

Studi Dampak Lingkungan dari Penerapan Sistem *Land Application* pada Pengelolaan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit PT X Tahun 2025

Adha Wahyu Purwanto*, Nely Zulfa, Rizal Ichsan Syah Putra

Universitas Ivet, Indonesia

Email : adhawahyu.26@gmail.com*

Keywords:

land application;
pome;
environmental impact;
soil fertility;
water quality



This is an open access article
under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2026 by Author.
Published by
Riviera Publishing

Kata Kunci:

land application;
pome;
dampak lingkungan;
kesuburan tanah; kualitas air

Abstract

Palm oil mill effluent poses environmental risks but can provide nutrients through land application when treatment and monitoring are adequate. This study evaluated effluent characteristics, soil conditions, groundwater and surface water quality, and the environmental feasibility of land application at PT X in East Kutai Regency during 2025. A quantitative descriptive comparative observational approach was employed. Purposive sampling yielded 42 samples comprising 18 soil, eight groundwater, four surface water, and 12 effluent samples. Physical and chemical parameters were analyzed in laboratories and compared across locations and against relevant environmental standards. All effluent samples met BOD₅ and pH requirements, with mean BOD₅ reaching 1,837.46 mg/L. Mean soil pH within application trenches was 7.28, compared with 4.29 in control soil, alongside higher phosphorus availability, potassium availability, and base saturation. These findings indicate localized nutrient enrichment. River BOD₅ and COD met applicable standards; however, deviations occurred in dissolved oxygen, ammonia, free chlorine, and pH. Groundwater BOD₅ showed no consistent downstream increase, although metal measurements from the second semester require verification. Land application therefore offers potential for sustainable effluent management, but environmental feasibility remains conditional on data validation, controlled application rates, trench maintenance, and regular environmental monitoring to establish operational safety over a longer period.

Abstrak

Limbah cair pabrik kelapa sawit berpotensi mencemari lingkungan, tetapi dapat dimanfaatkan sebagai sumber hara melalui sistem land application apabila pengolahan dan pengawasannya memadai. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi karakteristik efluen, kondisi tanah, kualitas air tanah dan air permukaan, serta kelayakan lingkungan sistem land application PT X di Kabupaten Kutai Timur pada 2025. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif komparatif dengan desain observasional. Sebanyak 42 sampel dipilih secara purposif, meliputi 18 sampel tanah, delapan air tanah, empat air permukaan, dan 12 efluen. Parameter fisika dan kimia dianalisis di laboratorium, kemudian dibandingkan antarlokasi dan dengan baku mutu terkait. Hasil menunjukkan seluruh sampel efluen memenuhi persyaratan BOD₅ dan pH, dengan rerata BOD₅ 1.837,46 mg/L. Rerata pH tanah dalam lorak mencapai 7,28 dibandingkan 4,29 pada kontrol, disertai ketersediaan fosfor, kalium, dan kejenuhan basa yang lebih tinggi. Temuan tersebut mengindikasikan pemanfaatan hara yang terlokalisasi. BOD₅ dan COD sungai memenuhi baku mutu, tetapi ditemukan penyimpangan pada oksigen terlarut, amonia, klorin bebas, dan pH. BOD₅ air tanah tidak memperlihatkan peningkatan konsisten di hilir, sementara data logam semester kedua memerlukan verifikasi. Disimpulkan bahwa land

application berpotensi mendukung pengelolaan limbah berkelanjutan, dengan kelayakan lingkungan bersyarat pada validasi data, pengendalian dosis, pemeliharaan rorak, serta pemantauan kualitas lingkungan secara berkala untuk memastikan keamanan operasional jangka panjang.

PENDAHULUAN

Sektor industri minyak kelapa sawit merupakan salah satu pilar strategis perekonomian nasional Indonesia yang memberikan kontribusi signifikan terhadap devisa negara dan penyerapan tenaga kerja (Raharjo, 2019). Di samping nilai ekonominya, proses ekstraksi Tandan Buah Segar (TBS) menjadi *Crude Palm Oil* (CPO) secara kontinu menghasilkan produk sampingan berupa limbah cair (*Palm Oil Mill Effluent*/POME) dalam volume yang sangat besar, yaitu rata-rata 0,5–0,75 m³ per ton TBS yang diolah. POME dicirikan oleh beban pencemar organik yang sangat tinggi, yang ditunjukkan oleh nilai *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), *Chemical Oxygen Demand* (COD), serta *Total Suspended Solids* (TSS) yang pekat. Apabila sistem pengolahan dan pembuangannya tidak dikelola secara terencana, POME berpotensi memicu degradasi ekologis yang masif pada ekosistem penerima.

Dalam perspektif pengelolaan limbah, residu produksi tidak lagi dipandang semata sebagai buangan akhir, melainkan sebagai sumber daya yang perlu dikelola melalui tahapan pengurangan, pemanfaatan, dan pengolahan yang berkelanjutan (Rahmayanti, 2022; Zulkifli, 2014). Sejalan dengan Teori Ekologi Industri dan Teori Ekonomi Sirkular, salah satu metode pemanfaatan POME yang diterapkan secara luas di industri perkebunan adalah sistem aplikasi lahan (*land application*). Metode ini memanfaatkan POME yang telah melalui pengolahan di kolam anaerobik/maturasi sebagai pupuk cair organik (*soil conditioner*) dengan mengalirkannya ke rorak di blok pertanaman kelapa sawit. Secara teoretis, *land application* menutup siklus hara (*closing the nutrient loop*) karena mengembalikan hara makro (N, P, K, dan Mg) serta bahan organik ke dalam tanah sekaligus menekan biaya pemupukan anorganik. Berdasarkan Teori Pertukaran Kation dan Teori Biogeokimia Tanah, pemberian POME secara bertahap mampu menetralkan keasaman tanah masam, meningkatkan Kapasitas Tukar Kation (KTK), dan memperkaya bahan organik tanah.

Sejumlah penelitian telah mengkaji karakteristik POME dalam konteks aplikasi lahan. Raman et al., (2019) menyebutkan bahwa POME memiliki kandungan organik tinggi dan keasaman yang signifikan, serta berpotensi sebagai sumber energi terbarukan apabila dikombinasikan dengan teknologi pengolahan yang tepat. (Sitorus & Mardina, 2020) menunjukkan bahwa limbah cair yang telah melalui stabilisasi di kolam IPAL memiliki nilai BOD, COD, TSS, dan pH yang aman sebelum dialirkan ke sistem *land application*. (Sisnayati et al., 2021) membuktikan bahwa aerasi plat berlubang mampu menurunkan BOD, TSS, serta minyak dan lemak secara signifikan, sedangkan (Melisa & Apriyanto, 2020) menegaskan pentingnya konsistensi pemantauan suhu, pH, dan debit pada tiap tingkatan kolam pengolahan agar limbah yang diaplikasikan berada dalam ambang batas aman. (Kurniawan et al., 2022) menambahkan bahwa limbah cair PKS yang dikombinasikan dengan serat tandan kosong kelapa sawit dapat diolah menjadi pupuk organik cair yang memenuhi standar mutu pemupukan tanpa merusak lingkungan.

Dari aspek tanah, Saputra et al., (2021) membuktikan bahwa pemberian limbah cair PKS secara terukur meningkatkan retensi hara tanah serta efisiensi serapan N, P, dan K oleh

perakaran kelapa sawit. (Delsiyanti et al., 2016) menunjukkan bahwa perbedaan penggunaan dan kemiringan lahan menghasilkan sifat fisik tanah yang beragam, terutama pada tekstur, permeabilitas, porositas, dan kapasitas lapang. (Rasyidin et al., 2024) melalui metode geolistrik resistivitas 2D mengidentifikasi bahwa lapisan lempung pasir dan lapukan granit pada lokasi *land application* memiliki permeabilitas yang sesuai standar teknis (1,5–15 cm/jam), sehingga hara dari POME dapat tersimpan optimal di zona perakaran dan tidak cepat lolos ke lapisan yang lebih dalam.

