tanah.

Dalam bentuk segar, kompos, maupun ekstrak, *Azolla* berpotensi mendukung pertumbuhan tanaman melalui penyediaan hara dan perbaikan lingkungan perakaran. Studi pada tomat menunjukkan bahwa kombinasi *Azolla* dan pemupukan nitrogen memengaruhi karakter morfologi dan fisiologi tanaman, termasuk jumlah cabang, jumlah stomata, transpirasi, dan efisiensi penggunaan air. Temuan ini memperkuat bahwa *Azolla* dapat berperan sebagai input organik yang memengaruhi proses fisiologis tanaman, meskipun responsnya bergantung pada jenis tanaman, bentuk aplikasi, dan kombinasi dengan pupuk anorganik.

Penggunaan *Azolla* juga relevan dalam konteks pengurangan pupuk anorganik. Aplikasi ekstrak *Azolla* pada jagung manis dalam kondisi pengurangan nitrogen melaporkan bahwa ekstrak *Azolla* digunakan sebagai biofertilizer dan pupuk daun untuk mendukung pertumbuhan dan hasil. Walaupun berbeda komoditas, pendekatan tersebut selaras dengan konsep penelitian substitusi pupuk NPK, yaitu memanfaatkan *Azolla* sebagai sumber hara organik untuk mendukung pertumbuhan tanaman dengan input anorganik yang lebih rendah.

### ***Pemupukan Bibit Kelapa Sawit Pre-nursery***

Pembibitan *pre-nursery* merupakan fase awal yang menentukan mutu bibit kelapa sawit sebelum dipindahkan ke pembibitan utama. Pada fase ini, bibit masih memiliki sistem perakaran terbatas, volume media relatif kecil, dan kebutuhan hara mulai meningkat seiring pertumbuhan vegetatif. Oleh karena itu, pemupukan perlu diberikan secara tepat agar mendukung pembentukan tinggi tanaman, diameter batang, jumlah daun, serta akumulasi biomassa awal. Pupuk NPK banyak digunakan pada pembibitan kelapa sawit karena menyediakan unsur hara makro utama yang dibutuhkan untuk pertumbuhan vegetatif. Nitrogen berperan dalam pembentukan jaringan daun dan pertumbuhan tajuk, fosfor mendukung perkembangan akar dan proses transfer energi, sedangkan kalium berperan dalam pengaturan air, translokasi

asimilat, dan kekuatan jaringan tanaman. Pada fase *pre-nursery*, keseimbangan ketiga unsur tersebut penting karena bibit belum memiliki kapasitas perakaran yang luas untuk mengeksplorasi hara dari media tanam.

Namun, pemupukan anorganik pada media polibag memiliki keterbatasan. Pupuk NPK bersifat cepat larut sehingga hara dapat segera tersedia bagi tanaman, tetapi pada saat yang sama juga berpotensi mengalami kehilangan melalui pencucian, terutama karena media *pre-nursery* berukuran kecil dan sering disiram. Oleh sebab itu, strategi pemupukan yang mampu menyediakan hara secara lebih bertahap mulai banyak dikaji, termasuk penggunaan pupuk organik, pupuk hayati, pupuk organik cair, serta kombinasi bahan organik dengan NPK.

Adileksana dkk. (2020) melaporkan bahwa substitusi sebagian pupuk NPK dengan pupuk organik kotoran sapi dapat memengaruhi pertumbuhan bibit kelapa sawit pada tahap *pre-nursery* dan *main nursery*. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa integrasi pupuk organik dalam sistem pembibitan dapat menjadi pendekatan untuk mengurangi ketergantungan terhadap pupuk majemuk, sekaligus mendukung pertumbuhan bibit secara lebih berkelanjutan. Studi lain pada bibit kelapa sawit *pre-nursery* menunjukkan bahwa penggunaan *ecoenzyme* dan NPK tidak selalu memberikan respons yang seragam pada seluruh parameter pertumbuhan. Hastuti dan Titiaryanti (2022) melaporkan bahwa interaksi konsentrasi *ecoenzyme* dan dosis NPK tidak berpengaruh nyata terhadap beberapa parameter pertumbuhan bibit, meskipun konsentrasi tertentu menunjukkan kecenderungan respons yang lebih baik. Hal ini menunjukkan bahwa efektivitas input organik cair pada pembibitan kelapa sawit sangat dipengaruhi oleh konsentrasi, dosis pupuk pendamping, dan lama aplikasi. Sipayung dkk. (2023) juga melaporkan bahwa konsentrasi dan cara aplikasi *ecoenzyme* pada bibit kelapa sawit *pre-nursery* tidak selalu memberikan pengaruh nyata terhadap seluruh parameter pertumbuhan, namun parameter tinggi tanaman dapat menunjukkan respons terhadap perlakuan tertentu.

## METODOLOGI

Penelitian telah dilaksanakan di lahan percobaan Institut Teknologi Sawit Indonesia yang berada di Kecamatan Medan Estate, Sumatera Utara, pada longitude 3,61 LU, 98,71 BT. Identifikasi mikroba pupuk organik cair dilakukan di Laboratorium Mikrobiologi Fakultas MIPA, USU. Uji karakteristik pupuk organik cair dan tanah dilakukan di *Analytical Laboratory*, PT. Socfindo.

