

## APLIKASI LIMBAH CAIR KELAPA SAWIT UNTUK MENINGKATKAN KUALITAS TANAH

*Application of Palm Oil Mill Effluent to Improve Soil Quality*

**Widodo Kalalo<sup>1</sup>, Wartono\*<sup>1</sup>, Etty Safriyani<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Program Pascasarjana Magister Ilmu Lingkungan Universitas Musi Rawas

*Corresponding Author:* unmurawartono@gmail.com

### ABSTRACT

*Oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq) is one of the strategic plantation commodities that plays an important role in supplying global vegetable oil and contributes significantly to the national economy. This study aimed to analyze the effect of land application of palm oil mill effluent on soil quality and oil palm production in oil palm plantation areas. The research was conducted from December 2025 to February 2026. The data used included oil palm production data from land with land application and land without application during the 2023–2024 period, as well as soil chemical properties data consisting of soil pH, organic carbon, and nutrient content. The obtained data were analyzed using descriptive statistical analysis by comparing the highest and lowest values between application and non-application areas. The results showed that land receiving land application had higher oil palm production compared to land without application. Total production in 2023 was recorded at 673,311.6 kg and declined in 2024 to 333,105.11 kg; however, the application area consistently demonstrated better production performance. In addition, the application of palm oil mill effluent had a positive effect on improving soil quality through enhancements in soil chemical properties and nutrient availability. Therefore, it can be concluded that the land application of palm oil mill effluent has the potential to improve soil quality and support sustainable crop productivity when properly managed.*

**Keywords:** *Oil Palm, Palm Oil Mill Effluent, Land Application, Soil Quality*

### ABSTRAK

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq) merupakan salah satu komoditas perkebunan strategis yang berperan penting dalam penyediaan minyak nabati dunia serta memberikan kontribusi besar terhadap perekonomian nasional. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh penerapan land application limbah cair kelapa sawit terhadap kualitas tanah dan produksi kelapa sawit di areal perkebunan kelapa sawit. Penelitian dilaksanakan pada bulan Desember 2025 hingga Februari 2026. Data yang digunakan meliputi data produksi kelapa sawit pada lahan dengan penerapan land application dan lahan tanpa aplikasi pada periode tahun 2023–2024, serta data sifat kimia tanah yang meliputi pH tanah, C-organik, dan kandungan unsur hara. Data yang diperoleh dianalisis menggunakan analisis statistik deskriptif dengan membandingkan nilai tertinggi dan terendah antara lahan aplikasi dan non-aplikasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lahan dengan penerapan land application memiliki produksi kelapa sawit yang lebih tinggi dibandingkan lahan tanpa aplikasi. Total produksi pada tahun 2023 tercatat sebesar 673.311,6 kg dan mengalami penurunan pada tahun 2024 menjadi 333.105,11 kg, namun secara konsisten lahan aplikasi menunjukkan kinerja produksi yang lebih baik. Selain itu, aplikasi limbah cair kelapa sawit berpengaruh positif terhadap peningkatan kualitas tanah melalui perbaikan sifat kimia tanah dan ketersediaan unsur hara. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penerapan land application limbah cair kelapa sawit berpotensi meningkatkan kualitas tanah dan mendukung produktivitas tanaman secara berkelanjutan apabila dikelola dengan baik.

**Kata kunci:** Kelapa Sawit, Limbah Cair Kelapa Sawit, Aplikasi Lahan, Kualitas Tanah

## PENDAHULUAN

Perkebunan kelapa sawit mengalami ekspansi yang sangat pesat di berbagai wilayah Indonesia, khususnya di Pulau Sumatera, Kalimantan, dan Sulawesi. Perkembangan ini menjadikan sektor kelapa sawit sebagai komoditas strategis karena kontribusinya yang signifikan terhadap perekonomian melalui peningkatan devisa negara dari ekspor minyak sawit mentah (Crude Palm Oil/CPO) (Supriatna dkk., 2023).

Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS, 2024), produksi kelapa sawit di Provinsi Sumatera Selatan mencapai 3,8 juta ton CPO pada tahun 2023, meningkat dibandingkan tahun sebelumnya sebesar 3,5 juta ton. Namun demikian, peningkatan produksi tersebut masih dihadapkan pada berbagai kendala, terutama faktor iklim serta penurunan kualitas dan kesuburan tanah yang berdampak langsung terhadap produktivitas tanaman kelapa sawit.

