

PENGARUH PENAMBAHAN *ECO-ENZYME* TERHADAP LAJU DEKOMPOSISI TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT

Fayyadh Altamis Erwinsyah*, Firda Dimawarnita, Yora Faramitha, dan Fannysa Aulia Asy'ariyandika¹

Abstrak - Indonesia sebagai produsen utama kelapa sawit menghasilkan volume limbah padat yang besar, terutama tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Limbah ini mengandung kadar lignoselulosa yang tinggi, sehingga sulit terurai secara alami dan berpotensi menimbulkan masalah lingkungan bila tidak ditangani dengan tepat. Proses penguraian TKKS dapat dioptimalkan dengan tambahan bioaktivator, seperti *eco-enzyme*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi *eco-enzyme* sebagai bioaktivator pada proses dekomposisi tandan kosong kelapa sawit. Perlakuan pada penelitian ini dilakukan dengan penyemprotan *eco-enzyme* dan air, serta dilakukan pengamatan pada hari ke-1, ke-7, dan ke-14. Parameter yang dianalisis adalah kadar C-organik menggunakan metode spektrofotometri, kadar N-total menggunakan metode Kjeldahl, dan diperoleh perhitungan rasio C/N. Hasil penelitian menunjukkan penambahan *eco-enzyme* memberikan penurunan kadar C-organik yang lebih cepat (6,64%), peningkatan kadar N-total (21,99%), dan penurunan rasio C/N hingga 23% yang mencapai standar kematangan dalam 14 hari. Secara keseluruhan, *eco-enzyme* berpotensi menjadi bioaktivator yang mempercepat proses dekomposisi TKKS.

Kata kunci: Bioaktivator, C-Organik, *Eco-enzyme*, N-Total, Rasio C/N

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu produsen utama kelapa sawit di dunia dengan total produksi mencapai 46,82 juta ton dan luas areal perkebunan diperkirakan sebesar 34,75 juta hektar (BPS 2023). Produksi yang tinggi ini menghasilkan limbah padat dalam jumlah besar, salah satunya berupa tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Menurut Rahmadi et al. (2014), TKKS merupakan limbah yang paling besar dihasilkan dari hasil pengolahan kelapa sawit. Setiap pengolahan 1 ton buah kelapa sawit segar dapat menghasilkan limbah TKKS sebanyak 22-23% atau mencapai 220-230 kg. Pengelolaan yang kurang tepat seperti penumpukan atau pembakaran TKKS dapat

menjadi masalah lingkungan. Menurut Rahmadanti et al. (2020), salah satu strategi untuk mengatasi permasalahan limbah kelapa sawit adalah dengan pemanfaatan TKKS sebagai alternatif pembuatan kompos yang memiliki nilai ekologi dan ekonomi yang tinggi.

TKKS memiliki kandungan lignoselulosa yang tinggi, terdiri dari 32,57% selulosa; 27,70% hemiselulosa; dan 26,49% lignin (Dimawarnita & Urip, 2017). Hal ini membuat TKKS sukar terdegradasi secara alami dan membuat dekomposisi alami akan berlangsung lambat (Mondylaksita et al., 2021). Andaswara et al. (2024) menyatakan bahwa pengomposan TKKS tanpa perlakuan pendukung atau penambahan aktivator umumnya memerlukan waktu 53 hari. Oleh karena itu, perlakuan khusus dibutuhkan untuk mempercepat proses dekomposisi TKKS. Menurut Muliarta et al. (2023), bioaktivator seperti *eco-enzyme* dapat berpotensi mempercepat proses pengomposan. *Eco-enzyme* merupakan larutan cair yang dihasilkan melalui fermentasi senyawa organik kompleks yang bersumber dari bahan limbah organik, seperti buah-buahan dan sayuran, yang dikombinasikan dengan air dan gula (Hemalatha & Visantini, 2020). *Eco-enzyme*

Penulis yang tidak disertai dengan catatan kaki instansi adalah peneliti pada Pusat Penelitian Kelapa Sawit

Fayyadh Altamis Erwinsyah* (✉)
Pusat Penelitian Kelapa Sawit Unit Bogor
Jl. Taman Kencana No.1 Bogor 16128, Jawa Barat, Indonesia
Email: fayyadh24altamis@gmail.com

