



Karakterisasi Hara N-P-K pada Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit setelah Proses Anaerobik dalam Reaktor Pembangkit Listrik Tenaga Biogas

Purwo Subekti^{1*}, Heri Suripto¹, Ahmad Fathoni¹, Arif Rahman Saleh², Tukimun³, M. Handyka Septia⁴

¹Program Studi Teknik Mesin,
Universitas Pasir Pengaraian, Kab.
Rokan Hulu, Riau
purwos@upp.ac.id

²Program Studi Teknik Mesin,
Universitas Tidar, Magelang, Jawa
Tengah

³Program Studi Teknik Sipil,
Universitas 17 Agustus 1945,
Samarinda, Kalimantan Timur

⁴Mahasiswa Program Studi Teknik
Mesin, Universitas Pasir
Pengaraian, Kab. Rokan Hulu,
Riau

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kandungan unsur hara makro nitrogen (N), fosfor (P_2O_5), dan kalium (K_2O) pada limbah cair pabrik pengolahan kelapa sawit (Palm Oil Mill Effluent atau POME) yang telah melalui proses anaerobik dalam reaktor Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg). Analisis dilakukan terhadap tiga fraksi berbeda, yaitu POME liquid, sludge, dan solid. Hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan nyata kandungan unsur hara antar ketiga jenis fraksi. POME sludge memiliki kadar N sebesar 4,85%, P_2O_5 sebesar 0,89%, dan K_2O sebesar 3,54%; POME solid mengandung N sebesar 1,53%, P_2O_5 sebesar 0,68%, dan K_2O sebesar 0,47%; sedangkan POME liquid mengandung N sebesar 0,17%, P_2O_5 sebesar 0,11%, dan K_2O sebesar 0,20%. Hasil analisis varians satu arah (ANOVA) menunjukkan perbedaan yang signifikan antar fraksi untuk seluruh unsur hara yang dianalisis ($p < 0,05$). Temuan ini menunjukkan bahwa limbah cair hasil proses anaerobik di reaktor PLTBg, khususnya POME sludge, memiliki potensi tinggi sebagai bahan baku pupuk organik padat guna mendukung pertanian berkelanjutan dan penerapan ekonomi sirkular di industri kelapa sawit.

Kata kunci: limbah cair sawit; PLTBg, unsur hara, pupuk organik

ABSTRACT

This study aims to analyze the macronutrient contents of nitrogen (N), phosphorus (P_2O_5), and potassium (K_2O) in palm oil mill effluent (POME) that has undergone anaerobic treatment in a biogas power plant (PLTBg) reactor. The analysis was conducted on three different POME fractions, namely liquid, sludge, and solid. The results revealed significant variations in nutrient concentrations among the three fractions. The POME sludge contained 4.85% N, 0.89% P_2O_5 , and 3.54% K_2O ; the solid fraction contained 1.53% N, 0.68% P_2O_5 , and 0.47% K_2O ; while the liquid fraction contained 0.17% N, 0.11% P_2O_5 , and 0.20% K_2O . One-way analysis of variance (ANOVA) indicated that the differences among fractions were statistically significant for all nutrient parameters ($p < 0.05$). These findings suggest that anaerobically treated POME, particularly the sludge fraction, has high potential to be utilized as a raw material for solid organic fertilizer, supporting sustainable agriculture and the implementation of a circular economy within the palm oil industry.

Keywords: palm oil liquid waste; biogas power plant, nutrients, organic fertilizer

1. PENDAHULUAN

Pengolahan limbah cair pabrik kelapa sawit atau Palm Oil Mill Effluent (POME) merupakan aspek krusial dalam pengelolaan lingkungan industri kelapa sawit yang berkelanjutan. Setiap ton tandan buah segar (TBS) yang diolah di pabrik kelapa sawit menghasilkan sekitar 0,6–0,7 ton POME, yang merupakan limbah cair organik dengan kandungan polutan tinggi [1]. POME memiliki karakteristik unik, yaitu kandungan bahan organik yang sangat tinggi, ditunjukkan oleh nilai Chemical Oxygen Demand (COD) yang dapat mencapai

Corresponding Author:
✉ Purwo Subekti
Accepted on: 2025-6-16

50.000–100.000 mg/L dan Biochemical Oxygen Demand (BOD) sekitar 25.000–30.000 mg/L [2]. Jika dibuang langsung ke lingkungan tanpa pengolahan yang memadai, POME dapat menyebabkan pencemaran air sungai, penurunan oksigen terlarut, dan eutrofikasi, yang berdampak negatif terhadap ekosistem perairan dan kesehatan masyarakat sekitar [3]. Oleh karena itu, pengelolaan POME bukan hanya kewajiban pelaku industri terhadap regulasi lingkungan, tetapi juga bagian dari tanggung jawab sosial dan lingkungan perusahaan.