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini yakni tanah, air, polybag ukuran 22 x 14 cm, bibit kelapa sawit varietas D x P Simalungun umur 1 bulan sejumlah 48 bibit, *Azolla* segar 3 Kg, *ecoenzyme* 1,5 L, pupuk NPK 15-15-6-4, larutan Standar Bray II, aquades,  $K_2Cr_2O_7$  1 N,  $H_2SO_4$  pekat, larutan standar 5.000 ppm C, KCl 1 M, larutan buffer pH 7 dan pH 4 serta campuran selenium.

Pembuatan *ecoenzyme* diawali dengan mengumpulkan kulit buah-buahan yaitu buah naga, jeruk dan pisang sebanyak 3 Kg, bahan-bahan dihaluskan kemudian dimasukkan kedalam wadah tertutup. Selanjutnya, ditambahkan gula merah 1 Kg dan air 10 liter, seluruh bahan diaduk hingga rata lalu ditutup rapat dan didiamkan selama 100 hari. Setelah inkubasi 100 hari, *ecoenzyme* siap digunakan. Sedangkan pembuatan ekstrak *Azolla* diawali dengan menyiapkan *Azolla* segar sebanyak 3 Kg, *Azolla* dikeringkan kemudian digerus hingga halus. *Azolla* yang telah halus ditimbang 2 Kg, dimasukkan kedalam jerigen kapasitas 5 L, kemudian ditambahkan air 2 L. Jerigen ditutup rapat dan didiamkan selama 1 bulan, kemudian disaring dan hasil penyaringan siap digunakan.

Penelitian disusun menggunakan rancangan acak lengkap non faktorial dengan 4 replikasi, taraf perlakuan terdiri dari  $M_0$  (Kontrol ; pupuk NPK 15-15-6-4),  $M_1$  (*ecoenzyme* 2 mL  $L^{-1}$  air + ekstrak *Azolla* 20 mL diaplikasikan setiap hari),  $M_2$  (*ecoenzyme* 2 mL  $L^{-1}$  air + ekstrak *Azolla* 40 mL diaplikasikan 1 kali dalam 3 hari),  $M_3$  (*ecoenzyme* 2 mL  $L^{-1}$  air + ekstrak *Azolla* 60 mL diaplikasikan 1 kali dalam 7 hari).

Penanaman bibit berumur 4 minggu ditanam pada polybag hitam berukuran 22x14 cm kapasitas  $\pm$  1 Kg tanah dengan cara membuat lubang tanam pada bagian tengah sedalam 2 cm, bibit ditanam kemudian ditimbun kembali dengan tanah. Bibit disiram hingga tanah lembab. Selanjutnya dilakukan pengaplikasian berdasarkan perlakuan yang telah disusun, yaitu perlakuan  $M_0$  (Kontrol), tanaman dipupuk setiap 2 minggu dengan NPK 15-15-6-4 dosis 3 gram  $pokok^{-1}$  hingga bibit berumur 10 minggu, pemupukan selanjutnya dengan dosis 5 gram  $pokok^{-1}$  dilakukan hingga bibit berumur 14 minggu.

Bibit disiram setiap hari, dua kali sehari pada pagi dan sore sebanyak 1 L, penyiraman tidak dilakukan apabila hari hujan atau tanah masih lembab. Penyiraman demikian dilakukan pada perlakuan M0 sampai bibit berumur 14 minggu.

Perlakuan M1 (*ecoenzyme* 2 mL L<sup>-1</sup> air + ekstrak *Azolla* 20 mL diaplikasikan setiap hari) disiapkan dengan cara menakar 2 mL *ecoenzyme* lalu dimasukkan kedalam wadah berisi air 1 L, diaduk rata, kemudian ditambahkan 20 mL ekstrak *Azolla*, diaduk kembali sampai rata. Campuran dapat diaplikasikan dengan cara menyiramkan pada media tanam pada pagi hari dan sore hari dengan komposisi 50% pagi : 50% sore. Penyiraman bibit sesuai perlakuan M1 dilakukan hingga bibit berumur 14 minggu. Pada perlakuan ini tidak lagi melakukan penyiraman dengan air biasa karena telah disubstitusi dengan pupuk organik. Perlakuan M2 dan M3 dilakukan dengan cara yang sama seperti perlakuan M1, perbedaan terletak pada dosis ekstrak *Azolla* dan frekuensi pengaplikasiannya. Pada perlakuan M1, M2, dan M3 tidak diberikan pupuk NPK, sehingga perlakuan tersebut merepresentasikan substitusi penuh pupuk anorganik dengan kombinasi eco-enzyme dan ekstrak *Azolla*.

Variabel yang diamati mencakup: tinggi bibit, diameter batang, bobot basah dan bobot kering tanaman. Sebagai data pendukung mekanisme hara, beberapa sifat kimia tanah dianalisis yakni kadar N<sub>-total</sub> metode Kjeldahl, P<sub>-tersedia</sub> metode Bray-II, kadar C<sub>-organik</sub> metode Walkley and Black, dan pH tanah metode elektrometri.

Data dianalisis dengan One Way ANOVA menggunakan SPSS v25. Apabila menunjukkan pengaruh nyata, dilanjutkan dengan uji Duncan Multiple Range Test (DMRT).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### *Karakteristik Ecoenzyme dan Ekstrak Azolla*

Tabel 1 menyajikan hasil analisis laboratorium karakteristik *ecoenzyme* dan ekstrak *Azolla* yang digunakan sebagai bahan substitusi pupuk NPK pada penelitian ini. Parameter yang dianalisis meliputi reaksi larutan (pH), kandungan C-organik, N total, P total, serta mikroorganisme terdeteksi.