¹Departemen Biokimia, IPB University

Jl. Tanjung, Biochemistry Building, Dramaga IPB Campus, Bogor, West Java

terdiri dari berbagai senyawa metabolit sekunder yang dihasilkan oleh mikroorganisme, seperti enzim amilase, tripsin, lipase, fenol, alkohol, dan asam organik (Rochyani et al., 2020). *Eco-enzyme* banyak digunakan untuk mendegradasi polutan dalam air limbah, membersihkan residu pestisida, dan sebagai aktivator pertumbuhan tanaman (Santosa et al., 2023), namun belum ada pemanfaatan *eco-enzyme* sebagai aktivator pengomposan dalam proses dekomposisi TKKS. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui potensi *eco-enzyme* sebagai bioaktivator pada proses dekomposisi tandan kosong kelapa sawit.

BAHAN DAN METODE

Alat dan Bahan

TKKS yang digunakan dalam penelitian didapat dari PTPN IV Cikasungka Bogor. Penelitian ini menggunakan beberapa peralatan laboratorium, antara lain spektrofotometer UV-Vis, labu Kjeldahl, digestion apparatus, dan alat destilasi. Bahan yang digunakan meliputi H₂O₂ teknis 12,5%, H₂SO₄ pekat, K₂Cr₂O₇ 1 N, asam borat 1%, NaOH 40%, dan indikator Conway.

Pembuatan *Eco-enzyme*

Eco-enzyme yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada metode Artaya et al., 2024 yaitu dengan mencampurkan kulit buah nanas, semangka, gula aren, dan air dengan perbandingan 3: 1: 10 (b/b/v) yang diinkubasi selama 3 bulan. Setelah itu, larutan disaring untuk memisahkan residu padat dan filtrat yang diperoleh digunakan sebagai *eco-enzyme* dalam penelitian ini.

Preparasi Kompos Tandan Kosong Kelapa Sawit

Metode penelitian diawali dengan proses preparasi TKKS, sampel TKKS dicacah sampai ukuran 2-3 cm, kemudian dilakukan delignifikasi menggunakan H₂O₂ 12,5% dengan reaktor *Overnight Decomposition System* (ODS) pada suhu 75°C selama 1 jam. TKKS yang telah didelignifikasi dicampurkan dengan dekomposer Orgadec dengan perbandingan 1:1 (b/b), kemudian ditambahkan jamur *Trichoderma* sp. sebanyak 20% (v/b). Campuran diaduk merata lalu dibagi ke dalam dua beaker glass yang masing-masing diberi label sebagai sampel dekomposisi TKKS dengan *eco-enzyme* dan sampel dekomposisi TKKS dengan air. Selanjutnya, kedua sampel diinkubasi pada suhu 40°C, dengan perlakuan penyemprotan *eco-enzyme* dan air sesuai label masing-masing sebanyak 5 mL, serta pengadukan yang dilakukan setiap hari selama 14 hari. Proses pengambilan sampel dilakukan pada hari ke-1, ke-7, dan ke-14 inkubasi.

Penentuan Kadar C-Organik

Analisis kandungan C-organik dilakukan menggunakan metode spektrofotometri berdasarkan penelitian Sari et al. (2023) dengan menimbang 0,5 g sampel TKKS hasil dekomposisi dan memasukkannya ke dalam labu ukur 100 mL. Sampel ditambahkan dengan 5 mL larutan K₂Cr₂O₇ 1 N kemudian dikocok, dilanjutkan dengan penambahan 7,5 mL H₂SO₄ pekat, dikocok kembali, dan didiamkan selama 30 menit. Setelah itu, larutan diencerkan menggunakan air bebas ion, didinginkan, kemudian dihimpitkan dan dibiarkan selama 24 jam. Selanjutnya, larutan jernih yang terbentuk diukur menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 561 nm. Larutan standar dibuat dengan konsentrasi 0-250 ppm.

$$\%C \text{ organic} = ppm \text{ kurva} \times \frac{mL \text{ ekstrak}}{1000 mL} \times \frac{100}{mg \text{ sampel}} \times fk$$