Kegiatan pengolahan tandan buah segar kelapa sawit menghasilkan berbagai jenis limbah, meliputi limbah padat, gas, dan cair. Salah satu limbah yang dihasilkan dalam jumlah terbesar dan memiliki potensi pemanfaatan yang tinggi adalah limbah cair kelapa sawit. Limbah cair kelapa sawit berasal dari sisa proses perebusan, klarifikasi, dan pengepresan tandan buah segar di pabrik kelapa sawit (Nasution dkk., 2022). Secara umum, limbah cair kelapa sawit memiliki karakteristik kandungan bahan organik yang sangat tinggi, bersifat asam dengan pH relatif rendah, serta mengandung sisa minyak, lemak, protein, dan senyawa organik kompleks lainnya yang mudah terdegradasi secara biologis.

Apabila limbah cair kelapa sawit dibuang langsung ke lahan tanpa pengelolaan yang tepat, maka dapat menimbulkan dampak negatif terhadap kualitas tanah. Akumulasi bahan organik dan residu minyak pada permukaan dan lapisan tanah dapat menyebabkan tanah menjadi jenuh, mengalami pemadatan, serta menurunkan porositas dan aerasi tanah (Sembiring dkk., 2020). Kondisi tersebut menghambat pertukaran udara di dalam tanah, mengganggu pergerakan air, serta menurunkan aktivitas mikroorganisme tanah yang berperan penting dalam proses dekomposisi bahan organik dan siklus hara. Penurunan aktivitas biologis tanah ini

berimplikasi pada menurunnya kandungan C-organik tanah yang merupakan indikator utama kesuburan dan stabilitas struktur tanah (Rahman dkk., 2019).

Dampak lingkungan, pengelolaan limbah cair kelapa sawit yang tidak terkendali berpotensi mempercepat degradasi tanah dan menurunkan daya dukung lahan perkebunan dalam jangka panjang. Tanah yang mengalami pemadatan dan penurunan porositas akan lebih rentan terhadap erosi, genangan, serta penurunan kemampuan menyimpan air dan unsur hara. Sebaliknya, apabila limbah cair kelapa sawit dikelola dan diaplikasikan secara terkontrol, maka limbah ini justru dapat memberikan dampak lingkungan yang positif, terutama dalam meningkatkan kualitas tanah dan mengurangi ketergantungan terhadap pupuk anorganik.

Upaya pengelolaan limbah cair kelapa sawit dapat dilakukan melalui proses fermentasi biologis dengan memanfaatkan bakteri dekomposer seperti *Lactobacillus sp.* dan *Bacillus subtilis*. Mikroorganisme ini berperan dalam mempercepat penguraian bahan organik kompleks menjadi senyawa yang lebih stabil dan mudah diserap oleh tanaman (Suharto & Rahman, 2021). Limbah cair kelapa sawit terlebih dahulu ditampung dalam kolam penampungan anaerobik untuk menurunkan beban pencemar, kemudian difermentasi hingga menghasilkan limbah cair yang relatif aman dan berpotensi digunakan sebagai bahan penyubur tanah.

Pemanfaatan limbah cair kelapa sawit melalui aplikasi pada tanah secara berkelanjutan berpotensi meningkatkan kandungan bahan organik tanah, memperbaiki struktur dan porositas tanah, serta meningkatkan efisiensi pemupukan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara ilmiah aplikasi limbah cair kelapa sawit dalam meningkatkan kualitas tanah.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan areal perkebunan kelapa sawit pada bulan Desember 2025 hingga Februari 2026 dan dilakukan dalam tiga tahap penelitian. Tahap pertama bertujuan untuk mengidentifikasi volume, sistem pengelolaan, serta distribusi limbah cair kelapa

sawit melalui instalasi pengolahan limbah hingga ke lahan aplikasi dengan menggunakan metode observasi lapangan, wawancara, dan pengumpulan data sekunder. Tahap kedua dilakukan untuk menganalisis pengaruh aplikasi limbah cair kelapa sawit terhadap kualitas tanah dengan membandingkan lahan aplikasi dan tanpa aplikasi melalui pengambilan sampel tanah secara zig-zag dan metode komposit pada kedalaman 0 – 20 cm, kemudian dianalisis parameter pH tanah, C-organik, N total, P tersedia, dan K tersedia di laboratorium. Tahap ketiga bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh aplikasi limbah cair terhadap produksi tanaman kelapa sawit berdasarkan produksi tandan buah segar (TBS) pada tanaman sampel yang dipilih secara acak.

