

EFFECT OF ECOENZYME WASTE APPLICATION ON THE GROWTH AND YIELD OF PAK CHOI (*BRASSICA RAPA L.*) USING AN ARDUINO UNO-BASED AUTOMATIC IRRIGATION SYSTEM

PENGARUH PEMBERIAN AMPAS ECOENZIM TERHADAP PERTUMBUHAN DAN PRODUKSI TANAMAN PAKCOY (*Brassica rapa L.*) MENGGUNAKAN SISTEM IRIGASI OTOMATIS BERBASIS ARDUINO UNO

Adam Chairul Anam¹, Purba Sanjaya^{1*}, dan Dermiyati¹

¹ Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Lampung, Bandar Lampung, Indonesia

Corresponding Author. E-mail address: p.sanjaya@fp.unila.ac.id

ABSTRACT

KEYWORDS:

Cocoa Seedling, liquid smoke, NPK fertilizer

KATA KUNCI:

Asap cair, bibit kakao, pupuk NPK kocor

*This study aimed to evaluate the effect of ecoenzyme waste application on the growth and yield of pak choy (*Brassica rapa L.*) cultivated under an Arduino Uno-based automatic irrigation system. The experiment was conducted at the Integrated Field Laboratory, Faculty of Agriculture, University of Lampung, from April 16 to June 16, 2024. A Randomized Block Design (RBD) was employed with four ecoenzyme waste dosages (0, 10, 20, and 30 tons·ha⁻¹) and four replications. The results demonstrated that ecoenzyme waste application produced varying effects on plant growth and production. The control treatment (0 tons·ha⁻¹) exhibited superior vegetative growth compared to treatments receiving ecoenzyme waste. However, the 30 tons·ha⁻¹ dosage maintained soil moisture content more effectively than the untreated medium. These findings suggest that ecoenzyme waste can contribute to improving soil water retention and irrigation efficiency, offering potential for sustainable organic material utilization in vegetable production systems.*

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh pemberian ampas ecoenzim terhadap pertumbuhan dan kualitas tanaman pakcoy (*Brassica rapa L.*) dengan menggunakan sistem irigasi otomatis berbasis Arduino Uno. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Lapangan Terpadu, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung, dari tanggal 16 April hingga 16 Juni 2024. Metodologi yang diterapkan yaitu Rancangan Acak Kelompok (RAK) dengan empat taraf dosis ampas ecoenzim (kontrol, 10 ton·ha⁻¹, 20 ton·ha⁻¹, dan 30 ton·ha⁻¹) serta empat kali ulangan. Temuan penelitian mengungkap bahwa perlakuan dengan ampas ecoenzim memberikan respons yang bervariasi terhadap pertumbuhan pakcoy. Perlakuan kontrol tanpa ampas ecoenzim menunjukkan pertumbuhan vegetatif yang lebih baik dibandingkan perlakuan dengan ampas ecoenzim. Penambahan ampas ecoenzim dengan dosis 30 ton·ha⁻¹ mampu mempertahankan kadar air tanah lebih baik dibandingkan media tanam tanpa ecoenzim. Penelitian ini mengindikasikan bahwa penggunaan ampas ecoenzim dapat menjadi solusi inovatif untuk meningkatkan kualitas dan efisiensi penggunaan air dalam budidaya pakcoy, serta merangsang penelitian lebih lanjut terkait optimalisasi penggunaan bahan organik dalam pertanian berkelanjutan.

1. PENDAHULUAN

Pakcoy (*Brassica rapa L.*), sebagai anggota famili *Brassicaceae*, memiliki keunggulan pada hal adaptasi lingkungan. Tanaman ini mampu tumbuh subur di berbagai kondisi, baik di dataran rendah ataupun tinggi, asalkan mendapatkasupan sinar matahari yang cukup (Edi, 2010). Dengan siklus hidup yang relatif singkat, yaitu sekitar 40–50 hari setelah tanam, serta kemampuannya beradaptasi terhadap berbagai kondisi cuaca dan serangan hama (Wahyuningsih dkk, 2016), pakcoy menjadi komoditas yang menarik bagi petani. Selain itu, tingginya nilai ekonomi serta permintaan pasar yang signifikan terhadap pakcoy semakin mendorong pengembangannya dalam sektor pertanian (Nurhasanah dkk., 2015). Keunggulan-keunggulan inilah yang menjadikan pakcoy sebagai salah satu komoditas hortikultura yang penting. Menurut BPS (2024), produktivitas pakcoy pada tahun 2023 di Indonesia sebanyak 686.876 ton.