Penentuan Kadar N-Total

Penetapan N-total pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode Kjeldahl mengacu pada Kasi et al. (2020). Sebanyak 0,25 g sampel TKKS hasil dekomposisi ditimbang dan dimasukkan ke dalam labu Kjeldahl, kemudian ditambahkan 0,25–0,50 g selenium serta 3 mL H₂SO₄ pekat. Campuran tersebut didestruksi selama 2–3 jam dengan suhu bertahap

antara 150–350°C hingga diperoleh larutan berwarna bening. Setelah didinginkan, larutan diencerkan menggunakan akuades, lalu dipindahkan ke dalam labu didih destilator berukuran 250 mL yang telah berisi akuades hingga setengah volumenya serta beberapa butir batu didih. Destilat ditampung dalam erlenmeyer 100 mL yang berisi 10 mL larutan asam borat 1% dengan tambahan tiga tetes indikator

Conway. Proses destilasi dilakukan dengan menambahkan 20 mL NaOH 40% ke dalam labu destilasi. Destilasi dihentikan setelah volume cairan dalam erlenmeyer mencapai ±75 mL. Hasil destilat

kemudian dititrasi menggunakan H₂SO₄ 0,05 N hingga terjadi perubahan warna dari hijau menjadi merah jambu muda. Volume titrasi sampel (Vs) dan blanko (Vb) dicatat untuk perhitungan kadar N-total.

$$\text{N-total (\%)} = \frac{V_s - V_b \times N \text{ H}_2\text{SO}_4 \times \text{Berat atom nitrogen}}{\text{berat sampel (mg)}} \times 100$$

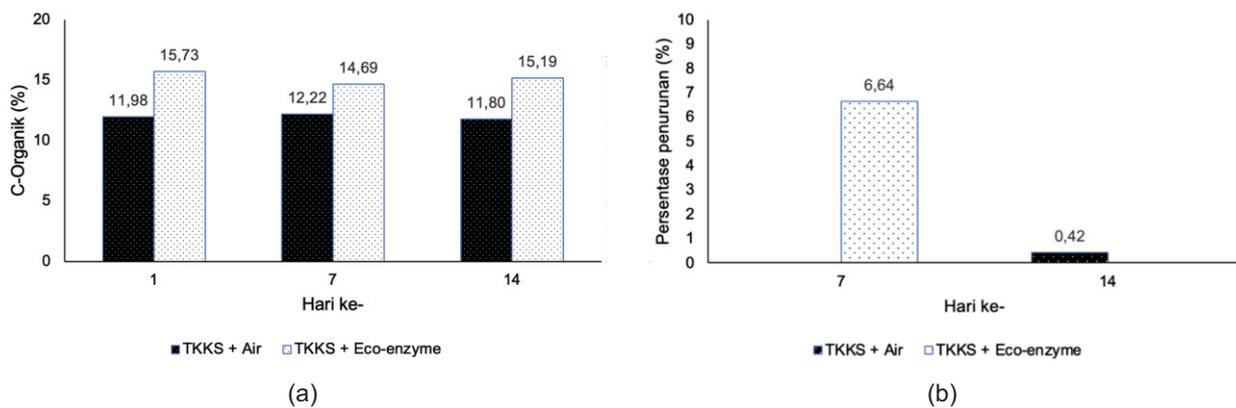
Selanjutnya, penetapan rasio C/N diperoleh dengan membandingkan kandungan C-organik dengan kandungan N-total yang telah ditentukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Perubahan Kandungan C-Organik Kompos TKKS

Hasil pengujian menunjukkan perlakuan

penambahan *eco-enzyme* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kandungan C-organik ($p < 0,05$), sedangkan waktu inkubasi ($p > 0,05$) dan interaksi antara keduanya tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan. Hasil ini sesuai dengan penelitian (Sumiyati et al., 2025b) yang menyatakan bahwa *eco-enzyme* sebagai aktivator biologis dapat memodifikasi komposisi kimia bahan organik serta mempercepat proses dekomposisi selama pengomposan. Grafik penurunan C organik dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Grafik kadar C-Organik (a) dan persentase penurunan kadar C-Organik kompos TKKS (b)

Berdasarkan Gambar 1 perlakuan dekomposisi TKKS dengan air hanya mengalami penurunan kadar C-Organik sebesar 0,42% dalam periode 14 hari pengomposan. Sebagai informasi karakteristik awal bahan, TKKS segar memiliki kandungan C-organik sebesar 45,57%, yang mencerminkan karakteristik bahan lignoselulosa dengan kandungan karbon yang tinggi. Rendahnya penurunan kadar C-organik pada perlakuan air disebabkan oleh air yang tidak mampu memecah struktur lignin dan selulosa yang terkandung dalam TKKS (Wu et al., 2023). Lignin merupakan polimer aromatik yang resisten terhadap degradasi mikrobiologis, sehingga dapat menghambat akses enzim ke selulosa dan hemiselulosa (Gao et al., 2025).

