

Pembuatan Ekoenzim Berbasis Limbah Kulit Pisang (*Musa Paradisiaca*) secara Anaerob dan Aplikasinya pada Crude Palm Oil (CPO)

Yudi Romaito Rambe ^{1✉}, Zakwan ²

(1,2) Program Studi Teknologi Pengolahan Hasil Perkebunan, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sawit Indonesia, Medan, Indonesia

Abstrak: Tingginya kadar Asam Lemak Bebas (ALB) pada Crude Palm Oil (CPO) menjadi salah satu permasalahan utama dalam industri kelapa sawit karena dapat menurunkan mutu produk dan daya saing ekspor. Di sisi lain, limbah kulit pisang yang melimpah belum dimanfaatkan secara optimal, padahal mengandung berbagai senyawa bioaktif yang berpotensi digunakan sebagai bahan baku ekoenzim. Penelitian ini bertujuan untuk membuat ekoenzim berbasis limbah kulit pisang (*Musa paradisiaca*) melalui fermentasi anaerob serta mengevaluasi pengaruhnya terhadap penurunan kadar ALB dan kadar air pada CPO. Penelitian menggunakan metode eksperimen dengan Rancangan Acak Lengkap (RAL) nonfaktorial. Ekoenzim dibuat dengan rasio kulit pisang:molase:air sebesar 3:1:10 dan difermentasi selama 90 hari. Pengaplikasian ekoenzim pada CPO dilakukan dengan tiga perlakuan, yaitu 5 mL, 10 mL, dan 15 mL, masing-masing sebanyak tiga ulangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ekoenzim yang dihasilkan memiliki karakteristik pH 3,40, TDS 3.922 ppm, dan suhu 31°C. Kadar ALB awal CPO sebesar 26,47% berhasil diturunkan menjadi 14,83%, 12,75%, dan 10,69% pada perlakuan 5 mL, 10 mL, dan 15 mL. Uji statistik menunjukkan seluruh perlakuan berpengaruh nyata terhadap penurunan ALB ($p < 0,05$). Dengan demikian, ekoenzim berbasis limbah kulit pisang berpotensi menjadi alternatif ramah lingkungan dalam menurunkan kadar ALB pada CPO sekaligus mendukung pemanfaatan limbah organik secara berkelanjutan.

Abstract: High levels of free fatty acids (FFA) in crude palm oil (CPO) are one of the main problems in the palm oil industry because they can reduce product quality and export competitiveness. On the other hand, abundant banana peel waste has not been optimally utilized, even though it contains various bioactive compounds that have the potential to be used as raw materials for eco-enzymes. This study aims to produce ecoenzymes based on banana peel waste (*Musa paradisiaca*) through anaerobic fermentation and to evaluate their effect on reducing FFA and moisture content in CPO. The study employed an experimental design using a non-factorial Complete Randomized Design (CRD). The ecoenzyme was prepared using a banana peel:molasses:water ratio of 3:1:10 and fermented for 90 days. The ecoenzyme was applied to CPO in three treatments—5 mL, 10 mL, and 15 mL—each with three replicates. The results showed that the resulting ecoenzyme had a pH of 3.40, a TDS of 3,922 ppm, and a temperature of 31°C. The initial ALB content of CPO, which was 26.47%, was successfully reduced to 14.83%, 12.75%, and 10.69% in the 5 mL, 10 mL, and 15 mL treatments, respectively. Statistical analysis showed that all treatments had a significant effect on reducing ALB ($p < 0.05$). Thus, banana peel waste-based ecoenzymes have the potential to serve as an environmentally friendly alternative for reducing ALB levels in CPO while supporting the sustainable utilization of organic waste.

Article history:

Received: 23 June 2026

Revised: 17 July 2026

Accepted: 19 July 2026

Published: 21 July 2026

Kata kunci:

Ekoenzim, Kulit Buah Pisang, CPO, Asam Lemak Bebas (ALB/FFA), Fermentasi Anareob

Keyword:

Enzymes, Banana Peel, CPO, Free Fatty Acids (FFA), Anaerobic Fermentation

This is an open-access article under the [CC-BY-SA License](#).



How to cite: Rambe, Y. R., & Zakwan, Z. (2026). Pembuatan Ekoenzim Berbasis Limbah Kulit Pisang (*Musa Paradisiaca*) secara Anaerob dan Aplikasinya pada Crude Palm Oil (CPO). RESWARA: Jurnal Riset Ilmu Teknik, 4(3), 473–492. <https://doi.org/10.70716/reswara.v4i3.657>

PENDAHULUAN

Indonesia sebagai Negara produsen sawit terbesar di dunia dengan volume produksi bisa mencapai 43 juta ton pertahun. Tingginya produksi minyak sawit Indonesia merupakan peluang baru yang perlu dikembangkan di era globalisasi ini sehingga Indonesia dapat bersaing dengan pesaing utamanya. Namun, dalam pengolahan Crude Palm Oil (CPO) dipabrik kelapa sawit, sering kali dihadapi dengan masalah kualitas asam lemak bebas (FFA). Oleh karena itu dalam praktiknya banyak CPO yang dihasilkan memiliki kadar FFA yang lebih tinggi akibat berbagai faktor seperti penanganan pasca panen yang kurang tepat, waktu penyimpanan yang lama, serta proses pengolahan yang belum optimal (Azida & Yamin, 2023)

Kinerja ekspor CPO Indonesia lebih rendah dari Malaysia dan Thailand, hanya sejajar dengan Columbia. Hal ini terlihat dari indeks Revealed Comparative Advantage (RCA), di mana Indonesia hanya memperoleh nilai indeks RCA 0,98. Sedangkan Malaysia memiliki indeks RCA 1,04 dan Thailand 1,45. Hal ini berarti daya saing produk CPO Indonesia di pasar dunia lebih rendah dibandingkan Malaysia dan Thailand. CPO dengan FFA tinggi dijual dengan harga lebih rendah di pasar lokal. Misalnya, FFA >5% hanya bisa dijual dengan harga 20-30% lebih murah dibandingkan CPO super grade, Padahal Indonesia merupakan pemasok terbesar CPO dunia saat ini. Salah satu aspek penting dalam standar kualitas ini adalah kadar asam lemak bebas (ALB) dalam CPO. Menurut BSN, kadar ALB dalam minyak sawit mentah tidak boleh melebihi 5%. CPO dengan FFA >3,5% hanya memenuhi standar pasar lokal dan tidak bisa diekspor ke negara dengan regulasi ketat seperti India, Pakistan, dan Uni Eropa (Hartoyo et al., 2023)

Tingginya Kadar Asam Lemak Bebas (ALB) dalam minyak goreng terbukti mengurangi kualitas minyak dan makanan yang dihasilkan, serta memberikan berbagai dampak negatif terhadap kesehatan masyarakat. Minyak goreng yang memiliki ALB tinggi umumnya berasal dari pemakaian berulang atau proses pengolahan yang tidak optimal, sehingga memicu reaksi hidrolisis dan oksidasi yang menghasilkan zat berbahaya seperti aldehida, akrolein, dan polimerisasi minyak. Mengonsumsi makanan yang dimasak dengan minyak beresiko tinggi bisa menghasilkan bau tidak sedap, mengubah rasa, warna, dan tekstur makanan, serta mengurangi kandungan gizi. Asam lemak bebas muncul akibat proses oksidasi dan hidrolisis enzim selama fase pengolahan serta penyimpanan. Dalam produk makanan, maupun nonproduk, keberadaan asam lemak yang lebih tinggi dari berat lemak dapat beracun bagi tubuh. Penelitian mengenai keberadaan Faktor makanan yang berpengaruh terharacun dalam minyak yang dipanaskan telah dilakukan secara intensif (Mahmudah & Nopiyanti, 2019).

Di sisi lain, Indonesia juga menghadapi permasalahan pengelolaan limbah organik, termasuk limbah pertanian dan agroindustri. Kulit pisang (*Musa paradisiaca*) merupakan salah satu limbah organik yang dihasilkan dalam jumlah besar dari industri pengolahan buah pisang untuk produk makanan, pupuk, dan lainnya. Data dari Kementerian Pertanian (2022) menunjukkan produksi pisang di Indonesia mencapai 142.623 ton pada tahun 2021, dengan estimasi 15-30% dari bobot total berupa kulit yang umumnya dibuang tanpa pengolahan lebih lanjut. Kulit pisang mengandung berbagai senyawa bioaktif yang bermanfaat seperti enzim alami yang memiliki potensi untuk dimanfaatkan Kembali, sehingga memiliki nilai tambahan (Dhavesia, 2015).

Menghadapi masalah ini, berbagai upaya penurunan FFA terus dikembangkan, salah satunya melalui pemanfaatan eco-enzim. Eco-enzim, yang dihasilkan dari fermentasi limbah organik seperti buah-buahan, mengandung berbagai enzim seperti protease, lipase, dan amilase yang berpotensi

mempercepat dekomposisi bahan organik dan mengubah struktur kimia minyak. Pemanfaatan eco-enzim berbasis buah sawit restan menjadi inovasi menarik, karena selain mengurangi limbah, juga menawarkan solusi ramah lingkungan dalam menurunkan kadar FFA pada CPO (Elmitra, 2021).