Kekurangan bahan organik dalam media tanam menjadi kendala utama dalam budidaya pakcoy, karena berpengaruh terhadap sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Tanah dengan kadar materi organik yang minim cenderung semakin memadat dan mempunyai daya infiltrasi air yang rendah, sehingga kurang mendukung perkembangan akar tanaman (Agustina dkk., 2015). Kondisi ini berdampak negatif terhadap keberadaan nutrisi esensial yang diperlukan untuk proses pertumbuhan tanaman, menyebabkan keterbatasan dalam penyerapan nutrisi yang esensial bagi perkembangan vegetatif pakcoy. Selain itu, keterbatasan bahan organik juga dapat menurunkan fungsi mikroba tanah yang terlibat pada siklus hara, sehingga keseimbangan ekosistem tanah terganggu. Aplikasi pupuk organik merupakan salah satu alternatif dalam meningkatkan mutu tanah, sebab mampu memperbaiki karakteristik fisik, kimiawi, dan biologis tanah (Prizal & Nurbaiti, 2017). Pupuk organik berfungsi dalam memperbaiki kemampuan tanah menahan air serta menyuplai unsur hara, sehingga dapat mendukung pertumbuhan akar dan bagian vegetatif tanaman dengan lebih optimal. Dengan demikian, tanaman pakcoy yang ditanam dalam media yang kaya bahan organik lebih mampu beradaptasi terhadap cekaman lingkungan, seperti kekeringan, serta menunjukkan daya hasil yang lebih besar dibandingkan dengan tanaman yang berkembang pada lahan dengan kadar bahan organik yang rendah.

Kekurangan air menjadi salah satu hambatan pokok dalam kultivasi pakcoy, khususnya pada wilayah yang mengalami keterbatasan ketersediaan sumber daya air. Media tanam yang ideal bagi pertumbuhan dan perkembangan tanaman sebaiknya berada dalam kondisi kapasitas lapang, yaitu keadaan di mana media tanam cukup lembap dan mampu menahan jumlah air terbanyak yang tersedia bagi tanaman (Perwitasari dkk., 2012). Kondisi ini penting untuk memastikan bahwa tanaman memperoleh pasokan air yang memadai guna mendukung proses pertumbuhan tanaman pakcoy. Jika ketersediaan air dalam media tanam tidak mencukupi, tanaman pakcoy dapat mengalami stres fisiologis yang berujung pada gangguan metabolisme, seperti penurunan laju fotosintesis dan transpirasi. Akibatnya, pertumbuhan tanaman menjadi terhambat sehingga produktivitasnya pun menurun secara signifikan.

Ampas ecoenzim, sebagai produk sampingan dari fermentasi sampah organik, memiliki potensi besar dalam pertanian berkelanjutan. Penelitian Smith dkk. (2020) menunjukkan bahwa ampas ini mengandung enzim yang bermanfaat, sementara menurut Paendong dkk. (2023), andungan hara yang dimilikinya dapat memperbaiki kesuburan tanah melalui penyediaan unsur hara penting. Selain meningkatkan struktur tanah, porositas, dan kemampuan menahan air, ampas ecoenzim juga berkontribusi dalam menunjang populasi mikroorganisme tanah yang berfungsi menguraikan bahan organik. Meskipun berpotensi meningkatkan produktivitas dan menjaga kelestarian lingkungan, pemanfaatannya masih terbatas sehingga diperlukan upaya guna meningkatkan kesadaran masyarakat terhadap manfaatnya.