Pada perlakuan dekomposisi TKKS dengan *eco-enzyme*, kandungan C-organik menunjukkan penurunan 6,64% (dari 15,73% menjadi 14,69%) pada hari ke-7, dan sedikit meningkat kembali pada hari ke-14 (15,19%). Penurunan ini mengindikasikan bahwa *eco-enzyme*, dengan sifat asamnya dapat membuat lingkungan yang optimal untuk pertumbuhan mikroorganisme dekomposer. Selain itu, kehadiran berbagai metabolit sekunder dan enzim, seperti lipase, amilase, laccase, invertase, dan lainnya dapat membantu memecah ikatan lignoselulosa dan struktur biomassa yang tahan degradasi, sehingga membantu mikroorganisme dekomposer untuk mendapatkan sumber karbon (Halim et al. 2025).

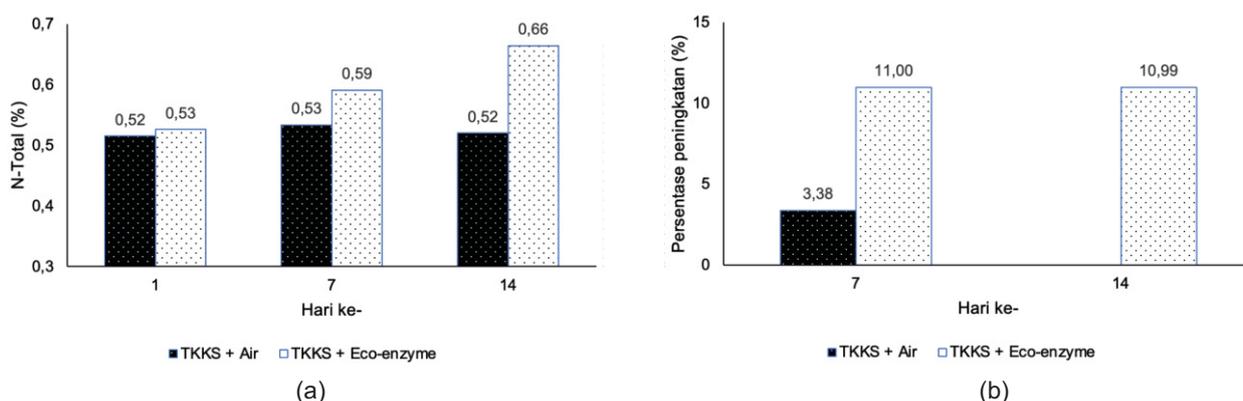
Menurut Wu et al. (2024) penurunan kadar C-organik menunjukkan bahwa mikroorganisme dekomposer telah mengonsumsi karbon sebagai sumber energi. Perbedaan signifikan pada kandungan C-organik antara kedua perlakuan menunjukkan bahwa *eco-enzyme* mampu menciptakan kondisi yang lebih kondusif bagi aktivitas mikroorganisme dibandingkan dengan air.

Secara keseluruhan, penurunan kadar C-organik tidak terlalu besar, hal ini disebabkan oleh karakteristik TKKS yang memiliki kandungan lignin dan selulosa yang tinggi sehingga sulit terurai (Aulia et al., 2024). Periode pengomposan yang singkat, yaitu 14 hari, hanya mewakili fase awal dari proses dekomposisi. Penelitian Triyadi et al. (2015, menjelaskan bahwa pengomposan TKKS memerlukan waktu 30 hingga 60

hari untuk mencapai penurunan C-organik yang signifikan. Oleh karena itu, hasil penelitian ini sejalan dengan literatur dan menunjukkan bahwa *eco-enzyme* mampu memicu proses dekomposisi lebih awal dibandingkan perlakuan kontrol.