Eco enzyme pertama kali diperkenalkan oleh Dr. Rusukon Poompanvong dari Thailand lebih dari 30 tahun yang lalu. Pada pembuatan ekoenzim dapat menggunakan beberapa sisa limbah organik seperti limbah kulit buah, ampas buah, atau limbah sayuran. Ekoenzim memiliki kelebihan seperti bahan baku yang mudah didapatkan, mengurangi sampah rumah tangga karena bahan untuk membuat ekoenzim ini berasal dari limbah rumah tangga yang kemudian difermentasikan. Beliau secara efektif meneliti bagaimana mengelola sisa bahan dapur yang tidak berguna menjadi enzim yang ramah lingkungan dan bermanfaat. Eco enzyme merupakan enzim yang dihasilkan dari proses fermentasi bahan-bahan alami, seperti protein tumbuhan, mineral dan hormon (Asmaniya & Siti muslikah, 2021).

Salah satu cara untuk mengolah sampah organik adalah dengan membuat eco enzyme dari bahan Eco enzyme adalah hasil dari penelitian Dr. Rosukon Poompanvong pada tahun 1980-an dan Dr. Joean Oon, seorang peneliti naturopati dari Malaysia, mengembangkan konsep pengolahan sampah organik melalui pembuatan eco enzyme lebih lanjut. Prinsip proses pembuatan eco-enzyme sendiri sebenarnya mirip proses pembuatan kompos, namun ditambahkan air sebagai media pertumbuhan sehingga produk akhir yang diperoleh berupa cairan yang lebih disukai karena lebih mudah digunakan dan mempunyai banyak manfaat. Nah pada penelitian ini digunakan pembuatan ekoenzim dengan fermentasi secara anaerob karena memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan fermentasi aerob, di antaranya adalah efisiensi energi yang lebih tinggi, produksi gas metana yang dapat dimanfaatkan sebagai energi terbarukan, serta kemampuan dalam menghasilkan berbagai enzim hidrolisis yang berperan penting dalam degradasi senyawa kompleks. Dalam kondisi anaerob, mikroorganisme fakultatif anaerob dan obligat anaerob akan mendominasi proses fermentasi, menghasilkan berbagai enzim termasuk lipase yang berpotensi untuk mendegradasi asam lemak bebas dalam CPO (Harahap et al., 2021).

Meskipun berbagai studi telah mengeksplorasi reduksi FFA dan pembuatan ekoenzim, terdapat kekosongan riset (research gap) dan keterbatasan mendasar pada penelitian terdahulu. Riset oleh Harahap et al. (2021) masih mengandalkan proses esterifikasi kimiawi menggunakan katalis asam sulfat yang berisiko meninggalkan residu asam anorganik berbahaya bagi kesehatan. Sementara itu, kajian biokatalis ramah lingkungan oleh Elmitra (2021) menggunakan basis buah sawit restan yang kurang efektif secara ekonomi karena masih berada dalam satu komoditas sawit. Di sisi lain, riset-riset pemanfaatan limbah kulit pisang (*Musa paradisiaca*) sejauh ini hanya terbatas dikembangkan sebagai insektisida nabati (Agustin & Pratami, 2025) atau agen antimikroba (Salsabila et al., 2024), dan belum pernah diuji efektivitas biokatalis multi-enzimnya (amilase, peroksidase, selulase, dan lipase alami) secara spesifik untuk menurunkan kadar ALB pada CPO rusak (high-acid CPO). Oleh karena itu, kebaruan (novelty) dari penelitian ini terletak pada pemanfaatan ekoenzim berbasis limbah padat kulit pisang (*Musa paradisiaca*) murni yang diproses secara fermentasi anaerob selama 90 hari untuk diaplikasikan sebagai agen biokatalisator reesterifikasi interfasiyal pada CPO. Perbedaan mendasar penelitian ini dengan penelitian terdahulu meliputi:

1. Jenis Substrat Ekoenzim: Berbeda dengan Elmitra (2021) yang menggunakan buah sawit restan, penelitian ini memanfaatkan limbah padat kulit pisang, sehingga memberikan jalur pemanfaatan limbah lintas-komoditas pertanian yang optimal.

2. Mekanisme Penurunan ALB: Menghindari penggunaan asam anorganik kuat yang korosif seperti pada metode Harahap et al. (2021), melainkan mengandalkan aksi enzim lipase mikrobial terlarut dan asam organik alami untuk merekatkan kembali asam lemak bebas menjadi trigliserida.
3. Kombinasi Parameter Evaluasi: Selain mengevaluasi efektivitas penurunan kadar ALB, penelitian ini menggunakan pendekatan metodologi Rancangan Acak Lengkap (RAL) non-faktorial untuk menguji secara simultan dampak variasi volume ekoenzim (5 mL, 10 mL, dan 15 mL) terhadap fluktuasi parameter kadar air pada CPO pasca-inkubasi.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuat ekoenzim berbasis limbah kulit pisang melalui fermentasi anaerob serta mengevaluasi pengaruhnya secara signifikan terhadap perbaikan mutu CPO rusak melalui parameter penurunan kadar ALB dan dinamika kadar air. Riset ini diharapkan mampu menyediakan alternatif solusi teknologi hijau (green technology) yang berkelanjutan bagi industri kelapa sawit menuju pencapaian konsep zero-waste.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Mutu, Institut Teknologi Sawit Indonesia. Dimana, penelitian ini berlangsung pada bulan November 2025 – Januari 2026.

Rancangan Penelitian

Pada penelitian yaitu menggunakan metode Eksperimental dengan design penelitian Rancangan Acak Lengkap (RAL) Non Faktorial dengan satu faktor yaitu volume ekoenzim pada CPO menggunakan 3 level perlakuan. Adapun variabel yang dianalisis yaitu (Kadar Air dan Kadar ALB), dilakukan sebanyak 3 kali pengulangan. Analisa dilakukan terhadap CPO yang telah di beri perlakuan ekoenzim.

Bahan dan Alat yang digunakan dalam penelitian :

Adapun bahan dan alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Bahan yang digunakan seperti Limbah kulit Pisang, CPO (Diperoleh dari PKS PTPN IV SOSA), Air, Molases, NaOH, Alkohol, Indikator Fenolflatin dan Enzim Starter (Ekoenzim yang sudah jadi).
2. Alat yang digunakan seperti Tong/Toples, Selang, Neraca analitik, Buret, Erlenmeyer, Labu ukur, Pipet tetes, Spatula, Oven, pH meter, dan TDS meter

Variabel Penelitian

Untuk melakukan penelitian ini variabel yang digunakan terdiri atas dua variabel yaitu variabel bebas dan terikat. Pada penelitian ini Variabel Bebas adalah Volume, Sedangkan variabel yang terikat adalah Kadar Air (Analisa Mutu CPO), Kadar ALB (Analisa Mutu CPO), TDS (Analisa Mutu Ekoenzim), pH (Analisa Mutu Ekoenzim).

Tahapan Penelitian

- a. Pembuatan Ekoenzim
 - Bahan organik diiris kecil-kecil.

- Menggabungkan bahan organik, molase, dan air dengan rasio 3:1:10 (contohnya 300g bahan organik: 100g molase: 1000ml air).
 - Campuran ditempatkan dalam toples atau tong, dan tutup dengan baik agar terbentuk kondisi anaerob.
 - Fermentasi selama 90 hari (3 bulan), perhatikan perubahan pH, warna, dan aroma secara rutin.
 - Wadah disimpan ditempat yang sejuk dan kering selama 2-3 bulan (Sutrisnawati et al., 2022).
- b. Pengaplikasian Ekoenzim pada CPO
- Gabungkan ekoenzim ke dalam sampel CPO dengan variasi konsentrasi (contohnya 5 %, 10 %, 15 %).
 - Lakukan proses pencampuran dan inkubasi pada temperatur dan durasi yang spesifik (Arianti & Rachmanto, 2025).
- c. Analisa Kadar ALB pada CPO :
- Persiapan Sampel : Timbang sampel CPO sebanyak 3-5 gram dan masukkan ke dalam labu erlenmeyer.
 - Penambahan Pelarut dan Indikator : Tambahkan alkohol 96 % atau isopropil alkohol sekitar 20-50 ml dan beberapa tetes indikator fenolftalein atau thymol blue.
 - Titrasi : Titrasi larutan sampel dengan larutan basa standar KOH (sekitar 0,1 titrasi) secara bertahap, hingga terjadi perubahan indikator (titik akhir titrasi), biasanya menjadi warna jingga atau kehijauan.
 - Catat Volume Larutan basa yang digunakan untuk mencapai titik akhir titrasi (Nurfiqih et al., 2021).
 - Perhitungan Kadar ALB Menggunakan Rumus Berikut Ini :

$$\text{Kadar ALB (\%)} = \frac{V \times N \times M}{W} \times 100\%$$

Penjelasan:

V="volume larutan basa (ml)"

N="normalitas larutan basa (eq/L)"

M="berat molekul asam oleat (g/mol)"

W="berat sampel (gram)"

- d. Analisa Kadar Air pada CPO :

- Persiapan alat dan bahan : Siapkan breaker glass atau cawan porselen yang bersih dan kering, neraca analitik, oven, dan desikator.
- Pemanasan breaker atau cawan : Panaskan breaker atau cawan porselen pada suhu sekitar 105°C untuk menghilangkan kelembaban yang mungkin menempel, kemudian dinginkan dalam desikator dan timbang untuk mendapatkan berat awal (W0).
- Penimbangan sampel: Masukkan sampel CPO sebanyak 10 gram ke dalam beaker/cawan yang sudah ditimbang, lalu timbang kembali untuk mendapatkan berat total (W1).