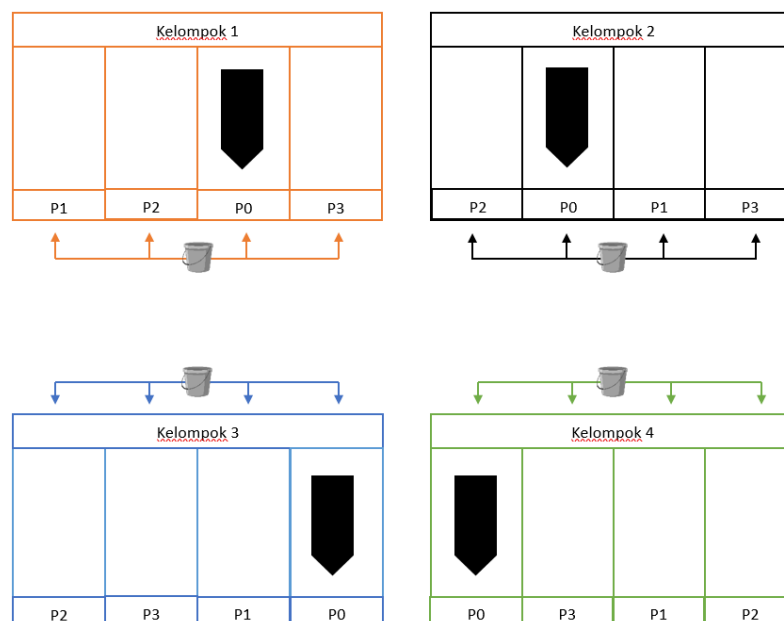
Pemanfaatan sensor kelembapan tanah membutuhkan piranti pengendali seperti mikrokontroler Arduino berbasis IoT (Pambudi dkk., 2020). Kombinasi Arduino Uno dengan sensor kelembapan tanah memungkinkan penyaluran irigasi berjalan otomatis sekaligus tepat. Kajian ini bertujuan menilai pertumbuhan tanaman pakcoy pada beragam taraf pengairan yang diatur secara presisi. Implementasi IoT (*Internet of Things*) diharapkan mampu meningkatkan efektivitas pemakaian air sekaligus mempermudah aktivitas petani. Dalam praktik budidaya pakcoy, kelembapan tanah pada kapasitas lapang ideal berada dalam rentang 50%–70% (Hadisuwito, 2015), yang esensial bagi produktivitas optimal serta efisiensi penggunaan air (Husdi, 2018). Tingkat kelembapan tersebut dapat diawasi menggunakan sensor soil moisture yang merekam serta menampilkan kondisi tanah melalui monitor komputer.

2. BAHAN DAN METODE

Alat yang digunakan dalam riset ini meliputi adaptor, wadah persemaian, penyemprot, peralatan tulis, instrumen pengukur kelembapan tanah, Arduino Uno, papan sirkuit, cangkul, ember, kabel serabut, kabel jumper, kotak pelindung perangkat, komputer jinjing, mikroskop, penggaris ukur, baki, obeng tespen (+/-), oven, pipa berdiameter ½ inci, pisau tipis/cutter, pompa, relay, selang air, solder, spidol, selang berdiameter ¼ inci, stapler, pencatat data (data logger), timbangan digital, dan terminal listrik. Material yang digunakan dalam riset ini meliputi air, tanah, residu ecoenzim, arang sekam, benih pakcoy, perekat lakban, isolasi, lem tembak, staples tembak, paku, tali rafia, papan kayu, serta plastik UV.

Penelitian dijalankan di Laboratorium Lapangan Terpadu, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung, Bandar Lampung., dari 16 April-16 Juni 2024 dengan spesifik lokasi 05°22' LS dan 105°14' BT, pada ketinggian 148 m dpl. Penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Kelompok (RAK) dengan satu faktor perlakuan berupa pemberian ampas ecoenzim yang terdiri atas empat taraf, yaitu P0 (kontrol), P1 (10 ton.ha⁻¹), P2 (20 ton.ha⁻¹), dan P3 (30 ton.ha⁻¹). Penentuan dosis pupuk ampas ecoenzim pada setiap petak dilakukan dengan menyesuaikan bobot tanah yang ada. Perlakuan pada penelitian ini terdiri dari empat kategori, yaitu tanpa ampas ecoenzim sebagai kontrol, dan tiga perlakuan dengan dosis ampas ecoenzim berbeda, yaitu 10 ton per hektar, 20 ton per hektar, dan 30 ton per hektar. Berdasarkan perhitungan, dosis pupuk ampas ecoenzim yang diberikan pada petak untuk masing-masing perlakuan tersebut berturut-turut adalah 525 gram, 1.050 gram, dan 1.575 gram. Setiap perlakuan diulang sebanyak empat kali, sehingga terdapat 16 satuan percobaan secara keseluruhan. Tata letak percobaan disusun secara acak berdasarkan pengambilan gulungan kertas secara acak untuk menentukan penempatan masing-masing perlakuan. Tata letak percobaan pada penelitian ini tersaji pada Gambar 1.

Riset ini dijalankan melalui beragam tahapan, di antaranya perakitan Arduino Uno, pembuatan petak uji beserta saluran irigasi, penyiapan media tanam, kalibrasi instrumen, penyiapan bibit stek dan penanaman pakcoy, pemeliharaan, hingga panen. Pada setiap petak percobaan, perlakuan kontrol dilengkapi dengan perangkat yang telah terpasang sensor kelembapan tanah dan terhubung dengan mikrokontroler Arduino Uno. Tiap petak perlakuan dipasang selang berdiameter ¼ inci yang tersambung dengan pompa air. Perangkat tersebut dipasang agar tanaman kailan dapat berkembang pada media tanam dengan kadar air sebesar 20%–40% kapasitas lapang.