Tabel 1. Karakteristik *ecoenzyme* dan ekstrak *Azolla*

Parameter	<i>Ecoenzyme</i>	Ekstrak <i>Azolla</i>
pH	± 8,5	± 6,9
C-organik (%)	2,32	3,58
N total (%)	1,40	1,56
P total (%)	16,48	19,20
Mikroorganisme terdeteksi	<i>Enterobacter</i> sp., <i>Candida</i> sp.	-

Sumber: data primer hasil analisis laboratorium

Hasil analisis laboratorium menunjukkan bahwa *ecoenzyme* dan ekstrak *Azolla* memiliki karakteristik kimia dan biologis yang mendukung potensinya sebagai bahan substitusi pupuk NPK pada fase pembibitan kelapa sawit. *Ecoenzyme* memiliki pH relatif alkalis (±8,5), sedangkan ekstrak *Azolla* memiliki pH mendekati netral (±6,9). Perbedaan karakter reaksi tersebut mengindikasikan bahwa campuran kedua bahan berpotensi menstabilkan reaksi larutan aplikasi maupun media tanam ketika diaplikasikan secara bersamaan.

Kandungan C-organik pada *ecoenzyme* dan ekstrak *Azolla* tergolong tinggi, masing-masing berada pada kisaran 2,32–3,58%. Kandungan karbon organik tersebut berperan sebagai sumber energi bagi mikroorganisme serta mendukung proses mineralisasi hara setelah aplikasi ke media tanam. Selain itu, kandungan N total pada kedua bahan relatif tinggi, berkisar antara 1,40–1,56%, yang menunjukkan potensi keduanya sebagai sumber nitrogen organik bagi tanaman, sedangkan kandungan P-total pada *ecoenzyme* dan ekstrak *Azolla* juga tergolong tinggi, yaitu pada kisaran 16,48–19,20%. Nilai ini menunjukkan bahwa kedua bahan memiliki potensi sebagai sumber fosfor.

Hasil analisis mikrobiologi pada *ecoenzyme* menunjukkan keberadaan mikroorganisme fermentatif, antara lain bakteri dari genus *Enterobacter* serta khamir (*Candida* sp.). Beberapa anggota genus *Enterobacter* dilaporkan memiliki kemampuan melarutkan fosfat dan mendukung pertumbuhan tanaman melalui mekanisme tidak langsung. Namun

demikian, karena identifikasi mikroorganisme dalam penelitian ini masih terbatas pada tingkat genus, kontribusi fungsionalnya lebih tepat diposisikan sebagai indikasi potensi biologis bahan input yang memerlukan kajian lanjutan (Zainuddin dkk., 2022). Kandungan C-organik yang relatif tinggi berpotensi meningkatkan aktivitas mikroba tanah dan memperbaiki dinamika siklus hara, sehingga mendukung efisiensi pemanfaatan hara oleh tanaman (Bünemann dkk., 2018). Keduanya berpotensi sebagai sumber hara organik dan pembenah lingkungan perakaran dibandingkan sebagai sumber hara mineral yang bersifat cepat tersedia.

### **Pertumbuhan Bibit Kelapa Sawit**

Pertumbuhan bibit kelapa sawit yang diamati melalui parameter tinggi tanaman, diameter batang, dan jumlah daun menunjukkan respon yang berbeda antar parameter, namun secara keseluruhan membentuk pola pertumbuhan vegetatif yang saling berkaitan. Berdasarkan data rata-rata yang disertai notasi uji Duncan pada Tabel 2, pengaruh perlakuan terhadap pertumbuhan bibit mulai terlihat seiring bertambahnya umur tanaman, terutama pada parameter tinggi bibit dan diameter batang.

Tabel 2. Rataan tinggi bibit, diameter batang dan jumlah daun bibit kelapa sawit

Perlakuan	Tinggi tanaman (cm) minggu ke-						
	4	6	8	10	12	14	16
M0	6,30a	9,13a	13,07a	16,07a	18,74a	20,88a	23,00a
M1	6,41a	9,98b	13,29a	16,29a	21,12b	24,24b	26,28b
M2	6,66a	9,56ab	13,47a	16,47a	20,60b	24,65b	27,01c
M3	6,66a	9,16a	13,45a	16,45a	20,68b	24,80b	27,10c
Perlakuan	Diameter batang (cm) minggu ke-						
	4	6	8	10	12	14	16
M0	2a	2,4a	2,91ab	3,42a	4,53a	5,81a	6,61a
M1	2a	2,4a	3,08bc	4,65c	5,53b	6,75c	7,28b
M2	2a	2,4a	3,19c	4,40bc	4,69a	6,15b	7,10b
M3	2a	2,4a	2,82a	4,08b	4,85a	6,71c	7,71c
Perlakuan	Jumlah daun (helai) minggu ke-						
	4	6	8	10	12	14	16
M0	1,00	2,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00
M1	1,00	2,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00
M2	1,00	2,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00
M3	1,00	2,00	2,00	3,00	3,92	5,00	6,00

Keterangan: Nilai rata-rata yang diikuti oleh huruf yang sama pada kolom yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata menurut uji DMRT pada taraf 5%