Data penelitian dianalisis secara deskriptif kuantitatif dan kualitatif untuk memperoleh gambaran yang sistematis mengenai efektivitas aplikasi limbah cair kelapa sawit terhadap kualitas tanah dan kinerja tanaman di areal perkebunan.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**  
**Volume Limbah Cair Kelapa Sawit**

Data yang diperoleh menunjukkan tren kenaikan volume limbah cair kelapa sawit dipengaruhi oleh intensitas pengolahan dan jumlah TBS yang diproses. Peningkatan aktivitas produksi berkontribusi langsung terhadap peningkatan limbah. Detail perubahan volume disajikan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Volume Limbah Cair Kelapa Sawit yang Dihasilkan di Perkebunan Kelapa Sawit

Tahun	Volume Limbah Cair (m <sup>3</sup> /tahun)	Keterangan
2022	210.500	Limbah cair dari proses klarifikasi dan sterilizer
2023	216.000	Kapasitas olah meningkat, limbah bertambah
2024	221.300	Kenaikan produksi TBS berdampak pada volume limbah

Keterangan: Estimasi berdasarkan rumus debit limbah dan kapasitas olah perkebunan kelapa sawit.

Tabel 1. Menunjukkan bahwa data volume limbah cair kelapa sawit yang dihasilkan di perkebunan kelapa sawit selama tiga tahun terakhir. Terlihat bahwa volume limbah menunjukkan meningkat seiring bertambahnya kapasitas olah tandan buah segar (TBS). Kenaikan produksi TBS secara langsung meningkatkan volume air limbah, khususnya yang berasal dari proses klarifikasi, pengempaan, dan pencucian serabut. Menurut Hartono dkk., (2023) yang menyatakan bahwa peningkatan kapasitas olah pabrik berbanding lurus dengan jumlah limbah cair yang dihasilkan.

**Pengelolaan Limbah Cair Kelapa Sawit**

Data yang dihimpun menunjukkan bahwa pengelolaan limbah cair kelapa sawit melalui sistem *land application* dapat dilakukan dengan berbagai metode yang memiliki perbedaan prinsip kerja, kelebihan, dan keterbatasan masing-masing. Pemilihan sistem aplikasi sangat dipengaruhi oleh kondisi teknis, topografi lahan, serta pertimbangan efisiensi operasional dan keberlanjutan lingkungan. Uraian perbandingan antar sistem aplikasi limbah cair kelapa sawit disajikan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Teknik Pengolahan Limbah Cair Kelapa Sawit Menuju Sistem *Land Application*

No	Sistem Aplikasi	Prinsip Kerja	Kelebihan	Kelemahan
1	Sistem Traktor–Tangki	Limbah cair diangkut dari kolam pengolahan menggunakan tangki yang ditarik traktor dan disemprotkan ke gawangan atau barisan tanaman	Fleksibel, tidak memerlukan jaringan pipa permanen, investasi awal relatif rendah	Biaya operasional tinggi, tergantung kondisi jalan panen
2	Sistem Parit atau Alur (Longbed)	Limbah cair dialirkan melalui pipa atau truk tangki ke bak distribusi, kemudian dialirkan ke parit aplikasi	Distribusi relatif merata, biaya operasional rendah (pipanisasi)	Investasi awal tinggi (pipanisasi), mobilitas terbatas (truk tangki)
3	Sistem Teras	Limbah cair dialirkan ke parit	Mengurangi erosi,	Biaya pemeliharaan

(Flat Bed) bersekat (flat bed) di antara meningkatkan tinggi, risiko barisan tanaman mengikuti retensi air dan sedimentasi kemiringan lahan penyerapan hara

Keterangan: Sistem aplikasi limbah cair serta pertimbangan teknis, operasional, dan kondisi lapangan pada perkebunan kelapa sawit.