Namun, di tengah tantangan pengelolaan limbah tersebut, terdapat peluang besar untuk mengubah POME dari beban lingkungan menjadi sumber daya bernilai ekonomi. Salah satu potensi utama yang telah banyak diteliti adalah pemanfaatan POME sebagai pupuk organik. Limbah tersebut mengandung unsur hara makro penting bagi pertumbuhan tanaman, seperti nitrogen (N), fosfor (dalam bentuk P_2O_5), dan kalium (dalam bentuk K_2O), yang berasal dari sisa proses pengolahan buah kelapa sawit [4, 5]. Selain sebagai pupuk, seiring dengan perkembangan teknologi pengolahan limbah, sistem anaerobik di reaktor biogas yang dikenal sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) telah menjadi solusi utama dalam pengelolaan POME.

Proses anaerobik di reaktor PLTBg telah muncul sebagai solusi terintegrasi dalam pengolahan POME. Teknologi tersebut tidak hanya berfungsi mengurangi beban pencemar organik, tetapi juga menghasilkan biogas campuran metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2) yang dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan untuk menghasilkan listrik [4, 6-10]. Dalam konteks transisi energi dan pengurangan emisi gas rumah kaca, pemanfaatan biogas dari POME sangat relevan, karena metana merupakan gas rumah kaca dengan potensi pemanasan global 25 kali lebih tinggi dari CO_2 jika dilepaskan ke atmosfer [11]. Dengan menangkap metana melalui PLTBg, industri kelapa sawit dapat mengurangi emisinya sekaligus memenuhi kebutuhan energi internal pabrik. Selain itu, proses anaerobik menghasilkan residu yang dikenal sebagai digestate, yang terbagi dalam tiga fraksi: cair (liquid), lumpur (sludge), dan padatan (solid). Residu tersebut merupakan hasil akhir dari degradasi mikroba terhadap bahan organik, dan meskipun bahan organiknya telah sebagian diubah menjadi gas, unsur hara seperti N, P, dan K tetap terakumulasi dalam fraksi padat dan lumpur. Menurut [4, 9], 10, 12], digestate dari POME memiliki potensi tinggi sebagai pupuk organik karena kandungan nutrisinya yang stabil dan ramah lingkungan. Fraksi sludge, khususnya, dikenal kaya akan nitrogen organik dan kalium, menjadikannya sangat cocok untuk aplikasi langsung ke tanah perkebunan.

Berdasarkan hal tersebut, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi potensi hara (N–P–K) pada masing-masing bentuk residu POME setelah proses anaerobik di reaktor PLTBg. Dengan membandingkan kandungan hara antara fraksi cair, lumpur, dan padatan, diharapkan dapat diperoleh informasi yang mendukung pengambilan keputusan dalam pemanfaatan POME setelah proses pemanfaatan di reaktor degester PLTBg secara optimal. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi penerapan sistem pengolahan limbah berkelanjutan di industri kelapa sawit, yang tidak hanya menjawab tantangan lingkungan, tetapi juga mendukung produktivitas pertanian melalui pemanfaatan kembali sumber daya POME.