Gambar 1. Tata Letak Percobaan

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahap, mulai dari perakitan Arduino Uno, pembuatan petak dan saluran air, penyiapan media, kalibrasi alat, penanaman bibit pakcoy, pemeliharaan, hingga panen. Pada petak kontrol dipasang sensor kelembaban tanah yang terhubung ke Arduino Uno, sedangkan tiap petak perlakuan dilengkapi selang $\frac{1}{4}$ in yang tersambung ke pompa air. Sistem ini dirancang agar kadar air media tanam tetap terjaga pada 20%–40% kapasitas lapang. Variabel yang diamati terdiri dari tinggi tanaman, jumlah daun, lebar daun, bobot segar tanaman, bobot kering tanaman, bobot basah akar, bobot kering akar, diameter bonggol, panjang akar, dan kadar air harian. Data pengamatan diuji menggunakan DMRT (*Duncan multiple range test*) pada taraf nyata 5%.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa pemberian ampas ecoenzim berpengaruh nyata terhadap sebagian besar parameter pertumbuhan dan produksi tanaman pakcoy (*Brassica rapa* L.). Parameter yang berbeda nyata pada taraf 5% meliputi tinggi tanaman, jumlah daun, bobot segar tanaman, bobot segar akar, panjang akar, diameter bonggol, dan bobot kering tanaman, sedangkan bobot kering akar menunjukkan perbedaan yang tidak signifikan.

Secara umum, peningkatan dosis ampas ecoenzim dari 10 hingga 30 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ menunjukkan penurunan yang konsisten pada sebagian besar variabel pertumbuhan. Perlakuan kontrol tanpa penambahan ampas ecoenzim memberikan tinggi tanaman tertinggi (25,06 cm), jumlah daun terbanyak (14,28 helai), dan bobot segar tanaman terbesar (163,46 g). Pada dosis tertinggi (30 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$), semua parameter tersebut menurun tajam masing-masing sebesar 26%, 25%, dan 39% dibandingkan kontrol.

Dosis rendah (10 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$) menghasilkan pertumbuhan yang relatif sebanding dengan kontrol, menunjukkan bahwa pada tingkat tersebut, ampas ecoenzim masih mampu mendukung perkembangan vegetatif tanaman. Sementara dosis menengah (20 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$) memperlihatkan gejala penurunan moderat pada tinggi dan bobot tanaman, mengindikasikan adanya batas optimum pemanfaatan bahan organik sebelum menimbulkan efek negatif.

Hasil pengukuran kadar air tanah harian (Gambar 2) menunjukkan bahwa perlakuan dengan penambahan ampas ecoenzim, khususnya pada dosis 30 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$, mampu mempertahankan

kelembapan tanah lebih tinggi dibandingkan perlakuan lainnya selama periode pengamatan. Pola ini mengindikasikan bahwa bahan organik ecoenzim meningkatkan kemampuan tanah menahan air melalui perbaikan struktur dan porositas tanah.

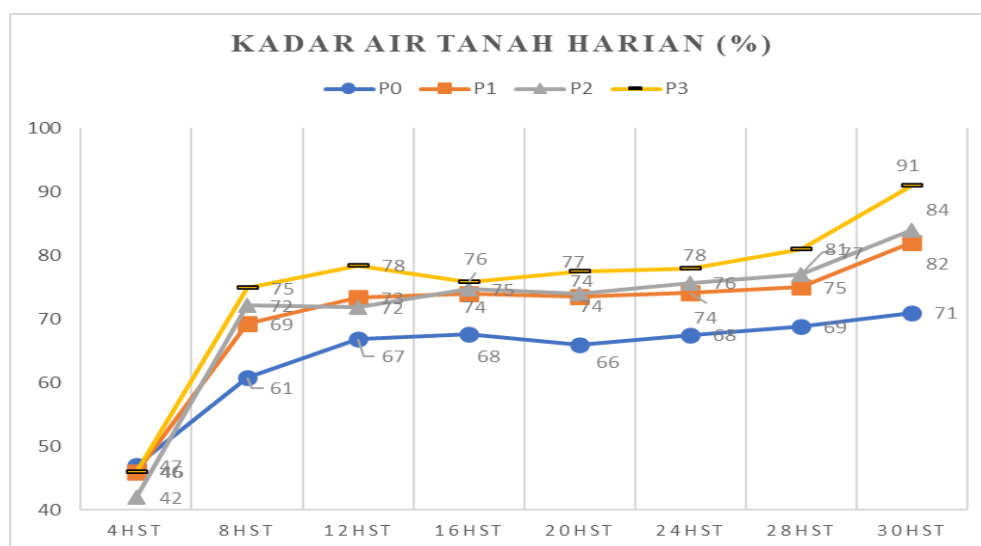
Meskipun demikian, peningkatan kadar air tersebut tidak berbanding lurus dengan peningkatan pertumbuhan tanaman. Penurunan tinggi tanaman, jumlah daun, dan biomassa pada dosis tinggi menunjukkan adanya efek antagonistik, kemungkinan disebabkan oleh rasio C/N tinggi pada ampas ecoenzim yang belum terdekomposisi sempurna, sehingga menimbulkan imobilisasi nitrogen dan keterbatasan hara esensial.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pemberian ampas ecoenzim dengan dosis rendah hingga sedang (10–20 ton·ha⁻¹) memberikan hasil pertumbuhan pakcoy terbaik, sementara dosis tinggi (30 ton·ha⁻¹) meningkatkan kapasitas tanah menahan air namun menurunkan produktivitas tanaman.