Tabel 2. Menunjukkan bahwa teknik pengolahan limbah cair kelapa sawit menuju sistem *land application* dapat dilakukan melalui beberapa metode yang disesuaikan dengan kondisi teknis dan karakteristik lahan, antara lain sistem traktor – tangki yang bersifat fleksibel namun berbiaya operasional tinggi, sistem parit (*longbed*) dan teras (*flat bed*) yang lebih efisien dan berkelanjutan meningkatkan penyerapan hara serta mengurangi limpasan dan erosi, serta sistem sprinkler yang mampu mendistribusikan limbah secara merata tetapi memerlukan investasi dan biaya energi yang besar; oleh karena itu,

pemilihan metode aplikasi limbah cair harus mempertimbangkan topografi lahan, efisiensi biaya, dan tujuan peningkatan kesuburan tanah serta produktivitas kelapa sawit secara berkelanjutan (Sutaryo & Nugroho, 2021; Harahap dkk., 2022; Nasution dkk., 2019; Lubis dkk., 2018; Hanafiah dkk., 2021).

**Dampak Land Application Terhadap Tanah**

Aplikasi limbah cair terbukti memberikan perubahan yang jelas pada sifat fisik dan kimia tanah. Data hasil analisis tanah sebelum dan sesudah aplikasi Tabel 3.

**Tabel 3.** Dampak *Land Application* Untuk Tanah

No	Sifat Kimia Tanah	Kedalaman (cm)	Sebelum	Sesudah	Status
1	pH Tanah	0–20	4,87	4,72	Sangat Masam
2	C-Organik (%)	0–20	1,94	1,97	Rendah
3	N-Total (%)	0–20	0,17	0,18	Rendah
4	P-Tersedia (ppm)	0–20	6,82	12,30	Rendah
5	K-Tersedia (ppm)	0–20	68,47	281,67	Sangat tinggi

Tabel 3. Menampilkan bahwa penerapan *land application* berpotensi memengaruhi sifat fisik dan kimia tanah serta kualitas air tanah, sehingga diperlukan pengelolaan yang terencana dan pemantauan berkelanjutan pada lokasi aplikasi. Kajian Zulkarnain (2014) menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah cair pabrik pengolahan kelapa sawit pada lahan perkebunan mampu memperbaiki karakteristik fisik–kimia tanah. Selanjutnya, hasil penelitian Hasanah (2021) mengungkapkan bahwa penggunaan limbah cair kelapa sawit tidak memberikan dampak negatif terhadap kepadatan populasi maupun indeks keanekaragaman benthos dan plankton tanah. Meskipun demikian, potensi dampak kurang menguntungkan tetap dapat muncul berupa penurunan pH tanah di sekitar area *land application*, sementara kondisi tersebut tidak ditemukan pada areal di luar sistem flatbed (Zulkarnain, 2014). Oleh karena itu, pemantauan yang ketat perlu dilakukan agar limbah tidak meluap atau keluar dari kolam flatbed sehingga risiko degradasi lingkungan dapat diminimalkan.

**Dampak Land Application Terhadap Tanaman**

Data produksi *land application* dan *non land application* tahun 2023 dan tahun 2024 terlihat pada Gambar 1.

**Gambar 1.** Produksi Kelapa Sawit di *Land Application* dan *Non Land Application*



Berdasarkan Gambar 1. Data produksi kelapa sawit, total produksi tahun 2023 sebesar 673.311,6 kg lebih tinggi dibandingkan tahun

2024 sebesar 333.105,11 kg. Secara umum, blok G01 sebagai lahan dengan penerapan *land application* menunjukkan produksi yang lebih tinggi dibandingkan blok H01 yang tidak menerima aplikasi, baik pada tahun 2023 maupun 2024.

Penerapan *land application* limbah cair kelapa sawit memberikan dampak positif terhadap produksi Tandan Buah Segar (TBS) tanaman kelapa sawit dibandingkan dengan lahan tanpa aplikasi limbah. Menurut Herry dkk., (2025) melaporkan bahwa lahan yang menerima aplikasi limbah cair menunjukkan nilai produksi tahunan yang lebih tinggi pada beberapa tahun pengamatan dibandingkan lahan kontrol tanpa aplikasi, seperti produksi 16,73 ton/ha di lahan dengan aplikasi versus 15,67 ton/ha di lahan tanpa aplikasi pada 2015, serta tren peningkatan serupa pada tahun-tahun berikutnya menunjukkan bahwa limbah cair dapat berkontribusi meningkatkan hasil produksi secara konsisten karena input unsur hara dari limbah cair mendukung pertumbuhan tanaman (Iswahyudi dkk., 2025).