- Pemanasan sampel: Panaskan beaker berisi sampel dalam oven pada suhu 105°C selama sekitar 30 menit hingga air dalam sampel menguap sempurna (ditandai dengan tidak adanya gelembung udara/bubble).
- Pendinginan: Setelah pemanasan, dinginkan beaker berisi sampel dalam desikator selama ± 15 menit agar tidak menyerap uap air dari udara.
- Penimbangan akhir: Timbang kembali beaker beserta sampel setelah pendinginan untuk mendapatkan berat akhir (W_2) (Nurfiqih et al., 2021).
- Perhitungan kadar air: Hitung kadar air (%) menggunakan rumus:

$$\text{Kadar Air (\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1 - W_0} \times 100\%$$

Penjelasan:

W_1 ="berat cawan kosong"

W_2 ="berat cawan + sampel sebelum pemanasan"

W_3 ="berat cawan + sampel setelah pemanasan"

Tabel 1. Analisa Mutu CPO Hasil Pengaplikasian Ekoezim

Ekoezim (ml)	Mutu CPO Hasil Analisa (Rata-rata)	
	ALB	Air
5 ml	14,83%	0,31%
10 ml	12,75%	0,37%
15 ml	10,69%	0,41%

- e. Analisa pH pada Sampel :
 - Persiapan Sampel : Ambil sedikit sampel ekoezim dan tempatkan dalam wadah bersih.
 - Pengukuran pH: Celupkan elektroda pH meter ke dalam sampel ekoezim. Tunggu hingga angka pada layar pH meter stabil.
 - Pencatatan Hasil: Catat nilai pH yang terbaca. Lakukan pengukuran berulang untuk mendapatkan nilai rata-rata (Arianti & Rachmanto, 2025).
- f. Pengujian TDS pada Sampel :
 - Persiapan Alat dan Sampel: Siapkan TDS meter yang sudah bersih dan wadah berisi air sampel yang akan diuji.
 - Kalibrasi TDS Meter: Kalibrasi alat menggunakan larutan standar TDS sesuai petunjuk produsen agar hasil pengukuran akurat.
 - Pengukuran: Nyalakan TDS meter dan celupkan sensor ke dalam sampel air hingga terendam sekitar 2-3 cm. Pastikan sensor tidak menyentuh sisi atau dasar wadah.
 - Menunggu Pembacaan Stabil: Tunggu beberapa detik sampai angka pada layar TDS meter stabil.
 - Mencatat Hasil: Catat nilai TDS yang muncul, biasanya dalam satuan ppm (parts per million) (Salsabila et al., 2024).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik CPO (Crude Palm Oil) Sebelum Ditambahkan Ekoenzim

Sebelum dilakukan pengaplikasian ekoenzim, analisis awal Crude Palm Oil (CPO) dilakukan untuk mengetahui kondisi bahan uji. Parameter yang diamatin meliputi Free Fatty Acid (FFA) dan kadar air. Hasil analisis dibandingkan dengan Standar Nasional Indonesia SNI 01-2901-2021).

Tabel 2. Karakteristik CPO Sebelum Penambahan Ekoenzim

No.	Parameter	Hasil Analisis	Standar SNI 01-2901-2021
1.	FFA (Asam Lemak Bebas)	26,47%	Maks. 5.00%
2.	Kadar Air	0,25%	Maks. 0,25%

CPO yang digunakan dalam penelitian ini memiliki nilai FFA awal sebesar 26,47% dan kadar air awal sebesar 0,25%. Nilai FFA sebesar 26,47% menunjukkan bahwa CPO yang digunakan tergolong dalam kualitas yang belum memenuhi standar mutu CPO ekspor. Menurut Standar Nasional Indonesia (SNI 01-2901-2021), kadar FFA CPO yang baik tidak melebihi 5,00%. Tingginya FFA ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain proses pemanenan TBS (Tandan Buah Segar) yang terlambat, kontaminasi bakteri lipolitik, kerusakan mekanis pada buah sawit, kondisi penyimpanan yang kurang baik serta tempat pengambilan CPO yang akan digunakan.

Dengan nilai FFA awal 46,47% dan kadar air 0,25% sebagai baseline, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan ekoenzim dalam menurunkan kedua parameter tersebut pada variasi konsentrasi 20%, 25%, dan 30%.

Karakteristik Ekoenzim Selama Proses Fermentasi 90 Hari

Ekoenzim yang digunakan dalam penelitian ini dibuat dari limbah kulit pisang (Musa Paradisiaca.) melalui proses fermentasi anaerob selama 90 hari dengan penambahan molases sebagai sumber karbon. Perubahan warna dari coklat muda menjadi coklat gelap yang terjadi secara selama 90 hari disebabkan oleh reaksi Maillard antara gula dan asam amino selama fermentasi yang semakin matang dan khas mengidentifikasi akumulasi asam-asam organik volatil yang semakin kompleks seiring dengan bertambahnya waktu fermentasi. Pada hari ke-90, ekoenzim dipanen dengan cara disaring menggunakan kain saring halus untuk memisahkan residu padat.

Ekoenzim yang telah difermentasi selama 90 hari yang sudah dipanen kemudian dianalisa secara komprehensif untuk mengetahui kualitasnya sebelum diaplikasikan pada CPO. Berikut tabel ekoenzim kulit pisang yang dihasilkan setelah dianalisis selama 90 hari :

Tabel 3. Karakteristik Ekoenzim yang dihasilkan

Parameter	Hasil Analisis	Standar SNI
pH	3,40	3,0 – 4,0 (SNI 7763:2018)
TDS	3922 ppm	1000 – 5000 ppm (Rujukan Karakteristik Ekoenzim)
Suhu	31°C	25 – 35°C (Suhu Fermentasi Optimal)

Karakteristik fisikokimia sebagai berikut: nilai pH sebesar 3,40; TDS sebesar 3922 ppm; dan suhu pengukuran sebesar 31°C. Karakteristik tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor selama proses

fermentasi. Nilai pH 3,40 yang bersifat asam kuat merupakan hasil dari aktivitas bakteri asam laktat (BAL) dan bakteri asam asetat yang menghasilkan asam organik seperti asam laktat dan asam asetat sebagai produk akhir metabolisme fermentasi anaerob. Kandungan gula molase sebagai substrat utama difermentasi oleh mikroorganisme menjadi etanol, yang selanjutnya dioksidasi oleh *Acetobacter* sp. menjadi asam asetat, sehingga menurunkan pH larutan secara signifikan. Nilai pH ini sesuai dengan standar ekoenzim berkualitas baik (pH 3,0–4,0) yang menunjukkan proses fermentasi berjalan optimal (Papriani et al., 2024).

Nilai TDS sebesar 3922 ppm mencerminkan tingginya kandungan total padatan terlarut dalam ekoenzim, yang merupakan akumulasi dari senyawa-senyawa hasil fermentasi seperti asam organik, mineral, gula sisa, senyawa fenolik dari kulit pisang, dan enzim-enzim yang terlarut. Semakin banyak bahan organik yang terfermentasi, semakin tinggi pula nilai TDS yang dihasilkan. Tingginya TDS ini mengindikasikan bahwa ekoenzim kaya akan senyawa bioaktif yang berpotensi berperan dalam proses penurunan kadar ALB pada CPO. Suhu pengukuran 31°C berada dalam kisaran optimal untuk aktivitas enzim dan pertumbuhan mikroorganisme mesofilik yang berperan dalam fermentasi ekoenzim (25–35°C), sehingga kondisi fermentasi berlangsung secara efektif. Secara keseluruhan, karakteristik ekoenzim yang dihasilkan memenuhi kriteria ekoenzim yang baik dan siap diaplikasikan sebagai agen bioaktif dalam pengolahan CPO (Jondra et al., 2022).

Hasil Pengamatan Fisik Ekoenzim

Selain karakteristik fisikokimia secara kuantitatif, pengamatan fisik terhadap ekoenzim juga dilakukan secara visual (organoleptik) selama proses fermentasi berlangsung. Pengamatan ini dilakukan setiap bulan selama tiga bulan (90 hari) untuk memantau perkembangan dan perubahan kondisi ekoenzim, meliputi parameter warna, aroma/bau, tekstur/kejernihan, dan keberadaan endapan. Pengamatan fisik secara berkala ini penting untuk memastikan proses fermentasi berjalan normal dan mendeteksi kemungkinan adanya kontaminasi. Hasil pengamatan fisik ekoenzim kulit pisang selama 90 hari fermentasi disajikan pada tabel berikut ini.