Pada parameter tinggi bibit, perbedaan antar perlakuan belum terlihat secara konsisten pada fase awal pertumbuhan. Pada umur 6 minggu setelah tanam, perlakuan M1 menghasilkan tinggi bibit yang lebih tinggi dibandingkan kontrol (M0), sedangkan perlakuan M2 berada pada kelompok antara. Namun, pada umur 8 dan 10 minggu, seluruh perlakuan berada pada kelompok yang sama berdasarkan uji Duncan, yang menunjukkan bahwa respon tinggi bibit pada fase awal masih relatif seragam. Perbedaan yang lebih jelas mulai terlihat pada umur 12 hingga 16 minggu, di mana perlakuan substitusi pupuk NPK dengan campuran *ecoenzyme*-ekstrak *Azolla* (M1, M2, dan M3) menghasilkan tinggi bibit yang secara statistik lebih tinggi dibandingkan kontrol. Pada umur 16 minggu, perlakuan M2 dan M3 menunjukkan tinggi bibit tertinggi dan berbeda nyata dibandingkan M0. Hal ini menunjukkan bahwa efek perlakuan bersifat akumulatif dan semakin nyata seiring bertambahnya umur bibit.

Respon yang lebih sensitif ditunjukkan oleh parameter diameter batang. Berdasarkan notasi Duncan, perbedaan diameter batang antar perlakuan mulai tampak pada umur 8 minggu dan semakin konsisten hingga akhir pengamatan. Perlakuan substitusi pupuk NPK 15-15-6-4 dengan campuran *ecoenzyme*-ekstrak *Azolla* menghasilkan diameter batang yang lebih besar dibandingkan kontrol, dengan perlakuan M3 menunjukkan diameter batang tertinggi pada umur 16 minggu. Diameter batang merupakan indikator penting vigor bibit kelapa sawit karena berkaitan dengan pembentukan jaringan struktural serta kapasitas tanaman dalam menopang pertumbuhan tajuk dan sistem perakaran pada fase selanjutnya

(Corley & Tinker, 2016). Oleh karena itu, peningkatan diameter batang pada perlakuan substitusi mencerminkan kualitas pertumbuhan bibit yang lebih baik dibandingkan perlakuan NPK 15-15-6-4.

Berbeda dengan tinggi bibit dan diameter batang, jumlah daun relatif tidak menunjukkan perbedaan nyata antar perlakuan sepanjang periode pengamatan. Seluruh perlakuan menunjukkan pola penambahan daun yang seragam, dari satu helai pada umur 4 minggu hingga enam helai pada umur 16 minggu. Pada umur 12 minggu, perlakuan M3 menunjukkan nilai jumlah daun sedikit lebih rendah secara numerik, namun perbedaan tersebut tidak berlanjut pada pengamatan berikutnya. Hal ini menunjukkan bahwa pembentukan daun pada fase *pre-nursery* lebih dipengaruhi oleh tahapan perkembangan fisiologis bibit dibandingkan oleh variasi sumber dan frekuensi aplikasi pupuk. Fenomena ini sejalan dengan konsep bahwa jumlah daun pada fase awal tanaman tahunan bersifat stabil dan kurang responsif terhadap perubahan input hara jangka pendek (Taiz dkk., 2015).

Pola respon pertumbuhan bibit kelapa sawit terjadi secara bertahap, pada perlakuan substitusi menunjukkan perbedaan mekanisme kerja antara pupuk anorganik dan pupuk berbasis bahan organik cair. Pupuk NPK sebagai pupuk anorganik bersifat mudah larut (*quick release*), sehingga hara tersedia dalam jumlah tinggi pada awal aplikasi, namun berpotensi mengalami penurunan ketersediaan yang cepat akibat pencucian atau fiksasi dalam media tanam. Kondisi ini menjelaskan mengapa pada perlakuan kontrol peningkatan cadangan hara tanah tidak selalu diikuti oleh peningkatan vigor pertumbuhan bibit pada fase lanjut. Sebaliknya, campuran *ecoenzyme*-ekstrak *Azolla* mengandung bahan organik dan senyawa hasil fermentasi yang berperan dalam menyediakan hara secara bertahap. Kondisi ini mendorong suplai hara yang lebih stabil seiring pertumbuhan sistem perakaran bibit, sehingga respon pertumbuhan, khususnya pada tinggi tanaman dan diameter batang, menjadi lebih nyata pada umur tanaman 12-16 minggu. Mekanisme pelepasan hara secara berangsur tersebut sejalan dengan konsep pemupukan organik yang menekankan efisiensi pemanfaatan hara dan perbaikan lingkungan perakaran dibandingkan lonjakan ketersediaan hara dalam jangka pendek (Brady & Weil, 2017).

Secara keseluruhan, respon pertumbuhan bibit kelapa sawit menunjukkan bahwa substitusi pupuk NPK dengan campuran *ecoenzyme*-ekstrak *Azolla* melalui pengaturan frekuensi aplikasi mampu meningkatkan pertumbuhan vegetatif bibit, terutama pada tinggi tanaman dan diameter batang. Respon yang muncul secara bertahap dan semakin nyata pada umur tanaman 12 minggu mencerminkan sistem pemupukan yang mendukung pertumbuhan bibit secara seimbang dan berkelanjutan pada fase *pre-nursery*, tanpa mengganggu proses morfogenesis dasar yang tercermin dari stabilitas jumlah daun.