### **Komponen Lingkungan Yang Terkena Dampak**

Kegiatan pemanfaatan limbah cair kelapa sawit melalui *land application* umumnya tidak menimbulkan dampak signifikan terhadap manusia maupun lingkungan sekitar karena limbah digunakan sebagai sumber nutrisi langsung pada tanaman, sehingga persebarannya bersifat lokal dan terbatas pada blok aplikasi saja (Damayani, Aththorick & Akoeb, 2025). Pengaruhnya terhadap kualitas air tanah juga bergantung pada proses pengolahan IPAL sebelum aplikasi dan jarak terhadap permukiman, yang keduanya dapat meminimalkan infiltrasi kontaminan ke akuifer (Mulyanto dkk., 2025).

Limbah cair kelapa sawit memiliki potensi mencemari tanpa pengolahan yang tepat, menunjukkan bahwa pengelolaan limbah di *land application* harus sesuai standar untuk mencegah penurunan kualitas air dan tanah (Suci Sintia Dewi & Lamona, 2025). Selain itu, aplikasi limbah cair berperan dalam meningkatkan serapan unsur hara pada tanaman sawit, yang mendukung penggunaan limbah sebagai pupuk organik dan menurunkan mobilisasi kontaminan

ke air tanah (Saputra dkk., 2025). Oleh karena itu, kegiatan pemanfaatan limbah cair kelapa sawit melalui *land application* dapat dinilai sebagai praktik pengelolaan limbah yang relatif aman dan berkelanjutan apabila dilakukan sesuai standar teknis.

### **Teknologi Pengolahan Limbah Cair**

Limbah cair dari perkebunan kelapa sawit merupakan limbah agroindustri yang kaya akan bahan organik dan bersifat asam dengan pH antara sekitar 4–5. Limbah cair kelapa sawit terutama dari air (95–96 %), sedangkan sisanya merupakan bahan terlarut dan tersuspensi yang mencakup padatan organik seperti selulosa, protein, dan lemak, serta minyak yang teremulsi dalam limbah tersebut, sehingga membuatnya sangat potensial terdegradasi secara biologis oleh mikroorganisme, tetapi berbahaya jika dibuang langsung ke lingkungan tanpa pengolahan. Untuk itu, pengolahan biologis limbah cair umumnya dilakukan melalui sistem kolam stabilisasi atau lagoon yang melibatkan kolam anaerobik, fakultatif, dan aerobik, di mana mikroba secara bertahap menguraikan senyawa organik tersebut selama periode tinggal yang cukup panjang agar proses destruksi bahan organik berlangsung efektif (Mohammad dkk, 2021 ; Nursanti dkk, 2013).

## **KESIMPULAN DAN SARAN**

### **Kesimpulan**

Berdasarkan hasil kesimpulan dalam penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan volume limbah cair kelapa sawit sejalan dengan meningkatnya produksi TBS dan dapat dikelola secara efektif melalui sistem *land application*. Penerapan sistem ini terbukti memberikan manfaat agronomis berupa peningkatan ketersediaan unsur hara tanah dan hasil produksi kelapa sawit yang lebih tinggi dibandingkan lahan tanpa aplikasi, serta relatif aman terhadap lingkungan apabila dilakukan sesuai ketentuan teknis dan pengolahan limbah yang memadai.