Dari aspek perairan, Nursarif et al., (2023) melalui metode *National Sanitation Foundation Water Quality Index* (NSF-WQI) menunjukkan bahwa aktivitas penggunaan lahan di sekitar sungai dapat menurunkan kualitas air pada segmen hilir. (Mulyanto et al., 2023) menyoroti risiko penurunan kualitas air tanah apabila perembesan POME dari areal aplikasi tidak terkontrol, sehingga pemantauan sumur pantau secara berkala mutlak dilakukan. (Dewi & Lamona, 2025) juga mengidentifikasi bahwa pengelolaan limbah yang kurang optimal berpotensi menurunkan kualitas perairan permukaan dan memicu keluhan kesehatan lingkungan masyarakat sekitar. Di sisi lain, (Clario & Sakiah, 2025) menyimpulkan bahwa pemanfaatan limbah cair PKS sebagai pupuk organik cair layak dan efisien secara ekonomi-lingkungan dalam sistem *closed-loop* selama seluruh parameter baku mutu terpenuhi.

Meskipun memberikan manfaat agronomis, keberlanjutan *land application* menyimpan potensi risiko lingkungan jangka panjang. Penambahan bahan organik dan kation/logam secara kontinu ke dalam tanah berisiko menimbulkan penyumbatan pori tanah (*soil clogging*), pergeseran pH, akumulasi hara berlebih (*nutrient over-saturation*), serta akumulasi logam berat. Berdasarkan Teori Transpor Kontaminan dan Hukum Darcy, dinamika presipitasi dan kondisi hidrogeologi lokal dapat memicu migrasi pencemar secara vertikal melalui perkolasi menuju akuifer dangkal maupun secara horizontal melalui limpasan permukaan (*surface runoff*) menuju badan air penerima, yang berisiko memicu eutrofikasi, penurunan oksigen terlarut, serta pencemaran sumber air masyarakat. Oleh karena itu, lokasi aplikasi dipersyaratkan memiliki kedalaman muka air tanah > 2 meter dan permeabilitas tanah 1,5–15 cm/jam, sedangkan Teori Daya Dukung Lingkungan menegaskan bahwa pemanfaatan limbah ke media lingkungan tidak boleh melampaui kapasitas asimilasi alami ekosistem setempat. Secara yuridis, perizinan teknis, baku mutu *effluent*, hingga Surat Layak Operasi (SLO) diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (Permen LHK) Nomor 5 Tahun 2021.

Kajian-kajian terdahulu umumnya menelaah satu kompartemen lingkungan secara terpisah, sementara evaluasi komprehensif berbasis bukti empiris yang mengintegrasikan karakteristik *effluent*, profil vertikal tanah, air tanah, dan air permukaan pada satu tapak operasional, serta mengujinya terhadap baku mutu terbaru (Permen LHK No. 5 Tahun 2021 dan PP No. 22 Tahun 2021), belum tersedia untuk operasional *land application* PT X. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis karakteristik fisika-kimia limbah cair PKS yang dimanfaatkan melalui sistem *land application* di PT X; (2) menilai dampak penerapan *land application* terhadap sifat fisika-kimia tanah pada berbagai kedalaman; (3) mengevaluasi pengaruhnya terhadap kualitas air tanah dan air permukaan di sekitar area aplikasi; serta (4) mengevaluasi kelayakan lingkungan sistem *land application* sebagai strategi pengelolaan limbah cair PKS yang berkelanjutan.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan deskriptif komparatif dan desain *cross-sectional*, yaitu pengumpulan data dalam satu periode tertentu tanpa manipulasi variabel di lapangan. Data berupa nilai numerik hasil pengujian parameter fisika-kimia dari laboratorium terakreditasi Komite Akreditasi Nasional (KAN), yang selanjutnya dibandingkan dengan ambang batas baku mutu lingkungan yang ditetapkan pemerintah. Penelitian berangkat dari asumsi bahwa penerapan *land application* dapat memberikan dampak positif maupun negatif terhadap komponen lingkungan, sehingga alur pemikiran penelitian disusun sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kerangka Pemikiran Penelitian

No	Tahapan	Uraian
1	Latar Belakang	Pengelolaan limbah cair Pabrik Kelapa Sawit (PKS) merupakan tantangan penting dalam menjaga kualitas lingkungan; <i>land application</i> digunakan sebagai metode pemanfaatan limbah cair untuk bahan penyubur tanah; memiliki potensi risiko pencemaran lingkungan jika tidak dikelola dengan baik.
2	Asumsi Awal	Penerapan sistem <i>land application</i> memberikan dampak positif maupun negatif terhadap berbagai komponen lingkungan.
3	Kajian Kuantitatif Tiga Komponen	(1) Karakteristik limbah cair (fisika-kimia); (2) perubahan kualitas tanah (fisik dan kimia); (3) kualitas air (air tanah dan air permukaan di sekitar area aplikasi).
4	Evaluasi Kelayakan Lingkungan	Menilai kelayakan lingkungan sistem <i>land application</i> sebagai metode pengelolaan limbah cair PKS berdasarkan hasil pengukuran kuantitatif.
5	Hasil/Output	Rumusan evaluasi kelayakan lingkungan sistem <i>land application</i> untuk meminimalkan dampak negatif serta meningkatkan efektivitas dan keberlanjutan sistem.

Sumber: Hasil Penelitian, 2025

Penelitian dilaksanakan pada tahun 2025 di kawasan operasional PT X, perusahaan perkebunan kelapa sawit terintegrasi yang melakukan budidaya serta pengolahan TBS menjadi CPO dan *Palm Kernel* (PK) di Kabupaten Kutai Timur, Provinsi Kalimantan Timur. PT X mengelola areal seluas ± 20.220 Ha, sedangkan ruang lingkup penelitian ini adalah area *land application* seluas 278,50 Ha. Area pengolahan POME dan blok aplikasi berbatasan langsung dengan ekosistem darat dan badan air penerima, yaitu Sungai Ketiau. Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) di lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Instalasi Pengolahan Air Limbah Pabrik Kelapa Sawit PT X

Sumber: Dokumentasi Penelitian, 2025

Populasi penelitian mencakup seluruh matriks lingkungan yang berpotensi terdampak kegiatan *land application* POME. Titik sampel ditentukan secara *purposive sampling* berdasarkan dokumen Persetujuan Teknis (Pertek) pengelolaan limbah cair PT X yang telah disahkan oleh Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kabupaten Kutai Timur, sehingga representatif secara metodologis dan sah secara regulasi. Sampel tanah komposit diambil satu kali dalam setahun pada tiga zona perlakuan, yaitu dalam rorak (Blok F 014), antar-rorak (Blok F 014), dan lahan kontrol tanpa aplikasi (Blok E 013), masing-masing pada enam interval kedalaman (0–20, 20–40, 40–60, 60–80, 80–100, dan 100–120 cm) menggunakan bor tanah (*soil auger*), sehingga diperoleh 18 sampel. Sampel air tanah diambil dua kali setahun (semester I dan II) pada empat titik, yaitu sumur pantau *upstream* sebagai rujukan rona awal, sumur pantau *downstream* pada arah aliran hidrogeologi hilir, sumur pantau lahan non-aplikasi sebagai kontrol, dan sumur penduduk sebagai titik reseptor masyarakat (8 sampel). Sampel air permukaan diambil dua kali setahun pada titik *inlet* (hulu) dan *outlet* (hilir) Sungai Ketiau (4 sampel). Sampel *effluent* POME diambil setiap bulan secara *grab sampling* pada *outlet* Kolam 06 IPAL sebelum dialirkan ke area aplikasi (12 sampel). Dengan demikian, total sampel yang dianalisis berjumlah 42 sampel.

Variabel bebas penelitian adalah penerapan sistem *land application* POME yang dicirikan oleh zona spasial aplikasi, dosis dan beban aplikasi, serta frekuensi rotasi pengaliran ke rorak. Variabel terikat adalah respons kualitas matriks lingkungan, yaitu: (1) mutu *effluent* POME, meliputi BOD₅, COD, pH, minyak dan lemak, serta logam total (Pb, Cu, Cd, dan Zn); (2) mutu tanah, meliputi pH H₂O dan pH KCl, kation basa (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, dan K⁺), KTK, Al³⁺, H⁺, N-total, C-organik, rasio C/N, P₂O₅ dan K₂O tersedia, kejenuhan basa (KB), kejenuhan Al, minyak dan lemak, fraksi tekstur, serta logam Pb, Cd, Cu, dan Zn; (3) mutu air tanah, meliputi BOD₅, oksigen terlarut (DO), pH, nitrat, amonia, logam terlarut, klorida, dan sulfat; serta (4) mutu air permukaan yang mencakup parameter fisika, kimia anorganik, logam terlarut, dan mikrobiologi sesuai Lampiran VI PP No. 22 Tahun 2021.