Tabel 4. Hasil Pengamatan Fisik Ekoenzim

Parameter Fisik	Bulan ke-1 (Hari 1–30)	Bulan ke-2 (Hari 31–60)	Bulan ke-3 (Hari 61–90)
Warna	Kuning kecoklatan; gelembung CO ₂ aktif; aroma alkohol muda; permukaan berbusa	Coklat kemerahan; gelembung berkurang; aroma asam meningkat; warna menggelap	Coklat gelap kehitaman; cairan mulai jernih; aroma asam cuka khas ekoenzim matang
Aroma / Bau	Aroma fermentasi segar, sedikit asam, khas pisang	Aroma asam semakin kuat, bau alkohol berkurang, mulai berbau cuka	Aroma asam asetat dominan (cuka), khas ekoenzim matang
Tekstur / Kejernihan	Keruh, banyak partikel melayang, belum terpisah	Mulai agak jernih, partikel mengendap sebagian	Relatif jernih di bagian atas, endapan terpisah jelas di dasar
Parameter Fisik	Bulan ke-1 (Hari 1–30)	Bulan ke-2 (Hari 31–60)	Bulan ke-3 (Hari 61–90)
Endapan	Endapan banyak, bahan organik belum terurai sempurna	Endapan berkurang, sebagian bahan organik terurai	Endapan sedikit dan padat di dasar, cairan atas jernih

Kesimpulan Umum	Fermentasi awal aktif; pH mulai turun; aktivitas mikroba tinggi	Fermentasi pertengahan; pH stabil; enzim mulai terbentuk optimal	Ekoenzim matang; pH 3,40; TDS 3922 ppm; siap diaplikasikan
-----------------	---	--	--

Berdasarkan tersebut (Hasil Pengamatan Fisik Ekoenzim), terlihat perubahan karakteristik fisik ekoenzim kulit pisang secara bertahap selama 90 hari fermentasi anaerob. Pada bulan pertama (Hari 1-30), warna ekoenzim tampak kuning kecoklatan dengan banyak gelembung CO₂, menunjukkan aktivitas fermentasi awal yang intens di mana bakteri dan ragi aktif memfermentasi gula dari molase. Aroma yang tercium pada tahap ini masih segar dan sedikit asam dengan khas pisang, yang merupakan tanda bahwa fermentasi alkohol baru berlangsung. Cairan masih keruh dengan banyak partikel organik melayang dan endapan belum terpisah, mengindikasikan kulit Pisang belum sepenuhnya terdekomposisi. Pada bulan kedua (Hari 31-60), warna berubah menjadi coklat kemerahan, gelembung berkurang, dan aroma asam menguat dengan berkurangnya bau alkohol. Hal ini menandakan terjadinya transisi dari fermentasi alkohol ke produksi asam organik, terutama asam asetat oleh *Acetobacter* sp. Cairan mulai agak jernih dengan partikel mengendap sebagian, menunjukkan degradasi bahan organik yang semakin sempurna. Pada bulan ketiga (Hari 61-90), ekoenzim telah mencapai kematangan dengan warna coklat gelap kehitaman dan cairan bagian atas yang relatif jernih. Aroma asam asetat (cuka) mendominasi sebagai tanda ekoenzim telah matang. Endapan sedikit dan padat di dasar wadah, sementara cairan atas jernih mengandung enzim dan senyawa bioaktif siap pakai. Perubahan karakteristik ini berjalan sesuai dengan pola fermentasi ekoenzim yang dilaporkan dalam literatur, di mana pH akhir 3,40 dan TDS 3922 ppm mengkonfirmasi kualitas ekoenzim yang optimal untuk aplikasi pengolahan CPO (Papriani et al., 2024)

Pengaruh Penambahan Ekoenzim Terhadap Kadar FFA Pada CPO (Crude Palm Oil)

Asam Lemak Bebas (FFA – Free Fatty Acids) merupakan utama penentu kualitas CPO. Kadar FFA yang tinggi menunjukkan terjadinya kerusakan minyak akibat proses hidrolisis dan oksidasi yang tidak diinginkan. Mekanisme penurunan FFA oleh ekoenzim terjadi melalui aksi asam organik (terutama asam asetat dan asam laktat) yang mengkatalisis reaksi esterifikasi. Kembali asam lemak bebas menjadi trigliserida. Selain itu, enzim lipase yang dihasilkan selama fermentasi juga berperan dalam menyeimbangkan reaksi hidrolisis-esterifikasi pada minyak. Batas maksimum FFA pada CPO Pengaruh standar ekspor menurut SNI 01-2901-2021 adalah sebesar 5%. Sampel CPO yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kadar FFA awal sebesar 26,47%. Hasil pengukuran kadar FFA CPO setelah penambahan ekoenzim pada berbagai konsentrasi dengan tiga kali pengulangan disajikan pada tabel ini.

Tabel 5. Pengaruh Penambahan Ekoenzim Kulit Pisang Terhadap Kadar FFA Pada CPO

Konsentrasi ekoenzim	Ulangan 1 FFA (%)	Ulangan 2 FFA (%)	Ulangan 3 FFA (%)	Rata-rata FFA (%)	Penurunan (%)
CPO Awal	26,47%	26,47%	26,47%	26,47%	-
10%	15,37%	14,87%	14,25%	14,83%	11,64%
20%	13,89%	12,36%	12%	12,75%	13,72%
30%	11,48%	10,97%	9,63%	10,69%	15,78%

Berdasarkan Tabel tersebut penambahan ekoenzim kulit pisang dengan dosis 5 ml, 10 ml, dan 15 ml semuanya berhasil menurunkan kadar ALB pada CPO dari angka awal sebesar 26,47%. Perlakuan dengan dosis 15 ml memberikan hasil terbaik dengan rata-rata kadar ALB turun menjadi 10,69%, artinya terjadi penurunan sebesar 15,78% dari kadar awal. Untuk dosis 5 ml dan 10 ml, penurunan yang terjadi masing-masing sebesar 11,64% dan 13,72%.

Pola ini menunjukkan bahwa semakin banyak ekoenzim yang ditambahkan, semakin besar penurunan kadar ALB yang dihasilkan. Hal ini karena enzim-enzim yang ada di dalam ekoenzim, seperti enzim lipase dari kulit Pisang, bekerja mengubah asam lemak bebas kembali menjadi lemak normal. Sederhananya, semakin banyak ekoenzim yang digunakan, semakin banyak asam lemak bebas yang bisa diubah sehingga kualitas CPO semakin membaik (Agustin & Pratami, 2025).

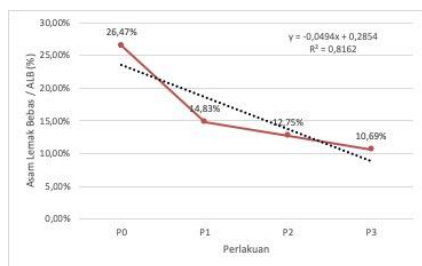
Walaupun ekoenzim berhasil menurunkan kadar ALB pada semua perlakuan, hasil terbaik sekalipun yaitu 10,69% pada dosis 15 ml masih jauh di atas standar maksimum yang diperbolehkan oleh SNI 01-2901-2021 sebesar 5%, dan juga di atas syarat ekspor ke Eropa yang umumnya tidak boleh lebih dari 3,5%. Ini terjadi karena CPO yang digunakan dalam penelitian ini memang sudah sangat rusak sejak awal dengan kadar ALB awal mencapai 26,47%, sehingga ekoenzim saja belum cukup untuk memperbaikinya sampai ke standar yang diinginkan. Untuk mencapai kadar ALB di bawah 5%, perlu dikombinasikan dengan cara pengolahan lain atau dilakukan pengulangan perlakuan beberapa kali (Salsabila et al., 2024).

Mekanisme utama penurunan ALB oleh ekoenzim kulit pisang berlangsung melalui proses reesterifikasi enzimatis, yaitu suatu reaksi di mana asam lemak bebas yang sebelumnya terlepas dari molekul trigliserida akibat proses hidrolisis, kembali direkatkan ke dalam struktur gliserida oleh aktivitas enzim lipase yang terkandung dalam ekoenzim. Dalam kondisi sistem dua fasa antara minyak dan larutan ekoenzim yang bersifat asam, enzim lipase mikrobial yang berasal dari aktivitas *Lactobacillus* sp. dan *Acetobacter* sp. selama fermentasi anaerob bekerja sebagai biokatalis pada antarmuka minyak-air. Enzim ini mengkatalisis reaksi kondensasi antara gugus karboksil (-COOH) dari asam lemak bebas dengan gugus hidroksil (-OH) dari molekul gliserol atau monogliserida yang tersedia, sehingga membentuk kembali digliserida atau trigliserida. Proses inilah yang secara langsung mengurangi jumlah molekul asam lemak bebas terukur dalam CPO dan menghasilkan penurunan nilai ALB yang terdeteksi secara analitis (Agustin & Pratami, 2025).

Selain mekanisme reesterifikasi, penurunan ALB juga didukung oleh peran enzim amilase, peroksidase, dan selulase yang merupakan enzim protease sistein khas kulit pisang (Musa Paaradisiaca). Meskipun enzim yang terkandung pada kulit pisang dikenal terutama sebagai enzim pemecah protein, dalam kondisi lingkungan asam yang kaya asam organik seperti pada ekoenzim, amilase mampu meningkatkan permeabilitas antarmuka minyak-air dengan cara memecah lapisan protein atau glikoprotein yang membungkus droplet minyak. Proses ini memperluas area kontak antara enzim lipase dan substrat asam lemak bebas dalam CPO, sehingga reaksi reesterifikasi dapat berlangsung lebih efisien. Mekanisme ini menjelaskan mengapa peningkatan dosis ekoenzim dari P1 (5 ml) ke P3 (15 ml) secara konsisten menghasilkan penurunan ALB yang semakin besar, karena jumlah enzim amilase, peroksidase, selulase dan lipase yang berinteraksi dengan CPO turut meningkat (Wikaningrum & Pratamadina, 2022).

Faktor pendukung lainnya yang berperan dalam penurunan ALB adalah kandungan asam organik dalam ekoenzim, khususnya asam asetat dan asam laktat. Asam-asam organik ini berfungsi sebagai ko-faktor yang menciptakan kondisi pH rendah (pH 3,40) yang optimal bagi aktivitas enzim lipase dan

Amilase. Selain itu, asam asetat yang dihasilkan oleh *Acetobacter* sp. selama fermentasi diketahui memiliki kemampuan untuk membentuk ester dengan asam lemak bebas melalui reaksi esterifikasi langsung (Fischer esterification analogue), menghasilkan senyawa ester volatil yang memiliki nilai asam lebih rendah dibandingkan asam lemak bebas asal. Proses ini secara kimiawi mengonversi sebagian molekul ALB menjadi bentuk ester yang tidak terdeteksi dalam pengujian titrasi ALB standar (SNI), sehingga turut menurunkan nilai ALB yang terukur (Jondra et al., 2022).