Tabel 1. Pengaruh dosis ampas ecoenzim terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman pakcoy (30 HST)

Parameter	Tanpa ampas ecoenzim (Kontrol)	10 ton·ha ⁻¹	20 ton·ha ⁻¹	30 ton·ha ⁻¹
Tinggi tanaman (cm)	25.06 ± 2.82 b	23.80 ± 2.03 b	21.47 ± 2.46 ab	18.42 ± 4.29 a
Jumlah daun (helai)	14.28 ± 1.77 a	13.53 ± 1.59 ab	11.87 ± 2.58 bc	10.65 ± 2.39 c
Bobot segar tanaman (g)	163.46 ± 16.59 a	150.21 ± 17.33 a	126.56 ± 27.19 ab	99.65 ± 42.33 b
Bobot segar akar (g)	10.39 ± 0.40 a	10.85 ± 0.48 a	10.45 ± 0.34 a	7.25 ± 0.50 b
Panjang akar (cm)	11.01 ± 0.27 a	10.70 ± 0.41 b	10.86 ± 0.16 ab	10.01 ± 1.07 b
Diameter bonggol (cm)	0.64 ± 0.03 ab	0.65 ± 0.07 a	0.60 ± 0.03 ab	0.59 ± 0.08 b
Bobot kering tanaman (g)	5.85 ± 1.67 a	4.64 ± 1.73 ab	2.80 ± 1.75 bc	1.72 ± 0.79 c
Bobot kering akar (g)	0.85 ± 0.12 a	0.80 ± 0.10 a	0.78 ± 0.09 a	0.70 ± 0.15 a

Keterangan: Nilai diikuti huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5%



Gambar 2. Kadar air tanah lapangan selama penelitian

3.9 PEMBAHASAN

Penelitian ini menunjukkan adanya perbedaan pertumbuhan tanaman pakcoy (*Brassica rapa* L.) akibat penambahan ampas ecoenzim pada beberapa perlakuan selama 30 hari. Perlakuan dengan dosis 30 ton·ha⁻¹ menghasilkan pertumbuhan yang lebih rendah dibandingkan dengan perlakuan kontrol tanpa penambahan ampas ecoenzim. Kondisi tersebut diduga berkaitan dengan tingginya rasio C/N pada ampas ecoenzim yang belum matang, yang menghambat ketersediaan nitrogen bagi tanaman. Rasio C/N yang tinggi menunjukkan bahwa nitrogen pada pupuk organik masih digunakan oleh mikroorganisme dekomposer, seperti *Bacillus subtilis*, untuk mendukung aktivitas metabolismenya. Hasil analisis bahan organik menunjukkan bahwa ampas ecoenzim memiliki kandungan karbon organik tinggi (39,62%), nitrogen rendah (1,13%), dan rasio C/N tinggi (35,06). Bahan organik yang telah matang umumnya memiliki rasio C/N antara 15–25 dan kandungan unsur hara makro (N, P, dan K) minimal 4% (Pementan No. 70, 2011). Rasio C/N yang lebih tinggi menandakan bahwa bahan organik belum terdekomposisi sempurna (Marvelia dkk., 2006). Kondisi ini dapat menghambat penyerapan nitrogen yang dibutuhkan tanaman, karena nitrogen dalam tanah digunakan oleh mikroba dekomposer untuk membentuk amonium (NH₄⁺) dan nitrat (NO₃⁻), yang esensial bagi fotosintesis dan pertumbuhan tanaman. Hal ini sejalan dengan temuan Idawati dkk. (2017), yang menyatakan bahwa rasio C/N tinggi menandakan kelebihan karbon dan kekurangan nitrogen yang dapat membatasi pertumbuhan vegetatif tanaman.