Analisis Perubahan Kandungan N-Total Kompos TKKS

Hasil analisis menunjukkan bahwa jenis perlakuan (penambahan *eco-enzyme*) memiliki pengaruh signifikan terhadap kandungan N-total ($p < 0,05$). Sebaliknya, faktor waktu dan interaksi antara waktu dan jenis perlakuan tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap kadar N-total ($p > 0,05$). Grafik peningkatan N Total dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Peningkatan kadar N-total (a) dan persentase penurunan kadar N-total kompos TKKS (b)

Berdasarkan Gambar 2, terjadi peningkatan kadar N-total sebesar 11% (dari 0,53% ke 0,59%) pada hari ke-7 dan 10,99% (dari 0,59% ke 0,66%) pada hari ke-14 untuk perlakuan penambahan *eco-enzyme*. Sebagai informasi karakteristik awal bahan, TKKS segar yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kandungan N-total sebesar 1,12%. Selama proses dekomposisi, mikroorganisme mengonsumsi karbon lebih cepat dibandingkan nitrogen (Khanal et al., 2019). Peningkatan kadar N-total menunjukkan bahwa aktivitas mikroorganisme dekomposer, yang dipacu oleh penambahan *eco-enzyme*, berlangsung optimal dalam menguraikan substrat. Sebaliknya, pada perlakuan dekomposisi TKKS dengan air, kadar N-total hanya mengalami fluktuasi kecil (3,38%) pada hari ke-7 dan tidak mengalami peningkatan pada hari

ke-14, yang mengindikasikan bahwa laju dekomposisi berlangsung sangat lambat atau hampir tidak terjadi. Kondisi ini terjadi karena penambahan air saja tidak cukup untuk merangsang aktivitas mikrobiologis yang mampu memicu perubahan signifikan pada komposisi nutrisi.

Peran *eco-enzyme* dalam memengaruhi fluktuasi kandungan N-total sangat penting. *Eco-enzyme* menyediakan lingkungan yang lebih asam dan kaya nutrisi mikro yang mendukung pertumbuhan dan metabolisme mikroorganisme dekomposer. Kondisi ini mempercepat laju mineralisasi C-organik, sehingga mempercepat proses konsentrasi nitrogen (Li et al., 2023). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penambahan aktivator yang tepat dapat

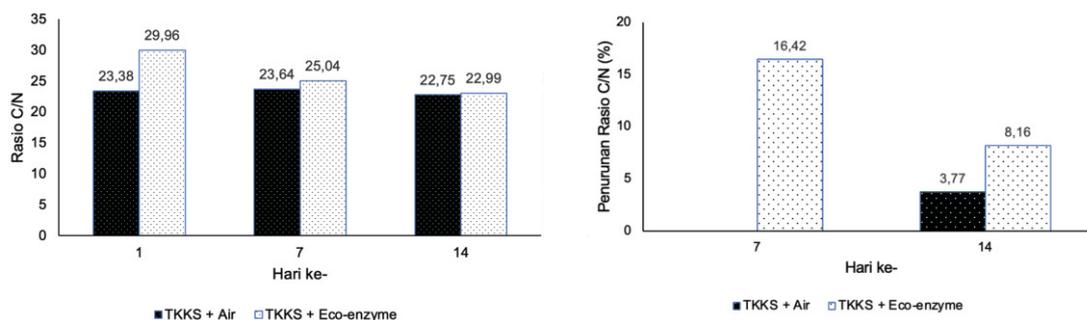
mempercepat siklus nitrogen dalam kompos (Insam et al., 2002). Peningkatan N-total pada perlakuan *eco-enzyme* tidak hanya disebabkan oleh konsentrasi relatif, tetapi juga berpotensi karena peningkatan aktivitas fiksasi nitrogen oleh mikroorganisme.

Analisis statistik menunjukkan bahwa *eco-enzyme* berperan signifikan sebagai aktivator dalam proses dekomposisi TKKS yang secara nyata memengaruhi kandungan N-total. Peningkatan kadar N-total terlihat pada dekomposisi TKKS menggunakan *eco-enzyme*, hal ini menunjukkan bahwa *eco-enzyme* memfasilitasi proses dekomposisi menuju pembentukan kompos yang lebih cepat dan bernutrisi. Oleh karena itu, *eco-enzyme* memiliki potensi besar sebagai

aktivator alami untuk pengolahan limbah TKKS dalam skala yang lebih besar.