Gambar 1. Hubungan Dosis Vs Kadar Air

Grafik pada Gambar 4.1 memperlihatkan tren penurunan kadar ALB CPO yang konsisten dan searah dengan peningkatan dosis ekoenzim kulit Pisang yang diaplikasikan. Garis tren bergerak menurun secara tajam dari titik kontrol (ALB awal 26,47%) menuju P1 (5 ml; 14,83%), kemudian berlanjut menurun pada P2 (10 ml; 12,75%), dan mencapai titik terendah pada P3 (15 ml; 10,69%). Kemiringan (slope) garis antar titik P1–P2–P3 relatif stabil, mengindikasikan bahwa hubungan antara dosis ekoenzim dan penurunan ALB cenderung bersifat linier pada rentang dosis yang diujikan, tanpa tanda-tanda penurunan laju (plateau) yang berarti. Hal ini mengisyaratkan bahwa pada dosis 15 ml (P3), reaksi reesterifikasi enzimatis dan konversi ALB menjadi senyawa ester oleh asam organik belum mencapai titik jenuh, sehingga secara teoritis penurunan ALB masih berpotensi berlanjut apabila dosis ekoenzim ditingkatkan melebihi 15 ml.

Pengaruh Pengaruh Penambahan Ekoenzim Terhadap Kadar Air CPO

Kadar air merupakan salah satu parameter mutu penting dalam Crude Palm Oil (CPO) yang berpengaruh langsung terhadap stabilitas minyak selama penyimpanan. Keberadaan air dalam CPO dapat memicu reaksi hidrolisis trigliserida menjadi asam lemak bebas (FFA) dan gliserol, terutama bila disertai aktivitas enzim lipase. Menurut SNI 01-2901-2021, kadar air maksimum yang diizinkan dalam CPO adalah 0,25%. Kadar air CPO sebelum perlakuan tercatat sebesar 0,25%, yang masih dalam batas standar yang ditetapkan. Hasil pengukuran kadar air CPO setelah penambahan ekoenzim pada berbagai konsentrasi dengan tiga kali pengulangan disajikan pada tabel berikut:

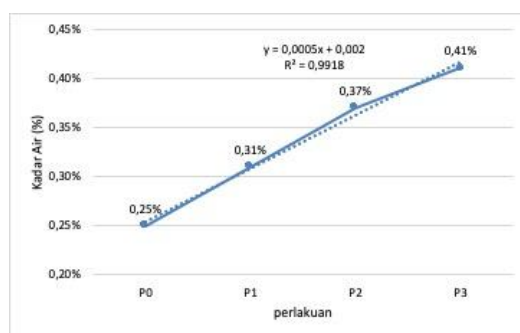
Tabel 6. Pengaruh Penambahan Ekoenzim Kulit Pisang Terhadap Kadar Air Pada CPO

Konsentrasi Ekoenzim	Ulangan 1 Kadar Air (%)	Ulangan 2 Kadar Air (%)	Ulangan 3 Kadar Air (%)	Rata-rata Kadar Air (%)
CPO Awal	0,25	0,25	0,25	0,25
10%	0,30	0,33	0,31	0,31
20%	0,37	0,38	0,36	0,37
30%	0,40	0,41	0,41	0,41

Berdasarkan data pada Tabel 4.5, hasil pengukuran kadar air CPO menunjukkan adanya peningkatan yang konsisten seiring dengan bertambahnya konsentrasi ekoenzim yang ditambahkan. Kadar air CPO kontrol (tanpa penambahan ekoenzim) tercatat sebesar 0,31% setelah penambahan ekoenzim pada perlakuan P1 (5 ml), 0,37% pada perlakuan P2 (10 ml), dan 0,41% pada perlakuan P3 (15 ml). Pola peningkatan ini menunjukkan hubungan yang searah antara volume ekoenzim yang ditambahkan dengan peningkatan kadar air CPO yang dihasilkan.

Peningkatan kadar air CPO yang terjadi pada seluruh perlakuan dapat dijelaskan melalui dua mekanisme utama. Pertama, peningkatan kadar air disebabkan oleh aktivitas enzimatis yang berlangsung selama proses inkubasi ekoenzim dengan CPO. Enzim-enzim aktif yang terkandung dalam ekoenzim kulit pisang, terutama amilase, peroksidase, dan amilase mengkatalisis reaksi penyusunan kembali (reesterifikasi) asam lemak bebas yang terdapat dalam CPO. Dalam reaksi esterifikasi tersebut, gugus karboksil (-COOH) dari asam lemak bebas bereaksi dengan gugus hidroksil (-OH) dari gliserol membentuk ikatan ester, dan sebagai produk sampingan dari reaksi ini dihasilkan molekul air (H_2O). Semakin tinggi konsentrasi ekoenzim yang ditambahkan, semakin aktif reaksi enzimatis yang terjadi, sehingga semakin banyak pula air yang dihasilkan sebagai produk samping reaksi tersebut. Hal ini menjelaskan mengapa kadar air CPO meningkat secara proporsional seiring dengan penambahan volume ekoenzim dari P1 hingga P3.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nilai kadar air seluruh perlakuan (0,31%–0,41%) melampaui batas maksimum yang ditetapkan oleh SNI 01-2901-2021, yaitu sebesar 0,25%. Kondisi ini perlu mendapat perhatian serius dalam penerapannya pada skala industri, karena kadar air yang tinggi dapat mempercepat reaksi hidrolisis trigliserida oleh enzim lipase sehingga justru berpotensi meningkatkan kembali kadar ALB yang telah berhasil diturunkan. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu mengeksplorasi metode pemisahan ekoenzim dari CPO yang lebih efektif, seperti penggunaan sentrifugasi berkecepatan tinggi, filtrasi membran, atau pengeringan vakum, untuk meminimalkan residu air dalam CPO setelah perlakuan ekoenzim. Pengembangan metode pemisahan yang lebih baik diharapkan dapat mempertahankan efektivitas penurunan ALB oleh ekoenzim sekaligus menjaga kadar air CPO tetap berada dalam batas standar mutu yang dipersyaratkan (Sipayung et al., 2023).



Gambar 2. Hubungan Dosis Ekoenzim Vs Kadar Air

Grafik pada Gambar 4.2 menunjukkan tren kenaikan kadar air CPO yang searah dan konsisten dengan peningkatan dosis ekoenzim kulit pisang. Garis tren bergerak naik dari titik kontrol (kadar air 0,25%) menuju P1 (5 ml; 0,31%), P2 (10 ml; 0,37%), hingga mencapai nilai tertinggi pada P3 (15 ml; 0,41%). Kenaikan paling tajam terjadi pada interval kontrol ke P1, sementara kenaikan pada interval P1–P2 dan P2–P3 relatif lebih landai, mengindikasikan adanya kecenderungan perlambatan laju

kenaikan (mendekati pola asimtotik) meskipun belum sepenuhnya membentuk plateau pada rentang dosis yang diujikan. Seluruh titik pada grafik, termasuk titik kontrol, berada di atas atau mendekati ambang batas maksimum SNI 01-2901-2021 sebesar 0,25%, dan ketiga titik perlakuan (P1, P2, P3) secara nyata melampaui ambang tersebut. Tren kenaikan yang searah dengan dosis ini konsisten dengan dua mekanisme yang telah dijelaskan, yaitu pembentukan air sebagai produk samping reaksi reesterifikasi enzimatis serta residu air dari ekoenzim akibat proses pemisahan manual yang belum optimal. Pola tren ini mengonfirmasi bahwa efektivitas penurunan ALB pada dosis yang lebih tinggi (P3) harus diimbangi dengan perhatian khusus terhadap risiko peningkatan kadar air yang juga semakin besar (Sutrisnawati et al., 2022).

Hasil Uji T Pengaruh Penambahan Ekoenzim terhadap Kadar ALB

Untuk mengetahui pengaruh penambahan ekoenzim kulit pisang terhadap penurunan kadar Asam Lemak Bebas (ALB) pada CPO, dilakukan analisis statistik menggunakan Uji T Sampel Independen (Independent Samples T-Test) pada taraf signifikansi $\alpha = 0,05$. Pengujian dilakukan secara berpasangan antara kelompok kontrol dengan masing-masing kelompok perlakuan (P1, P2, dan P3) untuk menentukan apakah perbedaan rata-rata kadar ALB yang teramati bersifat signifikan secara statistik. Hasil pengujian disajikan pada tabel berikut :

Tabel 7. Tabel Uji T Asam lemak Bebas

	Variable 1	Variable 2
Mean	26,47	12,8988888
Variance	0	3,54078611
Observations	9	9
Pearson Correlation	#DIV/0!	
Hypothesized Mean Differences	0	
Df	8	
t Stat	21,6364903	
P (T<=t) one-tail	1,09698E-08	
t Critical one-tail	1,85954803	
P (T<=t) two-tail	2,19395E-08	
t Critical two-tail	2,30600413	

Berdasarkan hasil uji-t berpasangan (Paired Two Sample for Means) yang ditampilkan pada tabel di atas, diperoleh nilai rata-rata (mean) kadar ALB kelompok kontrol (Variable 1) sebesar 26,47% dan rata-rata kadar ALB seluruh perlakuan ekoenzim (Variable 2) sebesar 12,90%. Nilai t-hitung yang diperoleh adalah 21,64, dengan nilai p (two-tail) sebesar $2,20 \times 10^{-5}$ (0,0000220). Nilai t-kritis dua arah pada $df = 8$ dan $\alpha = 0,05$ adalah 2,306.