Penurunan pertumbuhan tanaman akibat imobilisasi nitrogen dan unsur hara lainnya dapat dikaitkan dengan aktivitas mikroorganisme, khususnya bakteri *Bacillus*, yang memanfaatkan nitrogen tanah selama proses dekomposisi bahan organik. Bakteri ini menggunakan nitrogen untuk pertumbuhan dan pembelahan sel. Simangunsong dan Anam (2022) menjelaskan bahwa nitrogen merupakan unsur penting bagi *Bacillus* dalam pembentukan protein dan asam nukleat, yang mendukung aktivitas biologis seperti pembelahan biner. Proses metabolisme tersebut membutuhkan nitrogen dalam jumlah besar untuk membangun struktur sel, organel, dan enzim. Oktavia dan Sumardi (2022) menambahkan bahwa aktivitas metabolik *Bacillus* selama dekomposisi menghasilkan panas melalui reaksi biokimia eksotermis yang memecah senyawa kompleks menjadi bentuk sederhana. Aktivitas ini menyebabkan berkurangnya ketersediaan nitrogen bagi tanaman dan berdampak pada terhambatnya pertumbuhan. Temuan ini didukung oleh Smith dan Paul (2019), yang menyatakan bahwa mikroorganisme tanah menggunakan nitrogen yang tersedia untuk membentuk enzim-enzim dekomposisi, sehingga tanaman mengalami kekurangan unsur hara selama proses tersebut berlangsung.

Penurunan produktivitas tanaman pada perlakuan dosis 30 ton·ha⁻¹ ditunjukkan oleh rendahnya bobot segar dan bobot kering tanaman dibandingkan kontrol. Sebaliknya, perlakuan kontrol menghasilkan nilai pertumbuhan lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa ampas ecoenzim yang belum terdegradasi sempurna memiliki kandungan nitrogen rendah, kadar C-organik tinggi, dan dapat menurunkan pH tanah akibat pembentukan senyawa organik bersifat asam selama proses dekomposisi. Menurut Sahfitra (2023), kondisi pH rendah menurunkan kapasitas tukar kation (KTK), sehingga kemampuan tanah untuk mengikat serta menyediakan unsur hara esensial seperti kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan kalium (K) berkurang. Pada tanah masam, ketersediaan unsur hara mikro seperti mangan (Mn), seng (Zn), dan tembaga (Cu) juga menurun karena terbentuknya senyawa yang sukar larut. Kekurangan unsur hara tersebut berdampak pada penurunan produktivitas tanaman karena berperan penting dalam pembentukan enzim, keseimbangan ion, dan efisiensi penyerapan nutrisi. Brady dan Weil (2008) menyatakan bahwa pada tanah masam, ion H⁺ dan Al³⁺ mendominasi dan menurunkan ketersediaan kation basa, sedangkan pada tanah alkalis, unsur seperti besi dan mangan mengendap menjadi senyawa tidak larut. Dengan demikian, tanah dengan pH netral memiliki KTK optimal yang mendukung ketersediaan unsur hara makro dan mikro.

Hal ini sejalan dengan Syaputra dkk. (2015), yang menyatakan bahwa rendahnya daya tukar kation dapat menyebabkan pertumbuhan tanaman menjadi tidak optimal.

Penambahan ampas ecoenzim yang belum matang juga menyebabkan munculnya jamur *tricker inkcap* (*Coprinus* spp.) pada media tanam (Gambar 8). Keberadaan jamur tersebut menandakan bahwa proses dekomposisi bahan organik masih berlangsung. Watling dan Richardson (2010) menjelaskan bahwa jamur memanfaatkan senyawa organik kompleks dalam bahan organik untuk pertumbuhan, sehingga mengurangi ketersediaan nutrisi bagi tanaman. Meskipun *Coprinus* spp. bukan patogen, pertumbuhannya pada media tanam dengan pupuk organik yang belum matang dapat menghambat perkembangan tanaman. Hal ini sejalan dengan Rathi dan Sharma (2017), yang menyatakan bahwa pupuk hayati yang belum matang cenderung mengandung bahan organik yang belum terurai sempurna, menciptakan kondisi lembap yang mendukung pertumbuhan jamur. Jamur inkcap dapat berkompetisi dengan tanaman untuk memperoleh oksigen dan ruang perakaran.