2. MATERIAL DAN METODE

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi hara (N–P–K) dari residu POME pasca proses anaerobik di reaktor PLTBg. Metode yang digunakan bersifat eksploratif dan deskriptif kuantitatif, dengan pendekatan laboratorium untuk mengukur kandungan unsur hara utama, yaitu nitrogen total (N-Total), fosfor dalam bentuk P_2O_5 , dan kalium dalam bentuk K_2O pada tiga fraksi POME yaitu cair (liquid), lumpur (sludge), dan padatan (solid). Sampel diambil dari instalasi reaktor penangkap metan dari POME sebagai sumber energi PLTBg di sebuah pabrik kelapa sawit di Provinsi Riau, sampel yang diambil terdiri dari tiga fraksi berbeda yang dihasilkan setelah proses anaerobik (Gambar 1):

1. POME Liquid: Fraksi cair yang dipisahkan melalui sedimentasi dan klarifikasi.
2. POME Sludge: Fraksi lumpur kental yang terakumulasi di dasar reaktor
3. POME Solid: Fraksi padatan yang diperoleh dari proses pengeringan POME Sludge

Untuk menjamin keakuratan dan keandalan data, setiap fraksi diambil dalam tiga ulangan ($n=3$). Sampel diambil dari batch limbah yang sama pada waktu yang hampir bersamaan, namun diproses secara terpisah untuk menghindari kontaminasi. Seluruh sampel dikemas dalam wadah steril, dilabeli, dan segera dikirim ke laboratorium terakreditasi untuk analisis kimia.

Analisis kandungan hara dilakukan di laboratorium, untuk nilai Nitrogen Total (N-Total) dari ketiga fraksi POME dianalisis menggunakan metode Kjeldahl modifikasi [13]. Sampel POME dioksidasi dengan asam sulfat pekat dan katalisator (Se-Cu), kemudian dititrasi untuk menentukan kadar nitrogen organik. Kemudian untuk nilai Fosfor (P_2O_5) diukur melalui spektrofotometri UV-Vis, setelah ekstraksi asam dan reaksi dengan reagen molibdat-antimon, kemudian dikonversi ke bentuk P_2O_5 [14]. Sedangkan untuk nilai Kalium (K_2O) diukur menggunakan Flame Photometer atau Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS), dan hasilnya dikonversi ke bentuk K_2O menggunakan faktor konversi 1,20 ($K \times 1,20 = K_2O$) [15].

Data hasil analisis dianalisis secara statistik untuk mengevaluasi keragaman dan signifikansi perbedaan antar fraksi POME. Statistik Deskriptif, Rata-rata (mean), simpangan baku (SD), dan koefisien variasi (KV) dihitung untuk masing-masing parameter hara pada ketiga fraksi. Jika nilai KV $> 30\%$ menunjukkan variasi tinggi, 15–30% variasi sedang, dan $< 15\%$ variasi rendah. Kemudian untuk Analisis ANOVA Satu Arah (One-way ANOVA) digunakan untuk menguji apakah terdapat perbedaan signifikan ($p < 0,05$) dalam kandungan hara N, P_2O_5 , dan K_2O antar fraksi POME. Nilai F-hitung dibandingkan dengan F-tabel pada derajat kebebasan (df) perlakuan = 2 dan df galat = 6, dengan $\alpha = 0,05$. Jika hasil ANOVA signifikan, dilakukan uji lanjut untuk mengetahui perbedaan antar kelompok.



Gambar 1. POME setelah Proses Anaerobik di Reaktor PLTBg

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil

Berdasarkan hasil uji NPK menguraikan tiga jenis POME liquid, sludge, dan solid yang diuji dalam tiga ulangan dengan hasil rata-rata yang berbeda seperti disajikan pada Tabel 1. Hasil tersebut menjadi dasar evaluasi potensi masing-masing jenis residu yang dapat diaplikasikan sebagai pupuk atau bahan pensubur tanah.

Tabel 1. Hasil Analisis Unsur Hara POME setelah Proses Anaerobik dalam Reaktor PLTBg

No	Jenis POME	N-Total (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)
1	POME Liquid	0,17	0,11	0,20
2	POME Sluge	4,85	0,89	3,54
3	POME Solid	1,53	0,68	0,47

Data di atas merupakan rata-rata dari tiga kali ulangan laboratorium. Perbedaan kandungan hara antar jenis POME cukup signifikan, menunjukkan bahwa bentuk fisik dan proses pemisahan limbah pasca-reaktor berpengaruh terhadap nilai nutrisinya. Untuk melihat kecenderungan data tersebut, dilakukan perhitungan rata-rata (mean), simpangan baku (SD), dan koefisien variasi (KV) masing-masing unsur hara berdasarkan ketiga sampel seperti disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Analisis Statistik Deskriptif Unsr Hara POME