Analisis Perubahan Rasio C/N Kompos TKKS

Hasil uji ANOVA menunjukkan bahwa tidak ada variabel yang memiliki pengaruh signifikan terhadap rasio C/N. Nilai signifikansi untuk waktu, perlakuan, dan interaksi antara keduanya memiliki nilai lebih besar dari 0,05. Meskipun hasil menunjukkan penurunan rasio C/N pada perlakuan *eco-enzyme*, secara statistik perbedaan tersebut tidak signifikan dalam periode 14 hari. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh perlakuan belum cukup untuk menghasilkan perubahan yang signifikan pada rasio C/N pada periode 14 hari.



Gambar 3. Penurunan rasio C/N

Penurunan rasio C/N terjadi pada perlakuan *eco-enzyme* sebesar 16,42% pada hari ke-7 dan 8,16% pada hari ke-14 (Gambar 3). Penurunan rasio C/N menunjukkan proses dekomposisi TKKS. Salangsang et al., (2022), menjelaskan bahwa karbon (C) dikonsumsi oleh mikroorganisme sebagai sumber energi dan dilepaskan sebagai CO₂, sedangkan nitrogen (N) diubah menjadi biomassa mikroba, sehingga N menjadi lebih terkonsentrasi dalam material. Rasio C/N adalah parameter utama yang digunakan untuk memantau kemajuan proses pengomposan (Hemidat et al., 2018). Dengan demikian, penurunan rasio C/N menunjukkan keberhasilan perlakuan dalam memfasilitasi aktivitas dekomposisi mikrobiologis TKKS.

Penurunan rasio C/N pada perlakuan *eco-enzyme* pada hari ke-14 (dari 29,96 ke 22,99) menunjukkan bahwa kompos TKKS telah memasuki tahap

kematangan awal. Menurut Oreopoulou dan Russ (2006), rasio C/N ≤ 25 mengindikasikan bahwa kompos memiliki kondisi yang telah stabil atau telah matang. Nilai rasio C/N pada kompos TKKS juga telah memenuhi standar minimal mutu murni pupuk organik, pupuk hayati dan pembenah tanah, yaitu rasio C/N < 25 (Kementerian Pertanian Republik Indonesia, 2019). Sebagai titik acuan sebelum perlakuan, TKKS dalam kondisi segar menunjukkan rasio C/N yang relatif tinggi, yaitu sebesar 41, yang merepresentasikan biomassa dengan tingkat dekomposisi yang masih sangat rendah. Sebaliknya, pada perlakuan dekomposisi TKKS dengan air, rasio C/N tetap berada pada kisaran 22–23. Meskipun masih termasuk dalam rentang ideal, kestabilan tersebut lebih bersifat stagnan dan mencerminkan bahwa proses dekomposisi belum berlangsung secara optimal seperti pada perlakuan dengan *eco-enzyme*.

KESIMPULAN

Penambahan *eco-enzyme* memiliki pengaruh positif terhadap aktivitas dekomposisi TKKS, yang ditunjukkan oleh penurunan rasio C/N yang lebih cepat, penurunan kadar C-organik, dan peningkatan kadar N-total selama periode inkubasi. Meskipun rasio C/N pada perlakuan air telah berada pada kisaran matang sejak awal, kondisi tersebut bersifat relatif stabil dan tidak disertai perubahan signifikan pada C-organik dan N-total, sehingga mencerminkan proses dekomposisi yang stagnan. Sebaliknya, penambahan *eco-enzyme* mendorong terjadinya transformasi bahan organik yang masih berlangsung secara aktif, yang tercermin dari dinamika perubahan parameter kimia selama pengomposan.

Jika dibandingkan dengan metode dekomposisi tradisional, pemanfaatan *eco-enzyme* dapat mempercepat proses secara signifikan. Penggunaan *eco-enzyme* pada proses dekomposisi TKKS menunjukkan kemampuan untuk mencapai rasio C/N yang mendekati standar kematangan hanya dalam 14 hari. Perbandingan ini menunjukkan potensi besar *eco-enzyme* sebagai alternatif alami yang efektif dan ramah lingkungan untuk pengolahan limbah TKKS dalam skala industri. Penelitian lebih lanjut dapat dikembangkan dengan periode inkubasi yang lebih panjang untuk dapat mengamati laju dekomposisi TKKS secara lebih komprehensif dan dapat mendukung penggunaan *eco-enzyme* sebagai aktivator dekomposisi yang optimal pada TKKS.