### ***Biomassa Bibit Kelapa Sawit***

Biomassa tanaman yang diukur melalui bobot basah (BB) dan bobot kering (BK) memberikan gambaran integratif terhadap akumulasi hasil fotosintesis dan efektivitas pemanfaatan hara selama fase *pre-nursery*. Berdasarkan hasil uji lanjut Duncan pada Tabel 3, perlakuan substitusi pupuk NPK dengan campuran *ecoenzyme*-ekstrak *Azolla* menghasilkan biomassa yang lebih tinggi dibandingkan kontrol NPK. Nilai BB pada kontrol (M0) sebesar 3,35 berada pada kelompok yang berbeda nyata (a) dibandingkan seluruh perlakuan substitusi (M1–M3) yang berada pada kelompok (b) dengan rentang 5,67–5,90. Pola serupa juga terlihat pada BK, di mana M0 (0,67; a) lebih rendah dan berbeda nyata dibandingkan M1–M3 (1,15–1,27; b). Hal ini menunjukkan bahwa substitusi pupuk NPK berbasis *ecoenzyme*-ekstrak *Azolla* mampu meningkatkan akumulasi biomassa bibit secara konsisten.

Tabel 3. Biomassa Bibit Kelapa Sawit

Parameter	Perlakuan			
	M0	M1	M2	M3
Bobot basah (gram)	3,35a	5,9b	5,7b	5,67b
Bobot kering (gram)	0,67a	1,27b	1,15b	1,17b

Keterangan: Nilai rata-rata yang diikuti oleh huruf yang sama pada kolom yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata menurut uji DMRT pada taraf 5%

Peningkatan bobot basah dan bobot kering bibit kelapa sawit pada perlakuan substitusi menunjukkan bahwa keberhasilan pertumbuhan tidak hanya ditentukan oleh besarnya cadangan hara yang terukur di dalam tanah, tetapi juga oleh efisiensi pemanfaatan hara oleh tanaman. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian pada bibit *Phoebe bournei* yang menunjukkan bahwa akumulasi biomassa meningkat pada pemupukan N, P, dan K yang seimbang dan berada pada taraf optimum, sedangkan peningkatan dosis yang berlebihan tidak lagi meningkatkan biomassa secara efektif. Pada penelitian tersebut, nitrogen berperan dominan terhadap biomassa total, fosfor mendukung pertumbuhan batang, dan kalium berkontribusi pada translokasi hara serta pertumbuhan organ vegetatif. Dengan demikian, biomassa bibit yang lebih tinggi pada perlakuan *ecoenzyme*-ekstrak *Azolla* dalam penelitian ini mengindikasikan bahwa sistem substitusi pupuk bekerja melalui

penyediaan hara yang lebih efisien dan bertahap, sehingga lebih banyak asimilat dapat dialokasikan menjadi bahan kering tanaman (Z. Yang dkk., 2021)

Secara mekanistik, biomassa yang lebih tinggi pada perlakuan substitusi dapat dijelaskan melalui karakter pemupukan berbasis bahan organik cair yang cenderung menyediakan hara secara bertahap dan memperbaiki lingkungan perakaran. Pendekatan biofertilizer/organik yang terintegrasi juga banyak dilaporkan meningkatkan pertumbuhan vegetatif serta bobot basah dan bobot kering pada kelapa sawit melalui perbaikan status hara dan dinamika mikroba tanah dibandingkan pemupukan kimia penuh (Zainuddin dkk., 2022). Selain itu, *Azolla* dikenal sebagai sumber bahan organik dan N biologis dalam sistem pertanian, serta berpotensi memperbaiki efisiensi pemanfaatan N dan mendukung siklus hara ketika diaplikasikan sebagai biofertilizer (Chanapanchai dkk., 2025; Y. Yang dkk., 2025). Pada penelitian ini, perbedaan biomassa yang nyata pada perlakuan substitusi mengindikasikan bahwa campuran *ecoenzyme*–ekstrak *Azolla* berperan dalam meningkatkan efisiensi pemanfaatan hara sehingga lebih banyak asimilat terakumulasi menjadi biomassa.

Hasil biomassa juga konsisten dengan konsep bahwa pemupukan kimia yang bersifat cepat larut (*quick release*) dapat meningkatkan ketersediaan hara pada awal aplikasi, tetapi sebagian hara berpotensi hilang melalui pencucian, volatilisasi, atau terfiksasi, sehingga tidak seluruhnya dimanfaatkan menjadi biomassa. Sebaliknya, input organik dan biofertilizer cenderung mendukung ketersediaan hara yang lebih stabil, memperbaiki kesehatan tanah, dan meningkatkan efisiensi serapan hara dalam jangka menengah, sehingga biomassa meningkat meskipun tidak selalu disertai lonjakan stok hara tanah (Zainuddin dkk., 2022). Temuan ini sejalan dengan kecenderungan pada berbagai sistem substitusi pupuk, di mana kombinasi input organik/biofertilizer dapat menjaga suplai hara dan memperkuat pertumbuhan tanaman secara berkelanjutan.

Secara keseluruhan, biomassa bibit (BB dan BK) menegaskan bahwa substitusi pupuk NPK dengan *ecoenzyme*–ekstrak *Azolla* melalui pengaturan frekuensi aplikasi mampu meningkatkan akumulasi biomassa bibit kelapa sawit pada fase *pre-nursery*. Perbedaan respon antar perlakuan substitusi juga mengindikasikan bahwa frekuensi aplikasi berperan dalam mengatur keseimbangan suplai hara dan adaptasi sistem perakaran bibit, di mana interval aplikasi yang lebih jarang namun teratur cenderung memberikan respon pertumbuhan yang stabil pada fase lanjut. Karena biomassa merupakan indikator akhir yang mengintegrasikan respons pertumbuhan dan status hara, hasil ini memperkuat implikasi praktis bahwa pendekatan substitusi pupuk dapat menjadi strategi pemupukan alternatif yang efektif, terutama untuk meningkatkan vigor bibit tanpa ketergantungan penuh pada pupuk anorganik.