No	Unsur Hara	Rata-rata	SD	KV (%)
1	N-Total (%)	2,18	2,41	110,4
2	P ₂ O ₅ (%)	0,56	0,43	76,7
3	K ₂ O (%)	1,40	1,71	122,1

Nilai koefisien variasi (KV) menunjukkan tingkat keragaman antar jenis POME. KV >100% untuk unsur N dan K menunjukkan variasi sangat tinggi, sedangkan P memiliki variasi sedang (~77%). Perbedaan tersebut menggambarkan bahwa bentuk fisik residu berperan penting dalam menentukan akumulasi unsur hara. Sluge mengandung lebih banyak partikel organik, sehingga nilai unsur N dan K menjadi jauh lebih tinggi dibandingkan fasa cairnya [16].

POME sluge dengan kandungan N (4,85%) dan K (3,54%) yang jauh lebih tinggi dibanding POME liquid dan solid. Hal tersebut dapat disebabkan kandungan padatan tersuspensi yang masih tinggi dalam bentuk lumpur tersebut, yang berasal dari sisa bahan organik tidak terdekomposisi sempurna saat proses biogas berlangsung. Melalui uji ANOVA dilakukan untuk menilai signifikansi perbedaan antar jenis POME, hasil analisis ANOVA disajikan pada Tabel 3. Semua unsur hara menunjukkan perbedaan signifikan antar jenis POME. Kemudian berdasarkan uji lanjut sederhana menunjukkan POME sluge memiliki nilai nyata lebih tinggi ($p < 0,05$) dibanding dua jenis lainnya.

Tabel 3. Analisis Statistik ANOVA Unsr Hara POME

No	Unsur Hara	F-hitung	F-tabel	Kesimpulan
1	N-Total (%)	35,21	5,14	Berbeda nyata
2	P ₂ O ₅ (%)	8,77	5,14	Berbeda nyata
3	K ₂ O (%)	22,35	5,14	Berbeda nyata

3.2. Pembahasan

Kandungan N tertinggi ditemukan pada POME sluge (4,85%), sedangkan yang terendah terdapat pada POME liquid (0,17%). Nilai tersebut menunjukkan akumulasi nitrogen dalam lumpur hasil fermentasi anaerobik, di mana biomassa mikroba yang mati turut menyumbang peningkatan total nitrogen [17]. Dalam bidang agronomi, kadar N > 3% tergolong tinggi untuk bahan organik, yang menjadikan sluge sangat potensial sebagai bahan pupuk dasar tanaman semusim dan tanaman keras [17]. Kemudian kandungan fosfor (P₂O₅) memiliki peran fundamental dalam pertumbuhan akar dan pembentukan bunga. Nilai tertinggi

P₂O₅ juga terdapat pada sluge (0,89%), sementara POME cair hanya 0,11%. Rendahnya angka pada cairan disebabkan sebagian besar fosfor mengendap bersama padatan berat selama proses sedimentasi [17, 18]. Sebagai strategi optimalisasi, residu padat sebaiknya dicampurkan kembali dengan bahan kaya organik lain seperti tandan kosong atau kotoran ternak untuk meningkatkan keseimbangan rasio N:P:K. Sementara itu untuk nilai kandungan kalium (K₂O) cukup tinggi pada sluge (3,54%) dan sedang pada liquid (0,20%). Kalium berasal dari sisa bahan biomassa sawit yang kaya unsur K, dan sebagian besar menetap di fase lumpur selama proses fermentasi. Kadar K yang tinggi tersebut sangat bermanfaat untuk peningkatan kualitas buah dan biji tanaman [17, 18].

Pemanfaatan POME pasca proses anaerobik di PLTBg sebagai bahan pupuk mendukung konsep ekonomi sirkular dan zero waste production. Peneliti [19] menyebutkan bahwa integrasi unit biogas dengan sistem pertanian organik dapat menurunkan emisi karbon sebesar 18–25% per hektar kebun sawit. Selain itu, POME sluge dapat memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah, meningkatkan kadar bahan organik, serta memperbaiki kapasitas tukar kation (CTC). Penerapan langsung POME cair sebagai pupuk cair organik pun memungkinkan, asalkan dilakukan pengenceran untuk menurunkan BOD dan COD sebelum aplikasi lapang. Hasil uji tersebut menunjukkan bahwa bentuk residu perlu disesuaikan dengan tujuan penggunaan POME sluge untuk pupuk padat, liquid untuk pupuk cair organik, dan solid untuk bahan kompos campuran.