Pengumpulan data dilakukan melalui observasi lapangan terhadap tata letak blok rorak, rotasi pengaliran *effluent*, keberadaan sumur pantau dan alur Sungai Ketiau, serta indikasi

limpasan permukaan; pengambilan sampel sesuai prosedur Standar Nasional Indonesia (SNI); analisis laboratorium; dan dokumentasi. Analisis tanah dilakukan di Laboratorium Universitas Mulawarman, sedangkan analisis air dan *effluent* dilakukan di Laboratorium Sucofindo, dengan metode antara lain elektroda (pH), *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) untuk kation dan logam, Kjeldahl (N-total), Walkley & Black (C-organik), spektrofotometri (P_2O_5), metode pipet dan ayakan (tekstur), serta *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA) untuk air. Validitas isi dijamin melalui penyusunan parameter yang mengacu pada baku mutu resmi dan verifikasi pakar, sedangkan reliabilitas dijaga melalui analisis duplikat, standardisasi prosedur, serta kalibrasi peralatan lapangan dan laboratorium (spektrofotometer UV-Vis, AAS, dan *Gas Chromatography*) yang memiliki sertifikat kalibrasi aktif.

Data dianalisis secara deskriptif dengan menghitung nilai rata-rata, simpangan baku, serta nilai minimum dan maksimum setiap parameter, kemudian disajikan dalam tabel komparatif, grafik tren, dan profil vertikal. Analisis komparatif dilakukan antar-lokasi sampling (rorak, antar-rorak, dan kontrol; *inlet* dan *outlet*; serta antar-sumur pantau) dan terhadap baku mutu, yaitu Kepmen LH No. 28 dan 29 Tahun 2003 serta Permen LHK No. 5 Tahun 2021 untuk *effluent* ($BOD_5 \leq 5.000$ mg/L; pH 6–9) dan PP No. 22 Tahun 2021 Lampiran VI Kelas II untuk air permukaan. Setiap parameter kemudian diklasifikasikan ke dalam kategori memenuhi atau melampaui baku mutu sebagai dasar penilaian kelayakan lingkungan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik dan Kinerja Pengolahan *Effluent* POME

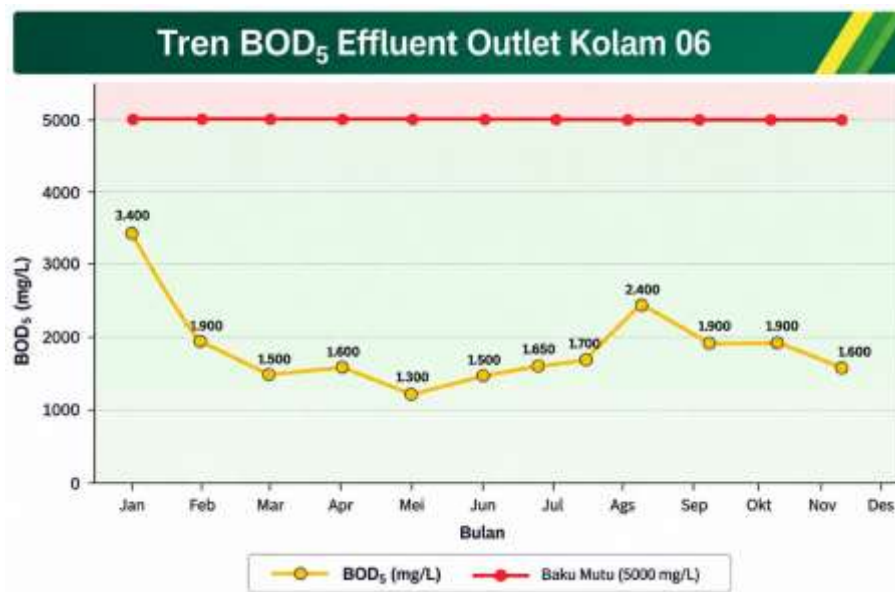
Hasil pemantauan bulanan *effluent* pada *outlet* Kolam 06 IPAL PT X selama tahun 2025 disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kualitas Limbah Cair (*Effluent*) *Outlet* Kolam 06 Tahun 2025

No	Bulan	BOD ₅ (mg/L)	COD (mg/L)	pH (–)	Minyak & Lemak (mg/L)	Pb Total (mg/L)	Cu Total (mg/L)	Cd Total (mg/L)	Zn Total (mg/L)
1	Januari	3.397,26	9.706,47	8,00	8,00	<0,06	<0,01	<0,01	0,03
2	Februari	1.912,06	5.463,03	8,00	8,17	<0,01	<0,02	<0,005	0,01
3	Maret	1.518,62	4.745,70	8,00	7,34	0,10	<0,02	0,014	0,03
4	April	1.555,31	4.443,77	8,00	7,21	<0,01	<0,02	<0,005	0,02
5	Mei	1.280,71	3.659,16	8,00	7,71	<0,01	<0,02	0,005	0,03
6	Juni	1.425,07	4.071,62	8,00	8,57	<0,01	<0,02	0,005	0,03
7	Juli	1.595,98	4.445,66	8	8,71	<0,01	<0,02	<0,005	<0,01
8	Agustus	1.615,3	4.615,15	8	8,14	<0,01	<0,02	<0,005	0,02
9	September	2.363,18	6.715,97	8	6,73	<0,01	<0,02	<0,005	0,02
10	Oktober	1.896,45	5.418,43	8,2	8,71	<0,01	<0,02	<0,005	0,03
11	November	1.903,53	5.438,67	8,35	16,28	<0,01	<0,02	0,01	0,04
12	Desember	1.586,08	4.531,66	8	19,37	<0,01	<0,02	0,01	0,02
	Baku Mutu*	5.000	–	6–9	–	–	–	–	–

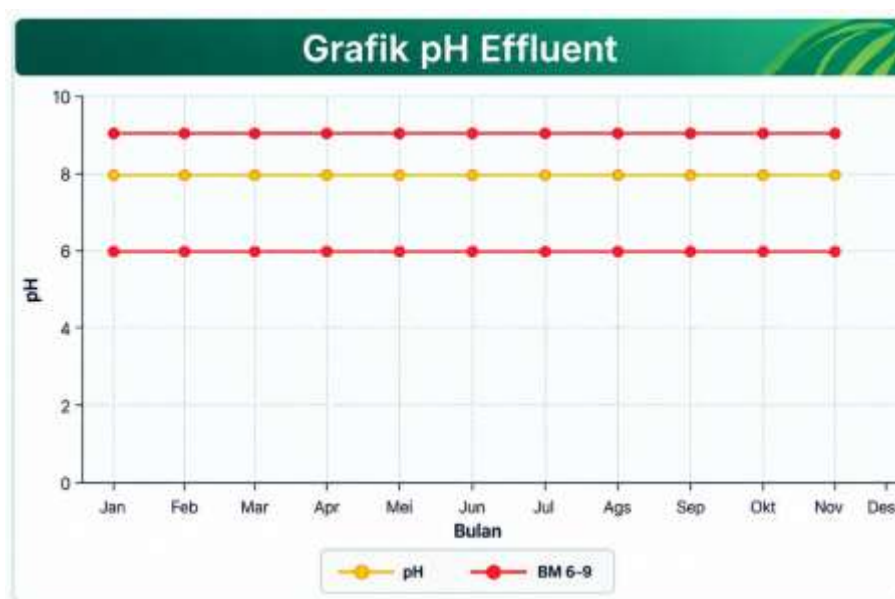
*Kepmen LH No. 28 dan 29 Tahun 2003. Sumber: Hasil Penelitian, Lab Sucofindo 2025

Berdasarkan Tabel 2, konsentrasi BOD₅ *effluent* berkisar antara 1.280,71 mg/L (Mei) hingga 3.397,26 mg/L (Januari) dengan rata-rata $1.837,46 \pm 568,49$ mg/L, sehingga seluruh sampel (100%) memenuhi baku mutu BOD₅ ≤ 5.000 mg/L. Nilai COD berkisar antara 3.659,16–9.706,47 mg/L (rata-rata 5.271,27 mg/L) dan mengikuti pola fluktuasi BOD₅ dengan puncak pada Januari dan September. pH *effluent* stabil pada kisaran basa lemah 8,00–8,35 (rata-rata 8,05) dan seluruhnya berada dalam rentang baku mutu 6–9. Kadar minyak dan lemak berkisar antara 6,73–19,37 mg/L (rata-rata 9,58 mg/L) dengan kecenderungan meningkat pada November–Desember, sedangkan logam total (Pb, Cu, Cd, dan Zn) terdeteksi sangat rendah atau di bawah batas deteksi. Tren BOD₅, pH, serta minyak dan lemak *effluent* disajikan pada Gambar 2, Gambar 3, dan Gambar 4.