Di sisi lain, kandungan bahan organik pada ampas ecoenzim juga memberikan efek positif terhadap peningkatan kelembapan tanah. Walaupun ampas ecoenzim yang belum matang menghambat pertumbuhan tanaman, bahan ini meningkatkan kemampuan media tanam dalam mempertahankan kadar air (Gambar 3). Perlakuan dosis 30 ton·ha⁻¹ menunjukkan tingkat kelembapan tanah tertinggi dibandingkan perlakuan lainnya. Temuan ini menunjukkan bahwa ampas ecoenzim meningkatkan kemampuan tanah dalam menyerap dan menyimpan air. Hal tersebut disebabkan oleh senyawa organik yang memperbaiki struktur tanah, meningkatkan porositas, dan memperkuat agregasi partikel tanah. Bronick (2005) menyatakan bahwa bahan organik dapat memperkuat aktivitas biota mikro tanah yang berperan dalam pembentukan humus, sehingga meningkatkan kemampuan tanah menahan air secara signifikan.

Selain itu, penggunaan sistem irigasi otomatis berbasis Arduino Uno dengan sensor kelembapan tanah terbukti meningkatkan efisiensi pengelolaan air dan retensi kelembapan media tanam. Menurut Kumar dkk. (2021), sistem ini mampu mendeteksi kadar kelembapan tanah secara real-time dan mengaktifkan penyiraman hanya ketika diperlukan, sehingga mengurangi pemborosan air dibandingkan metode konvensional. Gunawan dkk. (2019) menambahkan bahwa stabilitas kelembapan yang dihasilkan sistem tersebut dapat meningkatkan kapasitas retensi air tanah, menjadikan air lebih tersedia bagi akar tanaman. Bhardwaj dkk. (2020) juga melaporkan bahwa sistem penyiraman berbasis Arduino Uno mampu menjaga kadar air tanah secara optimal dan meningkatkan efisiensi penggunaan air secara keseluruhan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pemberian ampas ecoenzim berpengaruh nyata terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman pakcoy (*Brassica rapa* L.) serta kemampuan tanah dalam mempertahankan kelembapan. Peningkatan dosis ampas ecoenzim dari 10 hingga 30 ton·ha⁻¹ menyebabkan penurunan tinggi tanaman, jumlah daun, dan biomassa, dengan penurunan tertinggi terjadi pada dosis 30 ton·ha⁻¹. Kondisi tersebut disebabkan oleh rasio C/N tinggi (35,06) pada ampas ecoenzim yang belum matang, yang menghambat ketersediaan nitrogen dan menurunkan efisiensi penyerapan unsur hara.

Meskipun demikian, dosis tinggi (30 ton·ha⁻¹) meningkatkan kemampuan tanah dalam mempertahankan kadar air karena kandungan bahan organiknya mampu memperbaiki struktur, porositas, dan agregasi tanah. Hasil ini menunjukkan bahwa ampas ecoenzim berpotensi sebagai bahan pembenah tanah, tetapi tidak efektif digunakan sebagai pupuk organik langsung sebelum proses dekomposisi sempurna.

Dengan demikian, dosis optimal ampas ecoenzim berada pada kisaran 10–20 ton·ha⁻¹, yang