### Karakteristik Kimia Tanah

Tabel berikut menyajikan hasil analisis laboratorium sifat kimia tanah sebelum dan sesudah perlakuan substitusi pupuk NPK dengan campuran *ecoenzyme*–ekstrak *Azolla*. Parameter yang diamati meliputi P-tersedia, C-organik, pH tanah, dan N total. Data disajikan sebagai nilai awal, nilai akhir setelah perlakuan, serta kecenderungan perubahan yang terjadi.

Tabel 4. Karakteristik kimia tanah

Parameter Kimia Tanah	Kondisi Awal	M0 (NPK)	M1 ( <i>Ecoenzyme</i> + <i>Azolla</i> , harian)	M2 ( <i>Ecoenzyme</i> + <i>Azolla</i> , 3 hari)	M3 ( <i>Ecoenzyme</i> + <i>Azolla</i> , 7 hari)
C-organik (%)	2,50	2,94	3,07	3,19	3,75
pH tanah	5,49	5,90	5,72	5,75	5,64
N total (%)	0,09	0,09	0,11	0,10	0,09
P-tersedia (%)	0,21	0,68	0,47	0,49	0,41

Sumber: data primer analisis laboratorium.

Kandungan P-tersedia tanah meningkat pada seluruh perlakuan dibandingkan kondisi awal. Peningkatan P-tersedia secara numerik paling tinggi dijumpai pada perlakuan kontrol NPK (M0), sedangkan perlakuan substitusi pupuk NPK dengan campuran *ecoenzyme*–ekstrak *Azolla* (M1, M2, dan M3) menunjukkan peningkatan P-tersedia yang lebih rendah dan relatif bervariasi antar ulangan. Namun demikian, peningkatan P-tersedia yang lebih tinggi pada perlakuan NPK tidak secara langsung diikuti oleh peningkatan biomassa dan vigor bibit tertinggi, sebagaimana tercermin pada parameter bobot

basah dan bobot kering tanaman. Hal ini menunjukkan bahwa akumulasi P dalam tanah tidak selalu berbanding lurus dengan pemanfaatannya oleh tanaman, terutama pada fase *pre-nursery*.

Kandungan C-organik tanah menunjukkan kecenderungan meningkat pada seluruh perlakuan, dengan peningkatan yang relatif lebih besar pada perlakuan substitusi dibandingkan kontrol. Masukan bahan organik cair dari campuran *ecoenzyme* dan ekstrak *Azolla* berkontribusi terhadap penambahan karbon organik tanah. Peningkatan C-organik berperan penting dalam memperbaiki kualitas lingkungan perakaran, termasuk kapasitas tukar kation, stabilitas agregat, dan retensi air, yang pada akhirnya dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan hara oleh tanaman (Sullivan & Moore, 2019)

Nilai pH tanah setelah perlakuan mengalami perubahan yang relatif kecil dan seluruh perlakuan masih berada pada kategori agak asam. Perubahan pH yang terbatas ini mengindikasikan bahwa aplikasi *ecoenzyme*–ekstrak *Azolla* maupun pupuk NPK dalam periode penelitian belum cukup kuat untuk mengubah reaksi tanah secara signifikan. Oleh karena itu, pH bukan faktor utama yang menjelaskan perbedaan respon pertumbuhan bibit antar perlakuan. Temuan ini sejalan dengan laporan bahwa perubahan pH tanah akibat aplikasi bahan organik cair umumnya bersifat moderat dan berlangsung dalam jangka waktu yang lebih panjang (Bünemann dkk., 2018).

Kandungan N total tanah tidak menunjukkan perbedaan nyata antar perlakuan dan relatif mendekati kondisi awal. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem substitusi pupuk NPK dengan campuran *ecoenzyme*–ekstrak *Azolla* tidak meningkatkan cadangan N total tanah dalam jangka pendek. Namun demikian, peningkatan biomassa bibit pada perlakuan substitusi mengindikasikan bahwa peran utama sistem pemupukan ini lebih berkaitan dengan peningkatan efisiensi pemanfaatan N dan dinamika siklus N di zona perakaran dibandingkan dengan akumulasi N total tanah (Zainuddin dkk., 2022).

#### ***Analisis Ekonomi Sederhana terhadap Potensi Substitusi Pupuk NPK dengan Campuran Ecoenzyme–Ekstrak Azolla***

Analisis ekonomi sederhana dilakukan untuk memperkuat nilai praktis penggunaan campuran *ecoenzyme*–ekstrak *Azolla* sebagai substitusi pupuk NPK pada pembibitan kelapa sawit *pre-nursery*. Analisis ini dibatasi pada perbandingan komponen input pemupukan berdasarkan perlakuan yang diuji, yaitu penggunaan pupuk NPK pada perlakuan kontrol dan penggunaan campuran *ecoenzyme*–ekstrak *Azolla* pada perlakuan substitusi. Pada perlakuan M1, M2, dan M3, pupuk NPK tidak diberikan sehingga terjadi penghilangan biaya pada komponen pupuk anorganik. Namun, perlakuan substitusi memerlukan bahan organik cair berupa *ecoenzyme* dan ekstrak *Azolla* serta tenaga aplikasi yang berbeda sesuai frekuensi pemberian.