Gambar 2. Tren BOD₅ Effluent Outlet Kolam 06 Tahun 2025

Sumber: Hasil Monitoring Laboratorium Sucofindo di PT X Tahun 2025



Gambar 3. pH Effluent Outlet Kolam 06 Tahun 2025

Sumber: Hasil Monitoring Laboratorium Sucofindo di PT X Tahun 2025



Gambar 4. Tren Minyak dan Lemak *Effluent Outlet* Kolam 06 Tahun 2025

Sumber: Hasil Monitoring Laboratorium Sucofindo di PT X Tahun 2025

Rendahnya BOD₅ relatif terhadap ambang batas menunjukkan bahwa fraksi organik mudah terdegradasi (*labile organic matter*) telah teroksidasi dalam rangkaian kolam anaerobik hingga kolam pematangan (*maturation pond*), sehingga risiko kondisi anoksik ekstrem di zona perakaran dan pencucian hara berlebih di zona vadosa dapat ditekan. Temuan ini sejalan dengan (Sitorus & Mardina, 2020) yang melaporkan bahwa limbah cair hasil stabilisasi kolam IPAL memiliki nilai BOD, COD, TSS, dan pH yang aman sebelum diaplikasikan ke lahan, serta dengan (Melisa & Apriyanto, 2020) yang menekankan pentingnya pemantauan pH dan debit pada setiap tingkatan kolam. Sifat basa lemah *effluent* menjadi faktor kunci keberhasilan *land application* karena berperan sebagai penyangga (*buffer*) yang menaikkan pH tanah masam, memperbesar muatan tergantung pH (*variable charge*) pada koloid tanah, dan mendukung peningkatan kejenuhan basa. Pengolahan yang matang juga mengendalikan padatan tersuspensi sehingga mencegah penyumbatan pori (*soil clogging*) dan menjaga kapasitas infiltrasi rorak. Kenaikan minyak dan lemak pada akhir tahun menunjukkan perlunya pengendalian proses yang lebih ketat, mengingat (Sisnayati et al., 2021) membuktikan bahwa perlakuan aerasi dapat menurunkan parameter tersebut secara signifikan.

Dampak terhadap Sifat Kimia dan Kesuburan Tanah

Hasil analisis sifat kimia, fisik, dan logam tanah pada zona dalam rorak, antar-rorak, dan lahan kontrol disajikan berturut-turut pada Tabel 3, Tabel 4, dan Tabel 5.

Tabel 3–5 menunjukkan bahwa tanah orisinal di lokasi penelitian bersifat sangat masam, sebagaimana tercermin pada lahan kontrol (pH H₂O 4,09–4,60; rata-rata 4,29) dan antar-rorak (pH H₂O 4,03–4,71). Sebaliknya, zona dalam rorak memiliki pH H₂O 6,86–7,51 (rata-rata 7,28) dan pH KCl 6,60–6,85 yang tergolong netral. Kenaikan pH ini dipicu oleh suplai basa terlarut dari *effluent* yang bersifat basa lemah (pH 8,00–8,35) dan memicu presipitasi aluminium sebagai Al(OH)₃. Akibatnya, kejenuhan Al pada zona rorak hanya 5,96% di lapisan 0–20 cm dan 0,00% pada kedalaman 20–120 cm, jauh lebih rendah dibandingkan lahan kontrol (16,34–35,44%; rata-rata 25,68%) dan antar-rorak (34,54–72,64%). Hilangnya Al³⁺ dapat

dipertukarkan membebaskan perakaran aktif (*feeder roots*) kelapa sawit dari hambatan toksisitas aluminium dan memperluas jangkauan penyerapan air serta hara.

Pengayaan hara makro terlihat sangat nyata pada zona rorak. P_2O_5 tersedia mencapai 194,87–233,62 ppm pada kedalaman 0–60 cm dan menurun menjadi 10,94–68,36 ppm pada kedalaman 60–120 cm, sedangkan pada lahan kontrol hanya 12,48–22,39 ppm dan antar-rorak 0,17–8,55 ppm. K_2O tersedia pada zona rorak berkisar 58,75–89,52 ppm, jauh di atas lahan kontrol (2,14–9,56 ppm) dan antar-rorak (1,92–34,40 ppm). Kation basa, khususnya Mg^{2+} (hingga 6,21 meq/100 g) dan K^+ (0,62–1,68 meq/100 g), mendesak kation masam (H^+ dan Al^{3+}) dari kompleks jerapan sehingga kejenuhan basa pada zona rorak mencapai 88,86–95,14%, dibandingkan lahan kontrol 33,56–53,70% dan antar-rorak 8,83–33,79%. KTK tertinggi juga dijumpai pada lapisan permukaan rorak (9,78 meq/100 g). N-total (0,04–0,25%) dan C-organik (0,34–2,57%) pada zona rorak terkonsentrasi di lapisan *topsoil* dan menurun seiring bertambahnya kedalaman. Temuan ini konsisten dengan Saputra et al., (2021) yang melaporkan peningkatan retensi serta serapan N, P, dan K akibat aplikasi limbah cair PKS, dan mendukung kesimpulan (Clario & Sakiah, 2025) mengenai efektivitas POME sebagai pupuk organik cair.

Tabel 3. Kualitas Tanah Zona Dalam Rorak

No	Parameter	Metode	Satuan	Rorak (Blok F 014) – Kedalaman (cm)					
				0–20	20–40	40–60	60–80	80–100	100–120
Analisa Kimia									
1	pH H ₂ O (1:2,5)	Electrode	—	6,86	7,14	7,30	7,47	7,51	7,38
2	pH KCl (N:1:2,5)	Electrode	—	6,60	6,64	6,64	6,73	6,85	6,69
3	Kation Basa	NH ₄ OAc							
	Ca ²⁺	AAS	meq/100g	1,57	1,63	1,51	1,45	1,25	0,83
	Mg ²⁺	AAS	meq/100g	6,21	3,71	1,62	1,38	1,35	1,07
	Na ⁺	AAS	meq/100g	0,05	0,02	0,05	0,01	0,03	0,01
	K ⁺	AAS	meq/100g	0,62	1,17	1,29	1,29	1,51	1,68
4	KTK	Hitung	meq/100g	9,78	6,86	4,98	4,77	4,63	3,84
5	Al ³⁺	Titrasi	meq/100g	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	H ⁺	Titrasi	meq/100g	0,75	0,33	0,50	0,42	0,33	0,25
7	N-Total	Kjeldahl	%	0,25	0,07	0,11	0,06	0,05	0,04
8	C-Organik	Walkley-Black	%	2,57	1,32	0,91	0,72	0,47	0,34
9	Rasio C/N	Hitung	—	10,10	18,17	8,51	12,94	9,35	8,87
10	P ₂ O ₅ Tersedia	Spectronic	ppm	194,87	229,05	233,62	41,70	68,36	10,94
11	K ₂ O Tersedia	AAS	ppm	58,75	83,49	85,92	87,90	89,52	88,80
12	Kejenuhan Basa	Hitung	%	88,86	95,14	89,95	91,26	92,81	93,50
13	Kejenuhan Al	Hitung	%	5,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	Minyak dan Lemak	Soxhlet	—	1,39	1,21	1,16	1,13	1,04	1,33
Analisa Fisik									
1	Silt (debu)	Pipet	%	10	12	7	17	10	23
2	Clay (liat)	Pipet	%	12	19	27	28	31	21
3	Sand (pasir)	Sieve	%	78	69	66	55	59	56
4	Tekstur	Segitiga Tekstur	—	SL	SL	SCL	SCL	SCL	SCL
Analisa Logam									
1	Pb	AAS	mg/kg	2,12	2,88	3,10	3,79	4,25	4,63
2	Cd	AAS	mg/kg	0,40	0,24	0,32	0,27	0,25	0,17
3	Cu	AAS	mg/kg	14,7	0,67	0,84	2,00	1,84	1,67
4	Zn	AAS	mg/kg	10,84	4,71	3,82	3,37	3,76	3,87