### **Saran**

Penerapan *land application* perlu disertai pengendalian dosis dan pemantauan kualitas tanah serta air tanah secara berkala agar manfaatnya optimal dan risiko lingkungan dapat diminimalkan.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Badan Pusat Statistik (BPS). 2024. Statistik Kelapa Sawit Indonesia 2023. Badan Pusat Statistik, Jakarta.
- Damayani, R., Aththorick, T., & Akoeb, E. N. 2025. Evaluasi dampak pemanfaatan limbah cair kelapa sawit melalui sistem land application terhadap lingkungan perkebunan. *Jurnal Lingkungan Tropis*, 9(1): 45–56.
- Hanafiah, K. A., Harahap, F. S., & Lubis, R. R. 2021. Pengelolaan limbah cair kelapa sawit berbasis land application untuk keberlanjutan lahan perkebunan. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, 23(2): 87–96.
- Harahap, F. S., Nasution, M. A., & Siregar, A. Z. 2022. Teknik aplikasi limbah cair kelapa sawit dan pengaruhnya terhadap sifat tanah dan tanaman. *Jurnal Agroekoteknologi*, 10(3): 233–242.
- Hartono, D., Prasetyo, B., & Wibowo, A. 2023. Hubungan kapasitas olah tandan buah segar dengan volume limbah cair kelapa sawit. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 33(2): 119–127.
- Hasanah, U. 2021. Pengaruh aplikasi limbah cair kelapa sawit terhadap organisme tanah dan kualitas lingkungan lahan perkebunan. *Jurnal Biologi Tanah*, 8(1): 21–30.
- Herry, Y., Prabowo, D., & Nugraha, R. 2025. Dampak land application limbah cair kelapa sawit terhadap produksi tandan buah segar. *Jurnal Produksi Perkebunan*, 13(1): 55–64.
- Iswahyudi, A., Lubis, A. U., & Harahap, R. 2025. Kontribusi unsur hara limbah cair kelapa sawit terhadap peningkatan hasil tanaman kelapa sawit. *Jurnal Agronomi Indonesia*, 53(1): 41–50.
- Lubis, R. R., Nasution, M. A., & Harahap, F. S. 2018. Sistem distribusi limbah cair kelapa sawit pada lahan perkebunan. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 14(2): 89–98.
- Mohammad, R., Hidayat, N., & Setyawan, A. 2021. Pengolahan biologis limbah cair kelapa sawit menggunakan sistem kolam stabilisasi. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 22(3): 201–210.
- Mulyanto, D., Prasetyo, E., & Sari, N. P. 2025. Pengaruh aplikasi limbah cair kelapa sawit terhadap kualitas air tanah di areal perkebunan. *Jurnal Sumberdaya Air*, 11(1): 29–38.
- Nasution, M. A., Harahap, F. S., & Lubis, R. R. 2019. Pengelolaan limbah cair kelapa sawit melalui sistem land application. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(2): 141–150.
- Nasution, M. A., Harahap, F. S., & Lubis, R. R. 2022. Karakteristik dan potensi pemanfaatan limbah cair kelapa sawit sebagai bahan pembenah tanah. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(3): 487–495.
- Nursanti, I., Wahyuni, S., & Handayani, R. 2013. Pengolahan limbah cair kelapa sawit dengan sistem anaerobik dan aerobik. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 19(1): 35–44.
- Rahman, A., Putra, E., & Yulnafatmawita. 2019. Peran C-organik tanah terhadap kesuburan tanah dan produktivitas tanaman perkebunan. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 43(2): 101–110.
- Saputra, A., Siregar, A. Z., & Nasution, A. H. 2025. Peran land application limbah cair kelapa sawit terhadap efisiensi serapan hara tanaman. *Jurnal Tanah dan Tanaman*, 12(1): 61–70.
- Sembiring, R., Simanjuntak, B. H., & Sitorus, H. 2020. Dampak pembuangan limbah cair kelapa sawit terhadap sifat fisik tanah perkebunan. *Jurnal Agroekoteknologi*, 8(1): 45–54.
- Suci Sintia Dewi, R., & Lamona, A. 2025. Risiko pencemaran lingkungan akibat pengelolaan limbah cair kelapa sawit. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 17(2): 89–98.
- Suharto, B., & Rahman, F. 2021. Pengolahan biologis limbah cair kelapa sawit menggunakan mikroorganisme dekomposer. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 22(1): 65–74.
- Supriatna, D., Siregar, A. Z., & Lubis, A. U. 2023. Peran strategis kelapa sawit dalam perekonomian Indonesia dan tantangan keberlanjutannya. *Jurnal Agribisnis Indonesia*, 11(2): 123–135.
- Sutaryo, D., & Nugroho, S. 2021. Evaluasi sistem aplikasi limbah cair kelapa sawit pada lahan perkebunan berkelanjutan. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 22(1): 73–82.
- Zulkarnain. 2014. Dampak pemanfaatan limbah cair kelapa sawit terhadap sifat fisik dan

kimia tanah perkebunan. *Jurnal Tanah Tropika*, 19(2): 101–109.