Karena nilai t-hitung (21,64) > t-kritis (2,306) dan nilai p (0,0000220) < α (0,05), maka hipotesis nol (H_0 : tidak terdapat perbedaan nyata antara kadar ALB kontrol dan perlakuan ekoenzim) ditolak. Dengan demikian, hipotesis alternatif (H_1 : terdapat perbedaan nyata antara kadar ALB kontrol dan perlakuan ekoenzim) diterima. Hasil ini membuktikan secara statistik bahwa penambahan ekoenzim berbasis kulit buah pisang memberikan pengaruh yang signifikan terhadap penurunan kadar ALB pada CPO.

Hasil uji-t berpasangan ini menunjukkan adanya perbedaan yang sangat nyata antara nilai ALB sebelum dan sesudah perlakuan ekoenzim. Nilai t-hitung sebesar 21,64 yang jauh melampaui t-kritis 2,306 mengindikasikan bahwa penurunan kadar ALB yang terjadi bukan merupakan fluktuasi acak, melainkan dampak langsung dari aktivitas biokimiawi ekoenzim terhadap CPO. Secara teoritis, hal ini dapat dijelaskan melalui mekanisme kerja ganda ekoenzim kulit pisang yang melibatkan dua komponen enzimatis utama. Pertama, enzim amilase, peroksidase, dan selulase yang terkandung dalam ekoenzim berperan mengkatalisis pemecahan struktur kompleks makromolekul, termasuk membantu memecah ikatan intramolekular pada rantai asam lemak sehingga menurunkan konsentrasi FFA bebas dalam sistem (Zahira et al., 2023).

Kedua, enzim lipase yang turut hadir dalam ekoenzim bekerja pada antarmuka minyak-air melalui mekanisme aktivasi interfisial (lid-opening mechanism), yakni membuka situs aktif enzim ketika berkontak dengan permukaan hidrofobik minyak sehingga memungkinkan terjadinya reaksi reesterifikasi, yaitu penggabungan kembali asam lemak bebas dengan gliserol membentuk trigliserida (Elmitra, 2021).

Dari sisi konteks lapangan, CPO yang digunakan dalam penelitian ini merupakan CPO dengan kadar ALB awal yang sangat tinggi, yakni 26,47%, jauh melampaui standar SNI 01-2901-2021 (maksimum 5%). Kondisi ini mencerminkan bahwa substrat penelitian adalah minyak yang telah mengalami degradasi trigliserida secara masif akibat aktivitas lipase endogen selama penyimpanan buah restan yang tidak optimal (Purwanti et al., 2023).

Meskipun demikian, ekoenzim kulit pisang tetap mampu memberikan penurunan yang signifikan secara statistik pada seluruh perlakuan. Hal ini menunjukkan bahwa aktivitas enzimatis ekoenzim cukup kuat untuk bekerja bahkan dalam kondisi substrat yang sudah sangat terdegradasi. Fakta bahwa nilai p yang diperoleh ($2,20 \times 10^{-5}$) jauh lebih kecil dari ambang batas signifikansi $\alpha = 0,05$ semakin memperkuat kesimpulan bahwa hasil ini bukan kebetulan, melainkan konsekuensi nyata dari aktivitas biokimiawi ekoenzim terhadap fraksi ALB dalam CPO. Dengan demikian, penggunaan uji-t berpasangan pada penelitian ini berhasil mengonfirmasi hipotesis penelitian secara sah dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

Hasil Uji T Pengaruh Penambahan Ekoenzim Terhadap Kadar Air

Selanjutnya, untuk mengetahui pengaruh penambahan ekoenzim kulit pisang terhadap perubahan kadar air pada CPO, dilakukan pula analisis statistik menggunakan Uji T Sampel Independen (Independent Samples T-Test) pada taraf signifikansi $\alpha = 0,05$. Pengujian dilakukan secara berpasangan antara kelompok kontrol dengan masing-masing kelompok perlakuan (P1, P2, dan P3) untuk menentukan apakah peningkatan kadar air yang teramati pada setiap perlakuan berbeda secara signifikan terhadap kontrol. Hasil pengujian disajikan pada Tabel berikut.

Tabel 8. Tabel Uji T Kadar Air

	Variable 1	Variable 2
Mean	0,25	0,363333333
Variance	0	0,00175
Observations	9	9
Pearson Correlation	#DIV/0!	
Hypothesized Mean Differences	0	

Df	8
t Stat	-8,127554543
P (T<=t) one-tail	1,94808E-05
t Critical one-tail	1,859548038
P (T<=t) two-tail	3,89616E-05
t Critical two-tail	2,306004135

Berdasarkan hasil uji-t berpasangan (Paired Two Sample for Means) untuk parameter kadar air, diperoleh nilai rata-rata kadar air kontrol (Variable 1) sebesar 0,25% dan rata-rata kadar air perlakuan ekoenzim (Variable 2) sebesar 0,36%. Nilai t-hitung yang diperoleh adalah -8,12 (negatif menandakan bahwa rata-rata Variable 1 lebih kecil dari Variable 2, artinya kadar air perlakuan lebih tinggi dari kontrol), dengan nilai p (two-tail) sebesar $3,90 \times 10^{-6}$ (0,00000390). Nilai t-kritis dua arah pada df = 8 dan alfa = 0,05 adalah 2,306.

Karena nilai |t-hitung| (8,13) lebih besar dari t-kritis (2,306) dan nilai p (0,00000390) lebih kecil dari alfa (0,05), maka hipotesis nol (H_0 : tidak terdapat perbedaan nyata antara kadar air kontrol dan perlakuan ekoenzim) ditolak. Hipotesis alternatif (H_1 : terdapat perbedaan nyata antara kadar air kontrol dan perlakuan ekoenzim) diterima. Artinya, penambahan ekoenzim kulit Pisang secara statistik terbukti berpengaruh nyata terhadap peningkatan kadar air CPO.

Nilai t-hitung yang sangat besar secara absolut (8,13), bahkan lebih besar dari t-hitung ALB (2,306), mencerminkan bahwa perubahan kadar air CPO akibat penambahan ekoenzim berlangsung lebih konsisten dan seragam dibandingkan perubahan ALB. Dari sisi mekanisme, peningkatan kadar air ini dapat dijelaskan melalui dua jalur utama yang saling melengkapi. Jalur pertama bersifat kimiawi-enzimatis: reaksi reesterifikasi asam lemak bebas oleh enzim lipase dalam ekoenzim menghasilkan air (H_2O) sebagai produk sampingan. Dalam reaksi esterifikasi, gugus karboksil ($-COOH$) dari FFA bereaksi dengan gugus hidroksil ($-OH$) dari gliserol membentuk ikatan ester dan melepaskan satu molekul air. Semakin tinggi konsentrasi ekoenzim yang ditambahkan, semakin aktif reaksi ini berlangsung, sehingga semakin banyak air terbentuk sebagai produk samping (Hidayah et al., 2025). Pola ini selaras dengan data yang menunjukkan peningkatan kadar air yang searah dengan kenaikan konsentrasi ekoenzim dari P1 (0,31%), P2 (0,37%), hingga P3 (0,41%).

PEMBAHASAN

Analisis Baseline Karakteristik Awal CPO Sebelum Perlakuan

Sebelum menguji efektivitas intervensi biokatalis, analisis awal terhadap komponen mutu minyak sawit mentah (Crude Palm Oil) dilakukan untuk menetapkan nilai acuan awal penelitian. Parameter yang diukur secara cermat meliputi kadar asam lemak bebas (Free Fatty Acid/FFA) dan kadar air, yang kemudian dikomparasikan langsung dengan regulasi mutu nasional berbasis SNI 01-2901-2021. Dari pengujian laboratorium, CPO komersial yang diperoleh dari Pabrik Kelapa Sawit (PKS) PTPN IV Sosa terdeteksi memiliki kadar air awal yang sangat ideal dan memenuhi standar mutu, yaitu tepat sebesar 0,25%. Nilai ini berada pada ambang batas maksimum yang diizinkan oleh regulasi industri.

Namun, temuan kontras yang sangat ekstrem terlihat pada parameter Asam Lemak Bebas (ALB), di mana CPO baseline tersebut memiliki kadar ALB awal mencapai 26,47%. Kenyataan empiris ini mengindikasikan bahwa komoditas CPO yang dijadikan objek uji merupakan minyak kategori rusak berat (high-acid CPO) yang mutunya telah terdegradasi secara masif, jauh melampaui standar mutu

SNI maupun syarat ekspor global yang membatasi kadar ALB maksimal sebesar 5,00%. Pemicu utama lonjakan ALB yang destruktif ini berakar dari kombinasi faktor internal dan eksternal pasca-panen, seperti pemanenan Tandan Buah Segar (TBS) yang terlambat, tingginya persentase buah restan, kerusakan mekanis saat transportasi, serta paparan bakteri lipolitik endogen yang mempercepat reaksi hidrolisis ikatan ester gliserol selama penyimpanan awal di pabrik.

Karakteristik Fisikokimia dan Evaluasi Organoleptik Ekoenzim Matang

Ekoenzim biokatalis dalam riset ini berhasil disintesis memanfaatkan limbah padat kulit pisang (*Musa paradisiaca*) melalui jalur fermentasi anaerob murni selama 90 hari dengan bantuan pasokan karbon dari molases. Selama periode tiga bulan tersebut, pengamatan fisik organoleptik secara periodik memperlihatkan dinamika dekomposisi yang normal dan sehat. Pada fase bulan pertama (hari ke-1 hingga ke-30), sistem emulsi masih menampilkan warna kuning kecoklatan yang disertai pelepasan gelembung gas karbondioksida yang sangat aktif akibat tingginya metabolisme ragi dan bakteri pengurai gula. Pada fase awal ini, cairannya terpantau keruh dengan partikel kulit pisang yang melayang bebas, serta memancarkan aroma alkohol muda yang segar khas fermentasi awal.