Sumber: Hasil Penelitian Sampel Tanah, Lab Universitas Mulawarman 2025

Tabel 4. Kualitas Tanah Zona Antar-Rorak

No	Parameter	Metode	Satuan	Antar Rorak (Blok F 014) – Kedalaman (cm)					
				0–20	20–40	40–60	60–80	80–100	100–120
Analisa Kimia									
1	pH H ₂ O (1:2,5)	Electrode	–	4,69	4,71	4,50	4,33	4,03	4,09
2	pH KCl (N:1:2,5)	Electrode	–	3,95	4,04	4,04	4,01	3,88	3,90
3	Kation Basa	NH ₄ OAc							
	Ca ²⁺	AAS	meq/100g	0,70	0,13	0,13	0,10	0,12	0,30
	Mg ²⁺	AAS	meq/100g	0,09	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
	Na ⁺	AAS	meq/100g	0,01	0,01	0,05	0,01	0,03	0,01
	K ⁺	AAS	meq/100g	0,18	0,10	0,08	0,06	0,04	0,05
4	KTK	Hitung	meq/100g	2,89	1,86	1,95	1,87	2,38	2,56
5	Al ³⁺	Titrasi	meq/100g	1,00	1,17	1,17	1,42	1,08	1,50
6	H ⁺	Titrasi	meq/100g	0,92	0,42	0,25	0,58	0,67	0,50
7	N-Total	Kjeldahl	%	0,07	0,05	0,05	0,05	0,03	0,04
8	C-Organik	Walkley-Black	%	1,18	1,00	0,89	0,65	0,40	0,45
9	Rasio C/N	Hitung	–	17,52	18,73	16,69	12,94	12,94	12,44
10	P ₂ O ₅ Tersedia	Spectronic	ppm	1,03	8,55	4,79	0,86	0,86	0,17
11	K ₂ O Tersedia	AAS	ppm	34,40	24,68	7,85	13,07	1,92	12,80
12	Kejenuhan Basa	Hitung	%	33,79	15,05	14,55	10,97	8,83	15,29
13	Kejenuhan Al	Hitung	%	34,54	62,59	72,64	57,87	63,12	65,16
14	Minyak dan Lemak	Soxhlet	–	1,12	2,07	1,49	0,97	1,02	1,12
Analisa Fisik									
1	Silt (debu)	Pipet	%	16	7	11	16	13	16
2	Clay (liat)	Pipet	%	21	21	24	21	26	22
3	Sand (pasir)	Sieve	%	63	72	65	63	61	62
4	Tekstur	Segitiga Tekstur	–	SCL	SCL	SCL	SCL	SCL	SCL
Analisa Logam									
1	Pb	AAS	mg/kg	3,56	5,46	189,29	12,92	5,39	4,70
2	Cd	AAS	mg/kg	0,17	0,30	0,21	0,21	0,20	0,17
3	Cu	AAS	mg/kg	0,84	1,34	0,97	1,34	1,34	0,34
4	Zn	AAS	mg/kg	5,18	3,87	5,70	3,80	4,25	4,33

Sumber: Hasil Penelitian Sampel Tanah, Lab Universitas Mulawarman 2025

Tabel 5. Kualitas Tanah Lahan Kontrol

No	Parameter	Metode	Satuan	Lahan Kontrol (Blok E 013) – Kedalaman (cm)					
				0–20	20–40	40–60	60–80	80–100	100–120
Analisa Kimia									
1	pH H ₂ O (1:2,5)	Electrode	–	4,60	4,28	4,22	4,33	4,23	4,09
2	pH KCl (N:1:2,5)	Electrode	–	4,12	4,02	4,00	4,00	4,03	4,00
3	Kation Basa	NH ₄ OAc							
	Ca ²⁺	AAS	meq/100g	1,44	1,56	1,80	1,64	1,04	0,64
	Mg ²⁺	AAS	meq/100g	0,10	0,07	0,08	0,08	0,04	0,02
	Na ⁺	AAS	meq/100g	0,05	0,07	0,08	0,05	0,06	0,03
	K ⁺	AAS	meq/100g	0,06	0,06	0,05	0,04	0,05	0,02
4	KTK	Hitung	meq/100g	3,06	3,58	3,93	3,37	2,35	2,13
5	Al ³⁺	Titrasi	meq/100g	0,50	0,83	0,75	0,83	0,83	0,75
6	H ⁺	Titrasi	meq/100g	0,92	1,00	1,17	0,75	0,33	0,67
7	N-Total	Kjeldahl	%	0,13	0,15	0,17	0,14	0,06	0,05
8	C-Organik	Walkley-Black	%	2,41	2,95	3,37	3,13	1,49	0,92
9	Rasio C/N	Hitung	–	18,71	20,28	20,06	22,39	26,53	18,33
10	P ₂ O ₅ Tersedia	Spectronic	ppm	22,39	17,43	17,78	22,22	15,04	12,48
11	K ₂ O Tersedia	AAS	ppm	9,56	7,85	8,84	2,55	2,28	2,14
12	Kejenuhan Basa	Hitung	%	53,70	48,84	51,18	53,01	50,38	33,56
13	Kejenuhan Al	Hitung	%	16,34	23,26	19,10	24,73	35,44	35,18
14	Minyak dan Lemak	Soxhlet	–	0,96	1,02	1,31	1,25	0,70	0,58
Analisa Fisik									
1	Silt (debu)	Pipet	%	16	29	32	32	18	17
2	Clay (liat)	Pipet	%	23	20	26	19	14	14
3	Sand (pasir)	Sieve	%	61	51	42	49	68	69
4	Tekstur	Segitiga Tekstur	–	SCL	Loam	Loam	Loam	SL	SL
Analisa Logam									
1	Pb	AAS	mg/kg	6,83	7,74	9,72	18,70	52,10	37,64
2	Cd	AAS	mg/kg	0,32	0,16	0,16	0,06	0,03	0,02
3	Cu	AAS	mg/kg	0,34	2,00	2,00	3,33	1,84	1,50
4	Zn	AAS	mg/kg	12,18	10,89	8,68	4,65	3,87	3,52

Sumber: Hasil Penelitian Sampel Tanah, Lab Universitas Mulawarman 2025

Perbaikan sifat kimia tanah tersebut bersifat terlokalisasi (*localized effect*) pada zona rorak. Zona antar-rorak yang berjarak dekat dari saluran aplikasi masih menunjukkan karakter tanah masam yang serupa dengan lahan kontrol, bahkan dengan kejenuhan Al dan kejenuhan basa yang lebih buruk. Pola ini menunjukkan bahwa kation hara dan bahan organik dari POME terperap secara efisien oleh koloid tanah di dalam rorak dan tidak mengalami pelindian lateral (*lateral leaching*) secara luas, sehingga rorak berfungsi sebagai perangkap hara (*nutrient trap*) yang memfokuskan ketersediaan hara pada area piringan dan perakaran aktif tanaman.

Sifat Fisik dan Logam Berat Tanah

Berdasarkan analisis granulometri, tekstur tanah zona rorak tergolong *Sandy Loam* (SL) pada kedalaman 0–40 cm dan beralih menjadi *Sandy Clay Loam* (SCL) pada kedalaman 40–120 cm dengan fraksi liat 21–31% dan debu hingga 23%. Zona antar-rorak didominasi SCL pada seluruh kedalaman, sedangkan lahan kontrol bervariasi dari SCL, *Loam*, hingga SL.

Peningkatan fraksi liat pada lapisan *subsoil* rorak mendukung retensi air serta hara terlarut dari POME. Kondisi ini sejalan dengan (Rasyidin et al., 2024) bahwa lapisan lempung pasir berpermeabilitas sedang menahan hara di zona perakaran, serta dengan (Delsiyanti et al., 2016) yang menekankan peran fraksi tekstur terhadap permeabilitas dan porositas tanah.

Konsentrasi logam berat pada zona rorak relatif rendah, yaitu Pb 2,12–4,63 mg/kg, Cd 0,17–0,40 mg/kg, Cu 0,67–14,7 mg/kg, dan Zn 3,37–10,84 mg/kg. Nilai Cu dan Zn tertinggi dijumpai pada lapisan 0–20 cm dan menurun tajam pada lapisan di bawahnya, sehingga tidak terlihat indikasi pencucian logam hingga lapisan 100–120 cm. Konsentrasi Pb pada zona rorak juga lebih rendah dibandingkan lahan kontrol (6,83–52,10 mg/kg). Adapun nilai Pb yang menonjol pada zona antar-rorak kedalaman 40–60 cm (189,29 mg/kg) merupakan titik tunggal yang tidak diikuti oleh lapisan di atas maupun di bawahnya, sehingga perlu diverifikasi melalui pemantauan berikutnya. Secara umum, *effluent* yang hanya mengandung logam total dalam kadar sangat rendah (Tabel 2) tidak menunjukkan kontribusi berarti terhadap akumulasi logam berat pada zona aplikasi.