DAFTAR PUSTAKA

- [BPS] Badan Pusat Statistik. (2023). *Indonesian Oil Palm Statistics 2022*.
- Andaswara, Muhammad, F. B., Rusmini, Zainal, A., Mudi, Daryono, Rusli, A., & Syaiful, A. (2024). Combination of Goat Rumen and Mas Snails as Decomposer Bacteria in Manufacturing Empty Palm Bunch Compost. *International Journal of Science Technology & Management*, 5(1), 127-34. <https://doi.org/10.46729/ijstm.v5i1.1041>.
- Artaya, I. P., Kamisutara, M., Arimbawa, I. G., & Nilowardono, S. (2024). Proses Pembuatan Eco Enzyme Berbahan Sampah Organik Rumah Tangga Sebagai Penunjang Desa Ramah Lingkungan. *Madaniya*, 5(2), 312-321.
- Aulia, W. D., Permana, A. T., Dimawarnita, F., & Faramitha, Y. (2024). Delignifikasi tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dengan NaOH terhadap kualitas pupuk organik cair. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 47–54. <https://doi.org/10.24961/j.tek.ind.pert.2024.34.1.47>
- Dimawarnita, F., & Perwitasari, U. (2017). Pemanfaatan Tandan Kosong Kelapa Sawit untuk Produksi Jamur Tiram (*Pleurotus sp.*) dan Enzim Ligninase. *Jurnal Mikologi Indonesia*, 1(2), 100. <https://doi.org/10.46638/jmi.v1i2.24>
- Gao, Q., Guo, L., Li, S., Wu, W., Ding, J. W., Xu, H., & Liu, Z. (2025). Biodegradation mechanism of cellulose, hemicellulose, and lignin in bacteria-dominant aerobic composting from agricultural biomass waste: A Review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 11, 100879. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2025.100879>
- Halim., Arma M., Fransiscus S., Basruddin. (2025). Chemical Characteristics of *Eco-enzymes* as Liquid Organic Fertilizer from Vegetable Waste and Its Impact to Improve the Growth of Red Onion (*Allium ascalonicum* L.) on Marginal Dry Land. (2025b). *International Journal of Agriculture and Biosciences*. <https://doi.org/10.47278/journal.ijab/2025.050>
- Hemalatha, M., & Visantini, P. (2020b). Potential use of eco-enzyme for the treatment of metal based effluent. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 716(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/716/1/012016>
- Hemidat, S., Jaar, M., Nassour, A., & Nelles, M. (2018). Monitoring of composting process parameters: a case study in Jordan. *Waste and Biomass Valorization*, 9(12), 2257–2274. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0197-x>
- Insam, H., Nuntavun, R., & Susanne, K. (2002). Microbiology of Composting. *Springer eBooks*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-08724-4>
- Kasi, P. D., Cambaba, S., Surya, I. N., Faisal. (2020). Analisis unsur hara karbon organik dan nitrogen pada tanah sawah di Kecamatan Seko Kabupaten Luwu Utara. *Cokroaminoto Journal*