Secara praktis, perlakuan M3 memiliki peluang ekonomi yang lebih baik dibandingkan M1 dan M2 karena diaplikasikan satu kali dalam tujuh hari, sehingga frekuensi aplikasi lebih rendah dibandingkan aplikasi harian pada M1 dan aplikasi tiga hari sekali pada M2. Dengan demikian, M3 tidak hanya menghilangkan kebutuhan NPK pada fase *pre-nursery*, tetapi juga menurunkan intensitas kerja pengaplikasian pupuk organik cair. Hasil pertumbuhan menunjukkan bahwa M3 tetap mampu menghasilkan tinggi bibit, diameter batang, dan biomassa yang lebih baik dibandingkan kontrol NPK. Oleh karena itu, M3 sebagai perlakuan substitusi yang paling prospektif secara teknis dan praktis. Namun demikian, analisis kelayakan ekonomi penuh masih perlu dilakukan dengan memasukkan harga aktual bahan, biaya tenaga kerja, biaya produksi *ecoenzyme*, biaya penyediaan *Azolla*, serta skala produksi bibit.

Tabel 5. Perbandingan Praktis Input Pemupukan pada Pembibitan Kelapa Sawit *Pre-nursery*

<b>Perlakuan</b>	<b>Input utama</b>	<b>Frekuensi aplikasi</b>	<b>Penggunaan NPK</b>	<b>Implikasi praktis</b>
M0	NPK 15-15-6-4	Setiap 2 minggu	Ada	Mebutuhkan pupuk anorganik sebagai input utama
M1	<i>Ecoenzyme</i> ekstrak <i>Azolla</i>	+ Setiap hari	Tidak ada	Menghilangkan NPK, tetapi frekuensi aplikasi tinggi
M2	<i>Ecoenzyme</i> ekstrak <i>Azolla</i>	+ Setiap 3 hari	Tidak ada	Menghilangkan NPK dengan frekuensi aplikasi sedang
M3	<i>Ecoenzyme</i> ekstrak <i>Azolla</i>	+ Setiap 7 hari	Tidak ada	Menghilangkan NPK dan memiliki frekuensi aplikasi paling rendah

Berdasarkan perbandingan tersebut, potensi penghematan utama pada perlakuan substitusi berasal dari penghilangan penggunaan pupuk NPK, sedangkan potensi efisiensi operasional paling besar terdapat pada perlakuan M3 karena frekuensi aplikasinya paling rendah. Namun, nilai penghematan biaya secara kuantitatif belum dapat dinyatakan sebagai keuntungan ekonomi bersih karena penelitian ini belum menghitung biaya produksi *ecoenzyme*, penyediaan *Azolla*, tenaga kerja, dan biaya aplikasi pada skala pembibitan komersial.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Penggunaan campuran *ecoenzyme* dan ekstrak *Azolla* sebagai substitusi pupuk NPK (15-15-6-4) dengan pengaturan frekuensi aplikasi mampu menghasilkan bibit kelapa sawit yang tumbuh lebih vigor pada fase *pre-nursery*, ditunjukkan oleh pertumbuhan tinggi tanaman, pembesaran diameter batang, dan peningkatan biomassa tanaman yang lebih baik dibandingkan pemupukan NPK. Perubahan sifat kimia tanah akibat perlakuan menunjukkan bahwa pupuk NPK meningkatkan P-tersedia tanah lebih tinggi dibandingkan perlakuan substitusi, namun peningkatan tersebut tidak secara langsung diikuti oleh peningkatan biomassa bibit tertinggi. Sebaliknya, perlakuan substitusi cenderung meningkatkan kandungan C-organik tanah, sementara pH dan N total tanah relatif stabil. Keberhasilan substitusi pupuk NPK berbasis *ecoenzyme*–ekstrak *Azolla* lebih berkaitan dengan peningkatan efisiensi pemanfaatan hara dan perbaikan kualitas lingkungan perakaran dibandingkan dengan akumulasi stok hara tanah dalam jangka pendek.