Dampak terhadap Kualitas Air Permukaan Sungai Ketiau

Kondisi curah hujan berpengaruh langsung terhadap mekanisme infiltrasi, perkolasi, erosi, dan limpasan permukaan pada zona *land application* maupun badan air penerima. Data curah hujan dan hari hujan di kawasan operasional PT X tahun 2025 disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Data Curah Hujan dan Hari Hujan PT X Tahun 2025

Parameter	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Ags	Sep	Okt	Nov	Des
Curah Hujan	–	102,0	205,8	376,7	100,4	124,7	0,8	369,6	110,1	186,2	150,0	213,0
Hari Hujan	–	14	14	13	14	20	2	26	20	23	20	26

Sumber: Monitoring Data Curah Hujan dan Hari Hujan PT X Tahun 2025

Tabel 6 menunjukkan bahwa curah hujan tertinggi terjadi pada April (376,7) dan Agustus (369,6), dengan hari hujan terbanyak pada Agustus dan Desember (26 hari), sedangkan Juli merupakan bulan terkering (0,8 dengan 2 hari hujan) dan data Januari tidak tercatat. Hasil pengukuran kualitas air Sungai Ketiau pada titik *inlet* dan *outlet* selama dua semester disajikan pada Tabel 7.

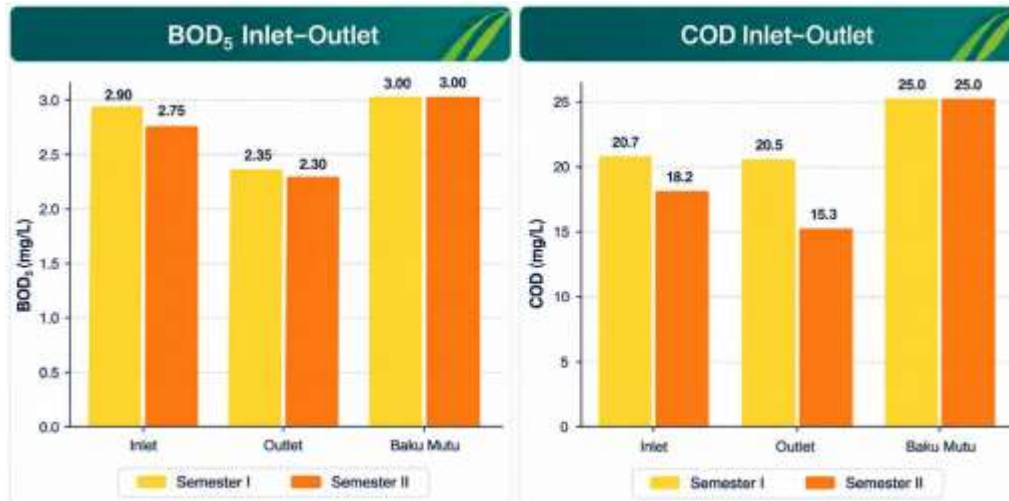
Tabel 7. Kualitas Air Permukaan Sungai Ketiau Tahun 2025

No	Parameter	Satuan	Baku Mutu Kelas II*	Semester I		Semester II	
				Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
Fisika							
1	Temperatur <i>on site</i>	°C	Normal ± 3	27,6	28,1	27,1	26,4
2	Total Dissolved Solid	mg/L	1.000	13,00	13,00	35	35
3	Total Suspended Solid	mg/L	50	21,00	40,00	10	38
4	Warna	Pt-Co	50	44,28	43,56	12,43	44,25
Kimia Anorganik							
5	pH <i>on site</i>	—	6–9	6,39	7,58	6,07	4,81
6	BOD ₅ 20 °C	mg/L	3	2,92	2,39	2,75	2,33
7	COD (K ₂ Cr ₂ O ₇)	mg/L	25	20,92	20,53	18,27	15,46
8	Oksigen Terlarut (DO)	mg/L	4	3,96	3,88	7,9	7,76
9	Sulfat	mg/L	300	18,41	19,72	12,71	5,34
10	Klorida	mg/L	300	2,67	2,93	5,93	0,34
11	Nitrat sebagai N	mg/L	10	0,23	0,03	0,13	<0,12
12	Nitrit sebagai N	mg/L	0,06	<0,02	<0,02	0,023	<0,02
13	Amonia sebagai N	mg/L	0,1	0,13	0,09	<0,03	<0,03
14	Total Nitrogen	mg/L	15	1,00	2,00	6	4
15	Total Fosfat sebagai P	mg/L	0,2	<0,03	<0,03	<0,01	<0,01
16	Fluorida	mg/L	1,5	<0,01	0,01	<0,03	0,08
17	Sulfur sebagai H ₂ S	mg/L	0,002	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
18	Sianida	mg/L	0,02	<0,01	<0,01	<0,02	<0,02
19	Klorin Bebas	mg/L	0,03	<0,02	<0,02	0,22	0,11
20	Barium terlarut (Ba)	mg/L	—	<0,15	<0,15	<0,05	<0,05
21	Boron terlarut (B)	mg/L	1	<0,02	<0,02	0,108	0,104
22	Raksa terlarut (Hg)	mg/L	0,002	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
23	Arsen terlarut (As)	mg/L	0,05	<0,0002	<0,0002	<0,001	<0,001
24	Selenium terlarut (Se)	mg/L	0,05	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
25	Besi terlarut (Fe)	mg/L	—	1,04	1,53	1,95	0,68
26	Kadmium terlarut (Cd)	mg/L	0,01	<0,0002	<0,0002	<0,001	<0,001
27	Kobalt terlarut (Co)	mg/L	0,2	<0,0006	<0,0006	<0,02	<0,02
28	Mangan terlarut (Mn)	mg/L	—	<0,01	0,01	<0,02	0,08
29	Nikel terlarut (Ni)	mg/L	0,05	<0,02	<0,02	<0,03	<0,03
30	Seng terlarut (Zn)	mg/L	0,05	<0,01	<0,01	<0,02	<0,02
31	Tembaga terlarut (Cu)	mg/L	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
32	Timbal terlarut (Pb)	mg/L	0,03	<0,02	<0,02	<0,01	<0,01
33	Kromium heksavalen	mg/L	0,05	<0,021	<0,021	<0,02	<0,02
34	Minyak & Lemak	mg/L	1	<0,90	<0,90	<0,01	<0,01
35	Surfaktan Anionik (MBAS)	mg/L	0,2	<0,0006	<0,0003	<0,006	<0,006
36	Senyawa Fenol	mg/L	0,005	<0,0001	<0,0001	<0,001	<0,001
Mikrobiologi							
37	Fecal Coliform	MPN/100mL	1.000	15	18	32	25
38	Total Coliform	MPN/100mL	5.000	109	81	108	165
39	Debit (<i>flowrate</i>)	m ³ /s	—	0,20	0,20	0,07	0,21

*PP No. 22 Tahun 2021 Lampiran VI, Kelas II. Sumber: Hasil Penelitian, Lab Sucofindo 2025

Berdasarkan Tabel 7, parameter beban organik pada titik *outlet* tidak lebih tinggi daripada titik *inlet*. BOD₅ *outlet* sebesar 2,39 mg/L (semester I) dan 2,33 mg/L (semester II) lebih rendah dibandingkan *inlet* (2,92 dan 2,75 mg/L), sedangkan COD *outlet* sebesar 20,53 dan 15,46 mg/L juga lebih rendah daripada *inlet* (20,92 dan 18,27 mg/L); seluruhnya