masih mampu mendukung pertumbuhan vegetatif tanaman tanpa menghambat serapan nitrogen. Penerapan sistem irigasi otomatis berbasis Arduino Uno terbukti meningkatkan efisiensi penggunaan air dan menjaga kestabilan kelembapan tanah. Penelitian lanjutan perlu dilakukan untuk mengkaji kombinasi dosis ecoenzim matang dengan pengaturan interval irigasi otomatis guna mendukung sistem pertanian berkelanjutan yang efisien dan ramah lingkungan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, A., Yuliani, N., & Darmawan, D. (2015). Pengaruh bahan organik terhadap sifat fisik tanah dan pertumbuhan tanaman sayuran. *Jurnal Tanah Tropika*. 20(1): 33–40.
- Bhardwaj, A., Singh, M., & Yadav, S. (2020). Automated irrigation system using Arduino. *International Journal of Agricultural Technology*. 16(5): 1189–1200.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *The nature and properties of soils (14th ed.)*. Pearson Prentice Hall.
- Bronick, C. J. (2005). Soil structure and organic matter: Their role in soil moisture retention. *Soil Biology & Biochemistry*. 37(5): 887–896.
- Edi, S. (2010). Karakteristik dan budidaya tanaman pakcoy (*Brassica rapa* L.). *Jurnal Hortikultura Indonesia*. 1(2): 45–53.
- Gunawan, T., Ramadhani, A., & Lestari, M. (2019). Enhancement of soil water retention using automated irrigation systems. *Environmental Science Journal*. 14(4): 293–301.
- Hadisuwito, S. (2015). Pengaruh perlakuan kombinasi media tanam terhadap pertumbuhan tanaman sawi (*Brassica juncea* L.). *Jurnal Silvikultur Tropika*. 3(2): 81–84.
- Husdi, H. (2018). Monitoring kelembapan tanah pertanian menggunakan soil moisture sensor FC-28 dan Arduino Uno. *ILKOM Jurnal Ilmiah*. 10(1): 237–243.
- Idawati, I., Rosnina, R., Jabal, J., Sapareng, S., Yasmin, Y., & Yasin, S. M. (2017). Penilaian kualitas kompos jerami padi dan peranan biodekomposer dalam pengomposan. *Journal Tabaro Agriculture Science*. 1(2): 127–135.
- Kementerian Pertanian. (2011). *Peraturan Menteri Pertanian Nomor 70/Permentan/SR.140/10/2011 tentang Pupuk Organik, Pupuk Hayati, dan Pembenh Tanah*. Jakarta: Kementerian Pertanian Republik Indonesia.
- Kumar, P., Sharma, R., & Gupta, S. (2021). Smart irrigation management using IoT and Arduino: A review. *Journal of Agricultural Sciences*. 13(2): 85–92.
- Marvelia, A., Darmanti, S., & Parman, S. (2006). Produksi tanaman jagung manis (*Zea mays* L. saccharata) yang diperlakukan dengan kompos kascing pada dosis berbeda. *Anatomi Fisiologi*. 14(2): 7–18.
- Oktavia, R., & Sumardi, S. (2022). Kemampuan *Bacillus* sp. sebagai bioremediasi bahan pencemar. *Jurnal Bioterdidik: Wahana Ekspresi Ilmiah*. 10(2): 110–125.
- Pambudi, A. S., Andryana, S., & Gunaryati, A. (2020). Rancang bangun penyiraman tanaman pintar menggunakan smartphone dan mikrokontroler Arduino berbasis Internet of Things. *Jurnal Media Informasi*. 4(2): 250–265.
- Paendong, M. R., Talahaturuson, A., & Lumowa, S. (2023). Potensi enzim limbah organik (ecoenzyme) sebagai pembenah tanah dan sumber hara tanaman. *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*. 10(2): 55–63.
- Prizal, R. M., & Nurbaiti, N. (2017). Pengaruh pemberian pupuk organik cair terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman pakcoy (*Brassica rapa* L.). *Jurnal Agroteknologi Riau*. 4(2): 3–9.
- Rathi, P., & Sharma, A. (2017). Effect of organic amendments on soil microbial communities and plant growth in agriculture. *Soil Biology & Biochemistry*. 115. (1):118–129.
- Sahfitra, A. A. (2023). Variasi kapasitas tukar kation (KTK) dan kejenuhan basa (KB) pada tanah Hemic Haplosaprist yang dipengaruhi oleh pasang surut di Pelalawan, Riau. *Biofarm: Jurnal Ilmiah Pertanian*. 19(1): 103–112.
- Simangunsong, T., & Anam, M. K. (2022). Penerapan terkini teknologi bioflok dalam budidaya ikan nila: Sebuah tinjauan. *Global Science*. 3(1): 41–48.

- Smith, J., Brown, A., & Johnson, R. (2020). Enzyme recovery from ecoenzyme waste for food industry applications. *Journal of Environmental Chemistry*. 10(2):123–136.
- Smith, J. L., & Paul, E. A. (2019). The significance of soil microbial biomass estimations. *Soil Biology & Biochemistry*. 22(6): 585–589.
- Syaputra, D., Alibasyah, M. R., & Arabia, T. (2015). Pengaruh kompos dan dolomit terhadap beberapa sifat kimia ultisol dan hasil kedelai (*Glycine max L. Merrill*) pada lahan berteras. *Jurnal Manajemen Sumberdaya Lahan*. 4(1): 535–542.
- Wahyuningsih, A., Fajriani, S., & Aini, N. (2016). Komposisi nutrisi dan media tanam terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman pakcoy (*Brassica rapa L.*) sistem hidroponik. *Jurnal Produksi Tanaman*. 4(8): 595–601.
- Watling, R., & Richardson, M. J. (2010). Fungi and decomposition. *Fungal Biology Reviews*. 24(3–4): 110–120.