Memasuki bulan kedua (hari ke-31 hingga ke-60), aktivitas pelepasan gas mulai mereda seiring dengan pergeseran dominasi mikroba ke arah bakteri asam organik. Cairan berubah warna menjadi coklat kemerahan dengan aroma asam cuka yang mulai menutupi bau alkohol, mengindikasikan konversi senyawa etanol menjadi asam asetat oleh *Acetobacter* sp. telah berjalan mantap. Kematangan sempurna dicapai pada bulan ketiga (hari ke-61 hingga ke-90) yang ditandai secara visual oleh warna cairan yang menggelap menjadi coklat tua kehitaman akibat adanya reaksi Maillard antara gugus gula sisa dan asam amino, cairan atas yang relatif jernih, serta endapan padat organik yang terpisah dan mengumpul secara kompak di dasar wadah. Selain itu, aroma asam asetat yang tajam dan menyengat menjadi indikator organoleptik utama bahwa ekoenzim telah matang sempurna dan siap diaplikasikan. Secara kuantitatif, analisis fisikokimia pada hari ke-90 menunjukkan bahwa ekoenzim kulit pisang ini memiliki nilai derajat keasaman (pH) akhir sebesar 3,40 pada suhu pengukuran optimal 31°C. Tingkat keasaman yang kuat ini masuk dalam rentang ideal regulasi cairan organik kompos (pH 3,0–4,0) dan menjadi bukti empiris keberhasilan Bakteri Asam Laktat (BAL) dalam mengekskresikan asam organik volatil. Nilai pH rendah ini sangat krusial karena bertindak sebagai pelindung alami yang membunuh mikroba pembusuk kontaminan. Di sisi lain, pembacaan instrumen terhadap Total Dissolved Solids (TDS) mencatatkan angka 3.922 ppm. Kelimpahan partikel terlarut yang tinggi ini mencerminkan kayanya kandungan senyawa bioaktif di dalam ekoenzim, mulai dari ion mineral, sisa gula, senyawa fenolik dari ekstrak kulit pisang, hingga akumulasi enzim ekstraseluler terlarut seperti amilase, peroksidase, selulase, dan lipase yang akan memegang peran sentral dalam merekayasa struktur kimia minyak sawit rusak.

Narasi Mekanisme Biokatalisis Penurunan Kadar Asam Lemak Bebas (ALB)

Setelah cairan ekoenzim diaplikasikan ke dalam sampel CPO rusak melalui tiga variasi volume perlakuan (5 mL, 10 mL, dan 15 mL) dengan tiga kali ulangan, hasil uji laboratorium menunjukkan adanya dampak reduksi ALB yang sangat nyata dan signifikan secara statistik ($p < 0,05$). Data empiris menunjukkan bahwa penambahan volume ekoenzim berbanding lurus dengan peningkatan kapasitas penurunan molekul asam lemak bebas. Dosis awal sebesar 5 mL mampu memangkas kadar ALB menjadi 14,83% (mengalami efisiensi penurunan 11,64%), sedangkan peningkatan dosis menjadi 10

mL berhasil menekan angka ALB lebih jauh ke posisi 12,75% (efisiensi penurunan 13,72%). Capaian pemurnian terbaik ditunjukkan oleh perlakuan volume tertinggi sebesar 15 mL, di mana kadar ALB awal CPO yang awalnya berada di angka kritis 26,47% berhasil ditekan secara drastis hingga tersisa hanya 10,69%, yang berarti mencetak efisiensi penurunan sebesar 15,78%.

Mekanisme biokimia yang mendasari fenomena reduksi ALB ini berjalan melalui dua jalur utama yang saling melengkapi. Jalur pertama dan yang paling dominan adalah reaksi reesterifikasi enzimatis. Di bawah pengaruh lingkungan dua fase (minyak-air) yang dikondisikan asam oleh ekoenzim, enzim lipase mikrobial hasil sekresi dari *Lactobacillus* sp. dan *Acetobacter* sp. selama fermentasi bekerja aktif pada area antarmuka hidrofobik. Enzim lipase ini mengalami mekanisme aktivasi interfase (lid-opening mechanism) sehingga situs aktifnya terbuka dan bertindak sebagai biokatalisator yang merekatkan kembali gugus karboksil (-COOH) pada asam lemak bebas dengan gugus hidroksil (-OH) dari molekul gliserol atau monogliserida yang tersedia dalam minyak rusak. Dampak dari pengikatan kembali ini adalah pembentukan struktur digliserida atau trigliserida baru, yang secara otomatis menurunkan konsentrasi fraksi asam lemak bebas terlarut saat diukur melalui titrasi standar alkali.

Jalur pendukung kedua melibatkan peran aktif dari enzim hidrolitik pembantu seperti amilase, peroksidase, dan selulase yang secara alami terkandung dalam jaringan kulit pisang (*Musa paradisiaca*). Meskipun enzim-enzim ini bukan pengurai lemak utama, keberadaannya sangat krusial dalam mendegradasi makromolekul pengotor, senyawa karbohidrat kompleks, serta lapisan glikoprotein yang menyelimuti droplet-droplet CPO. Hancurnya lapisan pelindung pengotor ini memperluas luas permukaan kontak spesifik antarmuka minyak, sehingga enzim lipase dapat berdifusi dan berinteraksi dengan molekul ALB secara jauh lebih efisien. Konsep sinergi multi-enzim ini didukung kuat oleh temuan terbaru dari Agustin dan Pratami (2025), yang menegaskan bahwa penambahan volume cairan biokimiawi organik secara terukur akan meningkatkan kepadatan populasi enzim aktif per satuan volume substrat, sehingga mempercepat konversi molekul target secara tuntas.

Selain itu, keberadaan asam organik volatil seperti asam asetat bertindak sebagai ko-faktor lingkungan yang menjaga stabilitas kinerja enzim pada pH rendah. Asam asetat ini juga memicu reaksi esterifikasi langsung secara kimiawi (Fischer esterification analogue), di mana sebagian molekul ALB diikat menjadi senyawa ester volatil baru yang tidak lagi terdeteksi sebagai komponen asam lemak bebas. Meski demikian, kajian ini juga memberikan catatan penting: sekalipun dosis 15 mL memberikan hasil reduksi ALB yang sangat signifikan hingga menyentuh 10,69%, hasil akhir ini belum mampu memenuhi standar maksimum SNI sebesar 5,00%. Hal ini selaras dengan analisis dari Salsabila et al. (2024), yang menjabarkan bahwa zat biokatalis alami memiliki ambang batas kejenuhan aktivitas tertentu ketika dihadapkan pada bahan baku yang telah mengalami tingkat kerusakan ekstrim di atas 20%, sehingga dalam implementasi industri memerlukan sistem pemurnian bertingkat (multi-stage processing) untuk mencapai standar ekspor komersial.

Narasi Efek Samping dan Dinamika Peningkatan Kadar Air CPO

Penerapan ekoenzim kulit pisang sebagai agen pemurni mutu ternyata membawa konsekuensi berupa anomali peningkatan pada parameter kadar air CPO pasca-perlakuan. Berdasarkan data hasil pengujian, kadar air minyak sawit mengalami kenaikan yang berbanding lurus secara konsisten dengan volume ekoenzim yang diinjeksikan. Dari nilai baseline awal CPO sebesar 0,25%, rata-rata kadar air merangkak naik menjadi 0,31% pada perlakuan volume 5 mL, kemudian meningkat ke angka 0,37% pada dosis 10 mL, dan mencapai titik tertinggi sebesar 0,41% pada perlakuan volume 15 mL. Seluruh

data akhir kadar air dari ketiga variasi perlakuan ini secara nyata telah melanggar batas maksimum aman yang ditetapkan oleh SNI 01-2901-2021, yaitu maksimal sebesar 0,25%.

Faktor pemicu kedua bersifat fisik, yaitu adanya residu air bawaan dari cairan ekoenzim itu sendiri. Mengingat air merupakan pelarut utama dalam pembuatan ekoenzim dengan rasio fermentasi 3:1:10, pemisahan secara manual pasca-inkubasi tanpa melibatkan instrumen mekanis canggih memicu terjadinya emulsi mikro yang stabil antara fraksi air sisa dengan fosfolipida bawaan CPO. Dari perspektif industri kelapa sawit, fenomena naiknya kadar air di atas ambang batas 0,25% ini merupakan ancaman serius yang harus diwaspadai. Sebagaimana diperingatkan oleh Sipayung, Titiaryanti, dan Astuti (2023), tingginya kandungan air bebas di dalam tangki penyimpanan CPO bertindak sebagai promotor autokatalisis hidrolisis sekunder. Keberadaan air tersebut berisiko mengaktifkan kembali enzim lipase endogen alami CPO yang akan memecah trigliserida kembali menjadi asam lemak bebas baru, sehingga berpotensi menaikkan kembali kadar ALB yang telah berhasil diturunkan sebelumnya.