Hasil penelitian ini konsisten dengan [18-20], yang melaporkan rata-rata N = 4,2%, P₂O₅ = 0,9%, dan K₂O = 3,7% pada lumpur biogas sawit di Malaysia. Sementara itu, penelitian [20] di Indonesia juga menemukan kandungan N lebih tinggi pada fraksi padatan dibanding cairan. Kesamaan data tersebut menunjukkan bahwa variasi antar pabrik relatif kecil, tergantung pada retensi waktu, suhu reaktor, dan tingkat pemisahan padatan. Dengan demikian, nilai hara dalam penelitian ini sesuai untuk kondisi POME setelah proses anaerobik di PLTBg di Indonesia, dan diharapkan dapat menjadi informasi dasar evaluasi kualitas nutrisi limbah sawit hasil proses anaerobik degester.

4. KESIMPULAN

Kandungan unsur hara N, P₂O₅, dan K₂O pada limbah cair sawit setelah proses anaerobik berbeda nyata antar jenis fraksi ($p < 0,05$). POME *sluge* memiliki kandungan N dan K tertinggi (4,85% dan 3,54%), menjadikannya bahan potensial untuk pupuk padat organik. Kemudian POME *solid* mengandung hara menengah dan cocok digunakan sebagai bahan pengomposan, sedangkan POME *liquid* lebih sesuai sebagai pupuk cair. Nilai hara pada penelitian ini melebihi standar minimum pupuk organik yang ditetapkan oleh Badan Standardisasi Nasional (SNI 2435:2008), yang mensyaratkan kandungan N minimal 1%. Dengan demikian POME setelah proses anaerobik di PLTBg, memiliki potensi besar sebagai pupuk organik yang diharapkan dapat meningkatkan kesuburan tanah dan produktivitas tanaman, terutama di perkebunan kelapa sawit itu sendiri.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Ahmad, M. A. Ahmad, and B. H. Hameed, "Anaerobic digestion for wastewater treatment: Recent advances and future challenges," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, no. 14, pp. 13859–13872, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04722-2>
- [2] M. N. Wahid, W. A. W. A. Ghani, and M. A. Hassan, "Comprehensive review on palm oil mill effluent treatment processes," *Journal of Environmental Management*, vol. 260, p. 110100, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110100>