Penelitian lanjutan perlu dilakukan pada fase main nursery dan skala lapangan untuk mengevaluasi konsistensi respons bibit, efisiensi hara, serta kelayakan teknis dan kajian biaya yang komprehensif terhadap penggunaan *ecoenzyme*–ekstrak *Azolla* sebagai pengganti pupuk NPK.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adileksana, C., Yudono, P., Purwanto, B. H., & Wijoyo, R. B. (2020). Growth performance of oil palm seedlings at the pre-nursery and main nursery stages as a response to the substitution of NPK compound fertilizer and organic fertilizer. *Caraka Tani: Journal of Sustainable Agriculture*, 35(1), 89–97. <https://doi.org/10.20961/carakatani.v35i1.33884>
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (15th ed.). Pearson Education.
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., Deyn, G. De, Goede, R. De, Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., Willem, J., Groenigen, V., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120(February), 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Chanapanchai, S., Fitriya, W., Artadana, I. B. M., & Supaibulwatana, K. (2025). Important role and benefits of *Azolla* plants in the management of agroecosystem services, biodiversity, and sustainable rice production in Southeast Asia. *Journal of Integrative Agriculture*, 24(8), 3004–3023. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jia.2025.02.027>
- Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. (2016). *The Oil Palm* (Fifth Edit). Wiley Blackwell. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118953297.fmatt>
- Eshtiaghi, M. N., & Nakthong, N. (2020). Potential use of eco-enzyme for the treatment of metal based effluent. *The Third Bioprocessing and Biomanufacturing Symposium 2019*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/716/1/012016>
- Hasanah, Y., Mawarni, L., & Hanum, H. (2020). *Ecoenzyme* and its benefits for organic rice production and disinfectant. *Journal of Saintech Transfer*, III(2), 119–128. <https://doi.org/https://doi.org/10.32734/jst.v3i2.4519>
- Hastuti, P. B., & Titiaryanti, N. M. (2022). Respon pertumbuhan bibit kelapa sawit di pre-nursery dengan berbagai konsentrasi *ecoenzyme* dan dosis NPK. *Jurnal Pertanian Agros*, 24(2), 598–606.
- Irmansyah, T., Simangunsong, A. A., Sebayang, A., Girsang, S. S., & Lubis, D. S. (2024). Application of eco-enzyme solution as a multipurpose liquid fertilizer to enhance performance of sorghum varieties. *agriTECH*, 44(3), 189–196. <https://doi.org/10.22146/agritech.86048>.
- Korsa, G., Alemu, D., & Ayele, A. (2024). *Azolla* Plant Production and Their Potential Applications. *International Journal of Agronomy*, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/1716440>
- Murdiana, H. E., Yuhara, N. A., Rahmavika, T., Danila, D., Farmasi, F., & Kristen, U. (2022). Pelatihan pembuatan *ecoenzyme* dari Wisma Sukun. *Diseminasi : Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 4(1), 55–60.

- Narang, N., Hussain, A., & Madan, S. (2024). A comparative study on compost preparation using lab prepared eco-enzyme and its effect on growth of plant species *Phaseolus vulgaris*. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 36230–36240. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27168-x>
- Purba, J. H. V., & Sipayung, T. (2017). Perkebunan Kelapa Sawit Indonesia dalam Perspektif Pembangunan Berkelanjutan. *Jurnal Ilmu-Ilmu Sosial Indonesia*, 43(1), 81–94.
- Purwaningsih, O., Wahid, R. A. H., & Pamungkas, P. B. (2023). An enhancement of phytochemical content in red ginger (*Zingiber officinale* var. *Rubrum* rhizome) using *ecoenzyme*. *Applied Ecology and Environmental Research*, 21(6), 5453. [https://doi.org/doi.10.15666/aecer/2106\\_54535461](https://doi.org/doi.10.15666/aecer/2106_54535461)
- Sakiah, S., Setiawan, A., Sukariawan, A., Dibisono, M. Y., Nasution, A. P., Harahap, M. S., Nurhayati, E. S., Hanali, A., Kurniawan, D., & Nasution, T. R. (2024). Pemanfaatan bahan alami sebagai bahan baku pupuk dan pestisida guna meminimalisir penggunaan bahan kimia. *Dedikasi Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 1(2), 62–71. <https://www.ejurnal.itsi.ac.id/index.php/JAD/article/view/220>
- Sakiah, Tarigan, A. E., Tarigan, D. M., Nadeak, T., & Sijinjak, R. R. (2023). *Pupuk Organik Kompos* (1st ed.). UNPRI Press.
- Sipayung, D. A., Titiaryanti, N. M., Theresia, Y., & Astuti, M. (2023). Pengaruh Konsentrasi dan Cara Aplikasi *Ecoenzyme* terhadap Pertumbuhan Bibit Kelapa Sawit di Pre-nursery. *Agroforetech*, 1(1), 90–94.
- Sullivan, D. M., & Moore, A. (2019). *Soil organic matter as a soil health indicator: sampling, testing, and interpretation* (Issue December).
- Suyana, J., Sudadi, & Supriyadi. (2001). Laju Pertumbuhan dan Penambatan N<sub>2</sub> Azolla Pada Berbagai Intensitas Penyinaran dan Tinggi Genangan. *Sains Tanah: Journal of Soil Science and Agroclimatology*, 1(1), 17–24.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development* (6th ed.). Sinauer Associates.
- Yang, Y., Yang, Y., Deng, S., & Ying, Z. (2025). Role of Azolla in sustainable agriculture and climate resilience: a comprehensive review. *Front Plant Sci*, 14(16). <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1661720>.
- Yang, Z., Wu, X., Chen, L., Huang, L., Chen, Y., Wu, J., El-kassaby, Y. A., Grossnickle, S. C., & Feng, J. (2021). *Fertilization Regulates Accumulation and Allocation of Biomass and Nutrients in Phoebe bournei Seedlings*. 11(1187), 1–19. <https://doi.org/10.3390/agriculture11121187>
- Yao, Y., Zhang, M., Tian, Y., Zhao, M., Zeng, K., Zhang, B., Zhao, M., Yin, B., & Zhu, Z. (2018). Azolla biofertilizer for improving low nitrogen use efficiency in an intensive rice cropping system. *Field Crops Research*, 216, 158–164. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.11.020>.
- Zainuddin, N., Keni, M. F., Ibrahim, S. A. S., & Mohd, M. M. M. (2022). Effect of integrated biofertilizers with chemical fertilizers on the oil palm growth and soil microbial diversity. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 39(102237). <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102237>
- Zakarya, I. A., & Nakhirah, N. A. (2021). The Effect of Biofertilizer of Azolla , Phosphate and Nitrogen Fertilizers on some Growth Traits of Rice. *2nd Virtual International Scintific Agrticultural Conference*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/735/1/012064>