Oleh karena itu, meskipun riset ini berhasil membuktikan secara sah bahwa ekoenzim berbasis limbah kulit pisang sangat potensial sebagai alternatif teknologi hijau (green technology) bernilai ekonomis tinggi menuju target zero-waste, aplikasinya pada skala pabrik kelapa sawit komersial wajib diintegrasikan dengan proses dehidrasi lanjutan pasca-perlakuan. Penggunaan teknologi pemisahan seperti sentrifugasi berkecepatan tinggi, filtrasi membran, atau pengeringan vakum (vacuum drying) pada suhu rendah mutlak diperlukan untuk mengeliminasi kelebihan kelembaban air bebas, sehingga efektivitas penurunan ALB dapat dipertahankan secara permanen tanpa merusak stabilitas daya simpan minyak sawit mentah.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilaksanakan mengenai pembuatan ekoenzim berbasis kulit pisang secara anaerob dan pengaplikasiannya pada CPO, serta berdasarkan analisis data menggunakan Uji-t Independen, maka dapat ditarik kesimpulan yaitu Ekoenzim berbasis kulit pisang berhasil dibuat melalui proses fermentasi anaerob selama 90 hari. Ekoenzim yang dihasilkan memiliki karakteristik pH 3,40 pada suhu 31°C dan Total Dissolved Solids (TDS) sebesar 3.922 ppm pada suhu 31°C. Nilai pH yang bersifat asam mengindikasikan keberhasilan proses fermentasi dalam menghasilkan asam-asam organik seperti asam asetat, asam laktat, dan asam sitrat, serta menunjukkan aktivitas mikroorganisme yang optimal selama fermentasi berlangsung. Nilai TDS yang tinggi mencerminkan kandungan senyawa bioaktif yang kaya, termasuk enzim, asam organik, mineral, dan metabolit sekunder hasil fermentasi kulit pisang. Sementara itu, Pengaplikasian ekoenzim kulit pisang pada CPO terbukti mampu menurunkan kadar Asam Lemak Bebas (ALB). Pada konsentrasi ekoenzim 20%, 25%, dan 30%, diperoleh rata-rata ALB akhir berturut-turut sebesar 14,83%, 12,75%, dan 10,69%, dengan persentase selisih penurunan sebesar 11,64%; 13,72%; dan 15,78% dari ALB awal 26,47%. Dan Terdapat hubungan positif antara konsentrasi ekoenzim dengan efektivitas penurunan ALB, di mana perlakuan P3 (30%) menghasilkan penurunan ALB tertinggi sebesar 15,78%. Mekanisme penurunan ALB terjadi melalui aktivitas enzim lipase serta reaksi esterifikasi antara asam organik ekoenzim dengan FFA dalam CPO. Limbah kulit buah pisang terbukti dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku ekoenzim yang berpotensi menurunkan kadar ALB pada CPO, menawarkan solusi ramah lingkungan, bernilai ekonomis, dan mendukung konsep zero waste dalam industri kelapa sawit.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustin, M., & Pratami, G. D. (2025). Efektivitas Ekoenzim Kulit Pisang Kepok Manado Muda sebagai Insektisida Nabati terhadap Hama Penghisap Buah Kakao (*Helopeltis sp.*). 10(1), 1–11.
- Arianti, M. P., & Rachmanto, T. A. (2025). Pemanfaatan Eco-Enzyme sebagai Koagulan dan Pupuk Ramah Lingkungan. X(1), 11617–11626.
- Asmaniya, S., & Siti muslikah, D. (2021). konsumsi buah pisang, jumlah limbah kulit pisang yang dihasilkan juga semakin bertambah, yang berpotensi mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik (Akabri, 2015). Salah satu solusi yang sedang dikembangkan adalah pemanfaatan limbah kulit pisang. *Asmaniyah Dan Muslikah*, 9(2), 2021.
- Azida, S., & Yamin, M. (2023). Analisis Daya Saing Crude Palm Oil (CPO) Indonesia Di Pasar Internasional ` Analysis Of Competitivenes Of Indonesia Crude Palm Oil (CPO) In The Market Internasional. 16, 84–94.
- Dhavesia, V. (2015). Pengaruh Pemberian Ekstrak Etanol Jeruk Purut (*Citrus hystrix D.C*) terhadap Pertumbuhan *Staphylococcus epidermidis*. 1–5.
- Elmitra, E. (2021). Uji AKTIVITAS KRIM ANTIBAKTERI EKSTRAK KULIT JERUK PURUT (*Citrus hystrix DC*) TERHADAP BAKTERI *Staphylococcus aureus*. *Jurnal Ilmiah Pharmacy*, 8(2), 17–34. <https://doi.org/10.52161/jiphar.v8i2.354>
- Harahap, R. A., Azhari, A., Meriatna, M., Sulhatun, S., & Suryati, S. (2021). Penurunan Kadar Free Fatty Acid (Ffa) Pada Crude Palm Oil (Cpo) Dengan Proses Esterifikasi Menggunakan Katalis Asam Sulfat (H_2SO_4). *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)*, 1(2), 56. <https://doi.org/10.29103/cejs.v1i2.5458>
- Hartoyo, A. P. P., Istomo, & Rahaju, S. (2023). Aplikasi Ekoenzim untuk Peningkatan Pertumbuhan Tanaman pada Sistem Agroforestri Jati di Desa Sugihwaras, Magetan, Jawa Timur. *Jurnal Pusat Inovasi Masyarakat (PIM)*, 5(2), 168–182. <https://doi.org/10.29244/jpim.5.2.168-182>
- Hidayah, N., Irianto, R. Y., & Mulyati, S. S. (2025). Analisis Eco Enzyme Berbahan Baku Kulit Jeruk Nipis dan Kulit Pisang Sebagai Antimikroba. 24(1), 21–27.
- Jondra, A., Azhari, A., Sulhatun, S., Zulfazri, Z., & Meriatna, M. (2022). Penurunan Kadar Ffa (Free Fatty Acid) Pada Cpo Dengan Menggunakan Adsorben Dari Karbon Aktif Cangkang Buah Ketapang. *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)*, 1(4), 99. <https://doi.org/10.29103/cejs.v1i4.6409>
- Mahmudah, K., & Nopiyanti, V. (2019). Penetapan Kadar Asam Lemak Bebas (Alb) Pada Minyak Goreng Kemasan Dan Minyak Goreng Curah Dengan Perlakuan Berdasarkan Lama Waktu Pemanasan. *CERATA Jurnal Ilmu Farmasi*, 10(1), 1–4. <https://doi.org/10.61902/cerata.v10i1.67>
- Nurfiqih, D., Hakim, L., & Muhammad, M. (2021). Pengaruh Suhu, Persentase Air, Dan Lama Penyimpanan Terhadap Persentase Kenaikan Asam Lemak Bebas (Alb) Pada Crude Palm Oil (Cpo). *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 10(2), 1. <https://doi.org/10.29103/jtku.v10i2.4955>
- Papriani, N. P., Futwembun, A., & Jannah, M. (2024). Analisis Kandungan Unsur Hara Ekoenzim dari Limbah Kulit Pisang dan Pisang. 7, 25–29. <https://doi.org/10.36339/j-hest.v7i1.53>
- Purwanti, P., Okyranida, I. Y., Fitria, D., & Ramadhani, A. A. C. (2023). Sosialisasi Penggunaan Alat Sensor Eco Enzyme Di Pkk Kelurahan Halim Perdana Kusuma. *Prosiding Seminar Nasional Pengabdian Kepada Masyarakat*, 4(1), SNPPM2023ST-179.

- Salsabila, A. Z., Agustrina, R., Arifiyanto, A., & Asih, D. (2024). Uji Efektivitas Ekoenzim Berbahan Dasar Limbah Kulit Pisang Kepok Manado (*Musa paradisiaca* var . *formatypica*) Muda Sebagai Antimikroba. *BIOSFER, J.Bio. & Pend.Bio.*, 9(1).
- Sipayung, D. A., Titiaryanti, N. M., & Astuti, Y. T. M. (2023). Pengaruh Konsentrasi dan Cara Aplikasi *Eco Enzyme* terhadap Pertumbuhan Bibit Kelapa Sawit di *Pre Nursery*. *Jurnal Agroforetech*, 1(1), 90–93. <https://jurnal.instiperjogja.ac.id/index.php/JOM/article/view/387>
- Sutrisnawati, N. K., Saskara, I. K., Nyoman Budiasih, N. G. A., & Ardiasa, I. K. (2022). Pembuatan Eco Enzym Sebagai Upaya Pengelolaan Limbah Organik Di the Jayakarta Suite Komodo Flores. *Penelitian Dan Pengabdian Kepada Masyarakat*, 2085, 1–13. <https://ojs.unr.ac.id/index.php/akses/article/download/959/807>
- Wikaningrum, T., & Pratamadina, E. (2022). *Potensi Penggunaan Eco Enzyme sebagai Biokatalis dalam Penguraian Minyak dan Lemak pada Air Limbah Domestik*. VII(4), 3924–3932.
- Zahira, S. D., Ihsan, M., Maritsa, H. U., & Jambi, U. (2023). AKTIVITAS EKOENZIM PISANG (*APisang comosus* L. Merr.) Var. QUEEN SEBAGAI ANTIMIKOSIS DERMATOFITA (*Trichophyton rubrum*) *Ecoenzyme Activity of Queen Variety Pineapple (APisang comosus* L. Merr.) as *Antimycosis Dermatophytes (Trichophyton rubrum)*. 16(1), 63–69. <https://doi.org/10.22437/biospecies.v16i1.21096>
- Zultaqawa, Z., Firdaus, I. N., Aulia, M. D., Sipil, J. T., Indonesia, U. K., Raya, S. B., & Bandung, K. (2023). Manfaat eco enzyme pada lingkungan. *CRANE : Civil Engineering Research Journal*, 4(2), 10–14.