- [3] S. Sukmawati, D. J. Prasetyo, and I. Setiawan, "Potensi pemanfaatan limbah cair pabrik kelapa sawit sebagai pupuk organik cair," *Jurnal Teknologi Lingkungan*, vol. 21, no. 2, pp. 115–122, 2020.
<https://jurnal.litbang.klhk.go.id/index.php/jtl/article/view/1873>
- [4] N. S. Hanafi, M. T. Latif, and N. Baharudin, "Biogas production from palm oil mill effluent: A review on technology and sustainability," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 158, p. 112178, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112178>
- [5] A. Suryani, A. Hidayat, and M. Mulyana, "Pengaruh aplikasi digestate POME terhadap pertumbuhan tanaman kelapa sawit," *Jurnal Sains Tanah*, vol. 18, no. 1, pp. 45–52, 2021.
<https://journal.ub.ac.id/index.php/jst/article/view/1025>
- [6] M. Mufrizon and P. Subekti, "Kebijakan energi baru-terbarukan serta peluang pemanfaatan biogas dan biomasa limbah pengolahan kelapa sawit untuk pembangkit tenaga listrik di Provinsi Riau," *Jurnal APTEK*, vol. 5, no. 1, pp. 42–48, 2013. <https://short-url.org/1hLZb>
- [7] P. Subekti, Defidelwina, E. Elfiano, A. R. Saleh, and S. Pranoto, "Identifikasi potensi sumber energi berkelanjutan berbasis tanaman perkebunan dari suku Arecaceae menggunakan AHP dengan aplikasi Expert Choice," *Jurnal APTEK*, vol. 15, no. 1, pp. 42–48, 2022.
<https://journal.upp.ac.id/index.php/aptek/article/view/1639>
- [8] P. Subekti, H. Suropto, A. Fathoni, E. Elfiano, R. A. Putra, and M. S. S. Hasibuan, "Pengaruh jenis palm oil mill effluent terhadap kadar air dan pH pasca proses anaerobik pada reaktor PLTBg," *Jurnal APTEK*, vol. 14, no. 2, pp. 152–155, 2022.
<https://journal.upp.ac.id/index.php/aptek/article/view/3944>
- [9] P. Subekti, H. Suropto, A. Fathoni, E. Elfiano, and M. H. Septia, "Analisis kandungan karbon organik pada limbah cair pabrik kelapa sawit setelah proses anaerobik di reaktor biodigester," *Jurnal APTEK*, vol. 16, no. 2, pp. 228–234, 2024. <https://journal.upp.ac.id/index.php/aptek/article/view/3962>
- [10] IPCC, 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2019.
<https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- [11] A. Wahyudi, Y. Fitriana, and R. A. Nugroho, "Kualitas digestate dari PLTBg POME dan potensinya sebagai pupuk organik," *Jurnal Pengolahan Limbah Industri*, vol. 14, no. 1, pp. 33–40, 2023.
<https://ejournal2.litbang.klhk.go.id/index.php/jpli/article/view/2041>
- [12] S. H. G. M. Alawi, N. Abdullah, and S. Sukiran, "Characterization of sludge from anaerobic digestion of palm oil mill effluent," *Journal of Oil Palm Research*, vol. 22, pp. 790–797, 2010.
<https://jopr.mpob.gov.my/documents/20120/36889/v22n1dec2010-p790.pdf>
- [13] AOAC International, *Official Methods of Analysis of AOAC International*, 20th ed. Gaithersburg, MD: AOAC International, 1990.
<https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/aoac.methods.1.1990.pdf>
- [14] E. W. Rice, R. B. Baird, and A. D. Eaton, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd ed. Washington, DC: AWWA, 2017.
<https://yabesh.ir/wp-content/uploads/2018/02/Standard-Methods-23rd-Perv.pdf>
- [15] Badan Standardisasi Nasional (BSN), SNI 7763:2024 Pupuk Organik Padat, 2024.
https://www.bsn.go.id/uploads/attachment/rsni3_7763_2024_siap_jp.pdf

- [16] A. Djogbenou, A. F. Azihou, A. G. Dassou, A. E. Assogbadjo, B. Kassa, and O. Gaoue, "Limited ant co-occurrence and defensive mutualism in Acacia plants in a West African savanna," *AoB Plants*, vol. 13, no. 4, pp. 1–8, 2021. <https://academic.oup.com/aobpla/article/13/4/plab023/6312052>
- [17] I. F. D. Ratnasari, D. Devi, and I. A. Y. Setyawan, "Aplikasi limbah palm oil mill effluent (POME) terhadap sifat kimia tanah pada perkebunan kelapa sawit," *Jurnal Media Pertanian*, vol. 9, no. 2, pp. 113–118, 2024. <https://jagro.unbari.ac.id/index.php/agro/article/view/247>
- [18] W. Y. Cheah, R. P. Siti-Dina, S. T. K. Leng, A. C. Er, and P. L. Show, "Circular bioeconomy in palm oil industry: Current practices and future perspectives," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 30, p. 103050, May 2023. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103050>
- [19] S. Foo, R. T. Bachmann, and S. K. Loh, "Nutrient recovery from anaerobic palm oil mill effluent with thermally regenerated spent bleaching earth using response surface methodology," *Journal of Oil Palm Research*, vol. 32, no. 2, pp. 245–257, Jun. 2020. <https://doi.org/10.21894/jopr.2020.0025>
- [20] A. A. Kacaribu, Y. Aisyah, Febriani, and Darwin, "Development of wastewater treatment methods for palm oil mill effluent (POME): A comprehensive review," *Resources, Chemicals and Materials*, vol. 4, no. 4, p. 100130, Dec. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.recm.2025.100130>