- of *Biological Science*, 2(1), 12-16.
- Kementerian Pertanian Republik Indonesia. (2019). Keputusan Menteri Pertanian Nomor 261/KPTS/SR.310/M/4/2019 tentang Persyaratan Teknis Minimal Pupuk Organik, Pupuk Hayati, dan Pembenh Tanah. Kementerian Pertanian Republik Indonesia.
- Khanal, S. K., Nindhia, T. G. T., & Nitayavardhana, S. (2019). Biogas from wastes. In *Elsevier eBooks* (pp. 165–174). <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64200-4.00011-6>
- Li, J., Chen, P., Li, Z., Li, L., Zhang, R., Hu, W., & Liu, Y. (2023). Soil aggregate-associated organic carbon mineralization and its driving factors in rhizosphere soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 186, 109182. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109182>
- Mondylaksita, Kinanthi, Jorge, A., Ferreira, Wiratni, B., Claes, N., Mohammad, J., Taherzadeh, & Ria, M. (2021). Enhanced Volatile Fatty Acid Production From Oil Palm Empty Fruit Bunch Through Acidogenic Fermentation—A Novel Resource Recovery Strategy for Oil Palm Empty Fruit Bunch. *Fermentation*. 7(4), 263. <https://doi.org/10.3390/fermentation7040263>.
- Muliarta, I. N., Sudita, I. D. N., & Situmeang, Y. P. (2023). The Effect of Eco-Enzyme Spraying on Suwung Landfill Waste, Denpasar, on Changes in Leachate Characteristics. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 15(1), 56–66. <https://doi.org/10.20473/jkl.v15i1.2023.56-66>
- Oreopoulou, Vasso, Winfried, R. (2006). Utilization of By-Products and Treatment of Waste in the Food Industry. *Springer eBooks*. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-35766-9>.
- Rahmadanti, M. S., Pramana, A., Okalia, D., & Wahyudi, W. (2020). Uji karakteristik kompos (pH, tekstur, bau) pada berbagai kombinasi Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dan kotoran sapi menggunakan mikroorganisme selulotik (MOS). *Jurnal Ilmiah Teknosains*, 5(2), 105–112. <https://doi.org/10.26877/jitek.v5i2.4717>.
- Rahmadi, R., Awaluddin, A., & Itnawita. (2014). Pemanfaatan limbah padat Tandan Kosong Kelapa Sawit dan tanaman pakis-pakistan untuk produksi kompos menggunakan aktivator EM-4. *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Riau*, 1(2), 9. Retrieved from <https://www.neliti.com/publications/189826/pe-manfaatan-limbah-padat-tandan-kosong-kelapa-sawit-dan-tanaman-pakis-pakistan-un>
- Rochyani, N., Utpalasar, R. L., & Dahliana, I. (2020). Analisis hasil konversi eco enzyme menggunakan nenas (*Ananas comosus*) dan pepaya (*Carica papaya* L.). *Jurnal Redoks*, 5(2), 135. <https://doi.org/10.31851/redoks.v5i2.5060>
- Salangsang, M. C. D., Sekine, M., Akizuki, S., Sakai, H. D., Kurosawa, N., & Toda, T. (2022). Effect of carbon to nitrogen ratio of food waste and short resting period on microbial accumulation during anaerobic digestion. *Biomass and Bioenergy*, 162, 106481. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106481>
- Santosa, S., Hassan, S. M., Kasim, H. A. (2023). Quality of an ecoenzyme and potential of its residues as composting bioactivator. *JPSL* 13(3): 417–424. <http://dx.doi.org/10.29244/jpsl.13.3.417-424>.
- Sari, R., Maryam, N., & Yusmah, R. A. (2023). Penentuan C-Organik pada tanah untuk meningkatkan produktivitas tanaman dan keberlanjutan umur tanaman dengan metoda spektrofotometri UV Vis. *JURNAL TEKNOLOGI PERTANIAN*, 12(1), 11–19. <https://doi.org/10.32520/jtp.v12i1.2598>
- Sumiyati, S., Priyambada, I. B., Zahra, S. a. F., Pradhana, D. R., Julianggara, M. I., Febriana, T. F., . . . Saputra, M. N. (2025b). Comparative analysis of composting with ecoenzymes and bioactivator MOL based on parameters of pH, temperature, and water content. *E3S Web of Conferences*, 605, 03054. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560503054>
- Triyadi., Chamsa., Yosi R., & Bambang T. (2015). Pengaruh tinggi tumpukan pada pengomposan tandan kosong kelapa sawit menggunakan pupuk organik aktif dari limbah cair pabrik kelapa sawit di dalam komposter menara drum. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 4(4), 25–31.

<https://doi.org/10.32734/jtk.v4i4.1510>.

Wu, Tianyi., Florian, W., Martin, W., Franz, B., Lingling, S., Michaela, A., Dippold., Carmen, H., & Carsten, W. M. 2024. Organic Carbon Loading of Soils Determines the Fate of Added Fresh Plant-derived Organic Matter. *G e o d e r m a . 4 4 3 , 1 1 6 8 1 6 .*

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116816>.

Wu, W., Li, P., Huang, L., Wei, Y., Li, J., Zhang, L., & Jin, Y. (2023). The role of lignin structure on cellulase adsorption and enzymatic hydrolysis. *B i o m a s s , 3 (1) , 9 6 – 1 0 7 .* <https://doi.org/10.3390/biomass3010007>