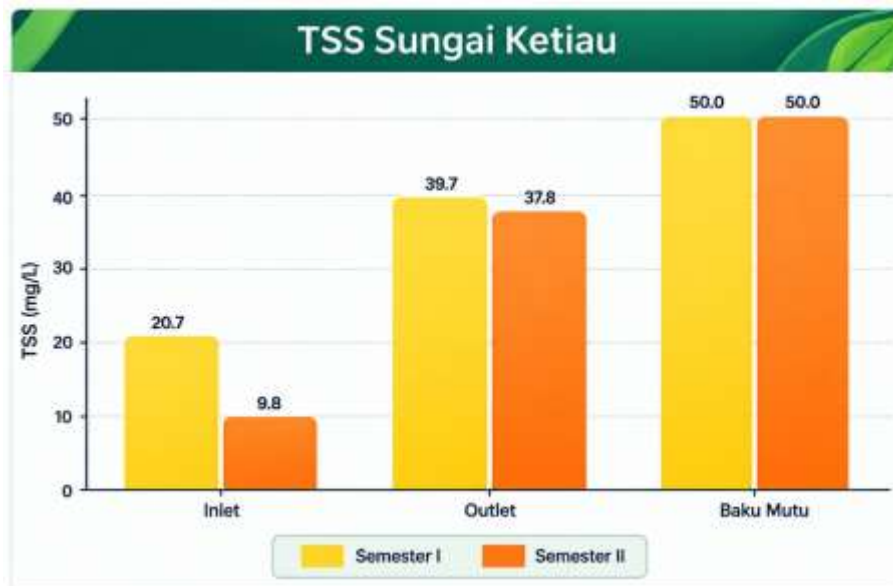
memenuhi baku mutu Kelas II ($\text{BOD}_5 \leq 3 \text{ mg/L}$; $\text{COD} \leq 25 \text{ mg/L}$) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5. Nitrat, nitrit, total nitrogen, total fosfat, logam berat terlarut (Pb, Cd, Cu, Zn, Hg, As, dan Cr^{6+}), minyak dan lemak, deterjen, fenol, serta parameter mikrobiologi berada pada kadar sangat rendah atau di bawah batas deteksi dan memenuhi baku mutu. Pola spasial ini menunjukkan tidak adanya kebocoran (*accidental discharge*) maupun limpasan langsung *effluent* dari blok aplikasi menuju sungai, sehingga kapasitas asimilasi alami Sungai Ketiau tetap terjaga.



Gambar 5. Perbandingan BOD_5 dan COD *Inlet–Outlet* Sungai Ketiau Tahun 2025 terhadap Baku Mutu

Sumber: Hasil Monitoring Laboratorium Sucofindo di PT X Tahun 2025

Konsentrasi TSS meningkat dari *inlet* ke *outlet*, yaitu dari 21 menjadi 40 mg/L pada semester I dan dari 10 menjadi 38 mg/L pada semester II (Gambar 6), namun tetap memenuhi baku mutu $\leq 50 \text{ mg/L}$. Kenaikan TSS yang tidak diikuti oleh peningkatan BOD_5 dan COD mengindikasikan bahwa material tersuspensi lebih banyak berasal dari erosi lembar (*sheet erosion*) dan limpasan permukaan lahan daratan pada periode curah hujan tinggi dibandingkan dari buangan limbah cair PKS. Beberapa parameter tercatat berada di luar baku mutu, yaitu DO semester I pada *inlet* (3,96 mg/L) dan *outlet* (3,88 mg/L) yang sedikit di bawah batas minimum 4 mg/L, amonia *inlet* semester I (0,13 mg/L), klorin bebas semester II pada *inlet* (0,22 mg/L) dan *outlet* (0,11 mg/L), serta pH *outlet* semester II (4,81). Karena sebagian besar penyimpangan tersebut juga terjadi pada titik *inlet* yang belum melintasi area aplikasi, kondisi itu lebih mencerminkan karakter sungai di bagian hulu, sedangkan pH *outlet* yang rendah perlu dicermati dalam pemantauan berikutnya mengingat tanah kawasan secara alami bersifat masam. Temuan ini sejalan dengan (Nursarif et al., 2023) bahwa kualitas air sungai dipengaruhi oleh aktivitas penggunaan lahan di sepanjang alirannya.



Gambar 6. Perbandingan TSS Sungai Ketiau Tahun 2025 terhadap Baku Mutu

Sumber: Hasil Monitoring Laboratorium Sucofindo di PT X Tahun 2025

Dampak terhadap Kualitas Air Tanah

Hasil pemantauan kualitas air tanah pada empat titik sumur selama dua semester disajikan pada Tabel 8, sedangkan kondisi sumur pantau di lapangan ditunjukkan pada Gambar 7.

Tabel 8. Kualitas Air Tanah pada Sumur Pantau dan Sumur Penduduk Tahun 2025

No	Parameter	Satuan	Semester I				Semester II			
			UP	NLA	SP	DS	UP	NLA	SP	DS
1	BOD ₅ 20 °C	mg/L	5,41	5,12	4,82	4,67	5,34	6,29	5,12	3,93
2	Oksigen Terlarut	mg/L	7,76	7,48	8,01	7,38	7,36	8,02	7,64	7,69
3	pH <i>on site</i>	–	6,81	6,32	6,02	7,14	6,01	6,01	6,04	6,27
4	Nitrat (NO ₃ -N)	mg/L	9,09	0,44	2,39	4,49	0,86	1,50	0,56	0,79
5	Amonia (NH ₄ -N)	mg/L	0,05	0,12	0,13	0,09	0,45	0,69	0,42	0,48
6	Cd terlarut	mg/L	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	14,08	12,76	14,10	13,39
7	Cu terlarut	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	0,01	21,34	25,17	20,46	15,7
8	Pb terlarut	mg/L	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,90	<0,90	<0,90	<0,90
9	Zn terlarut	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	5,34	6,29	5,12	3,93
10	Klorida (Cl ⁻)	mg/L	2,65	3,06	1,32	2,34	7,36	8,02	7,64	7,69
11	Sulfat (SO ₄ ²⁻)	mg/L	11,89	26,21	7,62	11,65	6,01	6,01	6,04	6,27

Keterangan: UP = sumur pantau *land application up stream*; NLA = sumur pantau non *land application*; SP = sumur penduduk; DS = sumur pantau *land application down stream*. Acuan: Kepmen LH No. 28 dan 29 Tahun 2003. Sumber: Hasil Penelitian, Lab Sucofindo 2025



Gambar 7. Sumur Pantau di Area *Land Application* PT X

Sumber: Dokumentasi Penelitian, 2025

Tabel 8 menunjukkan bahwa pH air tanah berada pada kisaran 6,01–7,14 dan DO 7,36–8,02 mg/L, yang menandakan akuifer tetap berada dalam kondisi aerobik. BOD₅ air tanah berkisar 3,93–6,29 mg/L dan tidak menunjukkan pola peningkatan pada sumur *downstream*, yang justru memiliki nilai terendah pada kedua semester (4,67 dan 3,93 mg/L), sebagaimana terlihat pada Gambar 8. Nitrat tertinggi tercatat pada sumur *upstream* semester I (9,09 mg/L) dan menurun menjadi 0,86 mg/L pada semester II, sedangkan amonia berkisar 0,05–0,69 mg/L. Pada semester I, logam terlarut Cd, Pb, dan Zn berada di bawah batas deteksi dan Cu $\leq$ 0,01 mg/L pada seluruh sumur. Tidak adanya perbedaan yang konsisten antara sumur *downstream*, sumur penduduk, dan sumur kontrol non-aplikasi menunjukkan bahwa kegiatan *land application* tidak menimbulkan pola pencemaran pada akuifer dangkal.



Gambar 8. BOD₅ Air Tanah Menurut Lokasi Tahun 2025

Sumber: Hasil Monitoring Laboratorium Sucofindo di PT X Tahun 2025

Perlindungan akuifer tersebut didukung oleh profil tanah zona rorak yang pada lapisan *subsoil* (40–120 cm) bertransisi menjadi SCL dengan fraksi liat 21–31% dan debu hingga 23%. Matriks liat yang bermuatan negatif dan memiliki luas permukaan spesifik besar berfungsi sebagai penyaring fisik sekaligus media penukar ion yang mengikat kation logam dan senyawa organik terlarut, sementara waktu tinggal cairan di zona tak jenuh (*vadose zone*) memberi kesempatan bagi mikroorganisme tanah untuk melakukan biodegradasi alami (*natural attenuation*) sebelum mencapai zona jenuh. Hasil ini menjawab kekhawatiran (Mulyanto et al., 2023) dan (Dewi & Lamona, 2025) mengenai risiko perembesan limbah cair kelapa sawit, dengan catatan bahwa perlindungan tersebut bergantung pada pengelolaan *effluent* dan rorak yang konsisten.

Kelayakan Lingkungan Sistem *Land Application*

Secara keseluruhan, penerapan *land application* di PT X menunjukkan dampak positif dominan (*beneficial impact*) pada kompartemen tanah dan tidak menunjukkan dampak negatif signifikan (*no significant adverse effect*) pada parameter utama air permukaan dan air tanah. Kelayakan ini mensyaratkan konsistensi kinerja IPAL (BOD_5 jauh di bawah 5.000 mg/L dan pH 6–9), kepatuhan terhadap dosis dan rotasi aplikasi rorak, serta operasional yang berada dalam koridor Pertek dan SLO dari DLH Kabupaten Kutai Timur. Secara praktis, kandungan P dan K yang tinggi di sekitar rorak membuka peluang substitusi parsial pupuk anorganik seperti KCl/MOP dan TSP/SP-36, sementara keamanan terhadap Sungai Ketiau dan akuifer dangkal memperkuat pemenuhan standar keberlanjutan seperti ISPO/RSPO dan penilaian Kinerja Kepatuhan Lingkungan (PROPER). Karena efek perbaikan tanah bergantung pada fungsi hidrolis rorak, pemeliharaan rorak melalui pengerukan endapan (*desilting*) secara berkala menjadi kunci untuk menjaga laju perkolasi serta mencegah genangan dan limpasan pada musim hujan.

KESIMPULAN

Penerapan sistem *land application* POME pada area seluas 278,50 Ha di PT X tahun 2025 terbukti layak secara lingkungan. IPAL PT X mengolah POME secara efektif sehingga *effluent* Kolam 06 memiliki BOD_5 rata-rata 1.837,46 mg/L dan pH 8,05 serta seluruh sampel memenuhi baku mutu teknis ($BOD_5 \leq 5.000$ mg/L; pH 6–9). Pada kompartemen tanah, aplikasi *effluent* di dalam rorak memberikan dampak positif berupa kenaikan pH dari 4,29 menjadi 7,28, penurunan kejenuhan Al dari 25,68% menjadi 0,00% pada kedalaman 20–120 cm, peningkatan P_2O_5 dan K_2O tersedia, serta kejenuhan basa 88,86–95,14%, dengan efek yang terlokalisasi pada zona rorak dan tanpa indikasi akumulasi logam berat. Parameter utama Sungai Ketiau (BOD_5 , COD, TSS, dan logam berat) memenuhi baku mutu Kelas II PP No. 22 Tahun 2021 dengan nilai *outlet* yang tidak lebih tinggi daripada *inlet*, sedangkan air tanah tidak menunjukkan pola pencemaran berkat filtrasi dan atenuasi alami lapisan *subsoil* bertekstur liat dan debu. Disarankan agar PT X menerapkan SOP pengerukan rorak secara berkala, mengoptimalkan dosis dan rotasi aplikasi berbasis kapasitas infiltrasi dengan menghentikan sementara aplikasi saat hujan ekstrem, memperketat kontrol proses IPAL terutama BOD_5 , pH, TSS, serta minyak dan lemak, dan memantau DO, amonia, klorin bebas, serta pH Sungai Ketiau secara rutin. Instansi lingkungan hidup disarankan menjaga pemantauan per semester pada sumur pantau, sumur penduduk, dan sungai, memastikan pengujian di laboratorium

terakreditasi KAN, serta membangun basis data geospasial terpadu. Penelitian selanjutnya disarankan mengkaji kelayakan tekno-ekonomi substitusi pupuk, dampak jangka panjang terhadap produktivitas kelapa sawit, pemodelan pelindian hara di bawah kedalaman 120 cm, serta dinamika mikrobioma rizosfer.

PENDANAAN

Penulis menyatakan bahwa tidak ada dukungan finansial yang diterima untuk pelaksanaan penelitian ini dan/atau penerbitan artikel ini.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa penelitian ini dilakukan tanpa adanya hubungan komersial atau finansial yang dapat ditafsirkan sebagai potensi konflik kepentingan.

KONTRIBUSI PENULIS

Adha Wahyu Purwanto berkontribusi dalam perumusan gagasan, pengumpulan data lapangan, analisis dan interpretasi data, serta penyusunan manuskrip. Nely Zulfa dan Rizal Ichsan Syah Putra berkontribusi dalam pembimbingan, pengarahan metodologi, serta penelaahan manuskrip. Seluruh penulis telah menyetujui versi akhir manuskrip.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN ARTIFISIAL GENERATIF

Penulis menyatakan bahwa kecerdasan artifisial (AI) generatif digunakan dalam penyusunan manuskrip ini. Penulis mengakui penggunaan AI generatif untuk membantu meningkatkan kejelasan bahasa dan memperbaiki struktur tata bahasa manuskrip. Penggunaan tersebut dilakukan dengan mematuhi pedoman etika yang berlaku mengenai penggunaan dan pengungkapan AI generatif dalam penelitian ilmiah. Setiap penulis telah memberikan kontribusi intelektual yang substansial terhadap karya ini. Seluruh isi manuskrip telah ditelaah secara cermat untuk memastikan keakuratannya, dan penulis bertanggung jawab sepenuhnya atas integritas serta isi akhir manuskrip.

REFERENSI

- Clario, S. R., & Sakiah, S. (2025). Pemanfaatan Limbah Cair PKS sebagai Pupuk Organik Cair: Tinjauan terhadap Pengolahan, Standar Baku Mutu, dan Efektivitasnya dalam Budidaya Kelapa Sawit Berkelanjutan. *Tabela Jurnal Pertanian Berkelanjutan*, 3(2), 78–87.
- Delsiyanti, D., Widjajanto, D., & Rajamuddin, U. A. (2016). *Sifat fisik tanah pada beberapa penggunaan lahan di Desa Oloboju Kabupaten Sigi*. Fakultas Pertanian, Universitas Tadulako.
- Dewi, S. S., & Lamona, A. (2025). *Pengaruh limbah cair kelapa sawit terhadap kesehatan lingkungan di PT Incasi Raya Group*. Program Studi Sarjana Terapan Bisnis Jasa Makanan, Politeknik Aisiyiyah.
- Kurniawan, E., Dewi, R., & Jannah, R. (2022). *Pemanfaatan limbah cair industri kelapa sawit sebagai pupuk organik cair dengan penambahan serat tandan kosong kelapa sawit*. Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh.
- Melisa, & Apriyanto, M. (2020). *Pengolahan limbah cair pabrik kelapa sawit (Studi kasus pada PT. Tri Bakti Sarimas PKS 2 Ibul, Riau)*. Teknologi Pangan, Universitas Islam Indragiri.

- Mulyanto, A., Nasihin, I., Herlina, N., & Nurdin. (2023). *Pengaruh limbah cair kelapa sawit terhadap kualitas air tanah di PT. Nusantara Sawit Persada*. Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, Universitas Kuningan.
- Nursarif, M., Suryanti, & A'in, C. (2023). Studi penentuan kualitas air Sungai Pucang Gading dengan metode National Sanitation Foundation – Water Quality Index (NSF-WQI). *Jurnal Pasir Laut*, 7(2), 74–79.
- Raharjo, H. S. (2019). *Budi daya tanaman kelapa sawit*. Sunda Kelapa Pustaka.
- Rahmayanti, M. (2022). *Pengelolaan limbah: Definisi limbah, klasifikasi dan tahapan pengelolaannya*. Graha Ilmu.
- Raman, S. S., Noor, Z. Z., Syed Narolhisa, S. S., Chong, C. S., & Stringer, L. C. (2019). Energy generation from palm oil mill effluent (POME): The environmental impact perspective. *Chemical Engineering Transactions*, 72, 25–30.
- Rasyidin, M. A., Zulfian, & Sutanto, Y. (2024). *Identifikasi lapisan bawah permukaan tanah pada daerah land application menggunakan metode geolistrik*. Program Studi Geofisika, Universitas Tanjungpura.
- Saputra, F., Tampubolon, G., & Mahbub, I. A. (2021). *Pengaruh aplikasi limbah cair pabrik kelapa sawit terhadap serapan hara N, P, dan K pada tanaman kelapa sawit*. Fakultas Pertanian, Universitas Jambi.
- Sisnayati, S., Dewi, D. S., Apriani, R., & Faizal, M. (2021). Penurunan BOD, TSS, minyak dan lemak pada limbah cair pabrik kelapa sawit menggunakan proses aerasi plat berlubang. *JTK: Jurnal Teknik Kimia*.
- Sitorus, Y. R., & Mardina, V. (2020). Karakteristik kimia dari pengolahan limbah cair kelapa sawit PTPN Y. *Jurnal Envscience*, 4(2), 58–66.
- Zulkifli, A. (2014). *Pengelolaan limbah berkelanjutan*. Graha Ilmu.