

EVALUASI PELAKSANAAN PENGELOLAAN DAN PEMANTAUAN
LINGKUNGAN HIDUP PABRIK KELAPA SAWIT PT. MUSIRAWAS
CITRAHARPINDO DI KABUPATEN SERUYAN PROVINSI
KALIMANTAN TENGAH

Muhamad Rus'an¹, Lusia Widiastuti², Vera Amelia², Soaloon Sinaga², Fengky F.
Adji², Betrixia Barbara²

¹Mahasiswa Program Studi Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan

²Staf Pengajar Program Studi Pengelolaan Sumberdaya Alam dan
Lingkungan

ABSTRAK

Industri kelapa sawit berperan penting dalam perekonomian nasional, namun menimbulkan dampak lingkungan berupa emisi udara dan limbah cair. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengelolaan dan pemantauan lingkungan di Pabrik Kelapa Sawit PT. Musirawas Citraharpindo, Kabupaten Seruyan, Kalimantan Tengah. Metode yang digunakan adalah analisis deskriptif terhadap data uji laboratorium emisi udara dan limbah cair selama enam bulan, dibandingkan dengan baku mutu sesuai peraturan yang berlaku. Hasil penelitian menunjukkan bahwa emisi udara dari boiler umumnya memenuhi baku mutu, meski efisiensi pembakaran masih dapat ditingkatkan. Kualitas limbah cair IPAL menunjukkan fluktuasi, dengan parameter COD dan TSS yang kadang melebihi ambang batas. Ditemukan pula keterbatasan dalam sistem monitoring lingkungan. Rekomendasi meliputi peningkatan teknologi pemantauan dan penguatan implementasi RKL-RPL untuk keberlanjutan industri.

Kata kunci: Emisi, Lingkungan, limbah cair, kelapa sawit.

ABSTRACT

The palm oil industry plays a vital role in Indonesia's economy but poses environmental challenges, particularly from air emissions and wastewater. This study aims to evaluate environmental management and monitoring at the Palm Oil Mill of PT. Musirawas Citraharpindo in Seruyan Regency, Central Kalimantan. A descriptive analysis was conducted using six months of laboratory data on air emissions and wastewater, compared against relevant environmental quality standards. The results show that boiler emissions generally comply with established standards, though combustion efficiency can still be improved. Wastewater quality from the WWTP outlet fluctuated, with COD and TSS occasionally exceeding the permissible limits. Limitations were also found in the environmental monitoring system. Recommendations include enhancing monitoring technology and strengthening RKL-RPL implementation to support sustainable industry practices.

Keywords: Emissions, Environment, Wastewater, Palm oil.

PENDAHULUAN

Industri kelapa sawit merupakan sektor strategis yang memberikan kontribusi besar terhadap Produk Domestik Bruto (PDB), penyerapan tenaga kerja, dan nilai ekspor Indonesia. Sebagai produsen utama kelapa sawit dunia, Indonesia memegang peran penting dalam pasokan global. Namun, di balik kontribusinya terhadap ekonomi nasional, aktivitas industri ini menimbulkan berbagai persoalan lingkungan seperti pengelolaan limbah cair, emisi gas rumah kaca, dan perubahan fungsi lahan yang berdampak pada keseimbangan ekosistem (Singh et al., 2010).

Pabrik Kelapa Sawit (PKS) menghasilkan berbagai jenis limbah, baik cair seperti Palm Oil Mill Effluent (POME), padat seperti serat dan cangkang, maupun emisi udara dari sistem pembakaran. Jika tidak dikelola dengan baik, limbah tersebut dapat mencemari air, tanah, dan udara, mengganggu kesehatan masyarakat, serta menurunkan kualitas lingkungan (Gogoi dan Kalita, 2022). Pemerintah Indonesia telah menetapkan regulasi melalui penyusunan dokumen AMDAL, RKL, dan RPL untuk memastikan kegiatan industri berjalan dalam kerangka pembangunan berkelanjutan. Namun, implementasinya masih menghadapi tantangan, terutama dalam aspek kepatuhan dan kapasitas teknis (Siregar dan Harahap, 2020).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar PKS belum optimal dalam melakukan pemantauan limbah secara berkala dan transparan (Hutabarat et al., 2021). Kelemahan dalam sistem pengawasan menyebabkan pelanggaran baku mutu sering kali tidak ditindaklanjuti, sehingga pencemaran bersifat kumulatif dan berdampak jangka panjang terhadap ekosistem sungai dan rawa gambut (Nasution et al., 2019). POME yang dibuang tanpa pengolahan memadai dapat menurunkan kualitas air

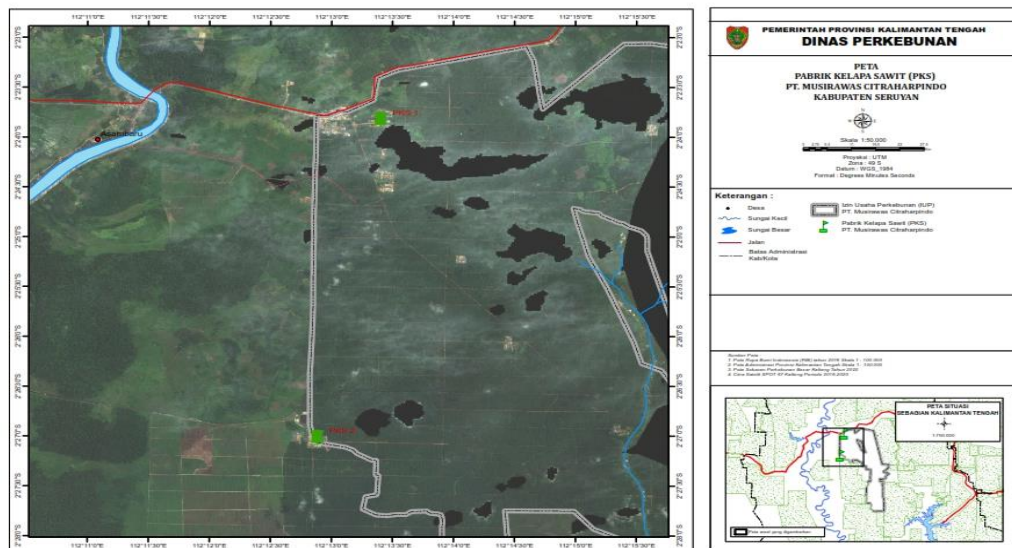
dan menimbulkan eutrofikasi (Fadhillah et al., 2022; Maulina et al., 2020). Selain itu, emisi dari boiler dan pembakaran limbah padat juga berkontribusi terhadap peningkatan partikulat (PM), karbon monoksida (CO), dan sulfur dioksida (SO₂), yang memperburuk kualitas udara (Nugraha et al., 2021).

Aspek sosial juga tidak terlepas dari dampak negatif aktivitas industri ini. Masyarakat sekitar kerap menghadapi polusi udara, bau menyengat, dan sumber air yang tercemar, yang dapat memicu konflik sosial apabila perusahaan tidak melibatkan masyarakat dalam pengelolaan lingkungan (Susanti dan Yuliana, 2021). Oleh karena itu, evaluasi terhadap efektivitas pengelolaan dan pemantauan lingkungan di industri kelapa sawit menjadi urgensi. Evaluasi ini penting untuk menilai sejauh mana pelaksanaan RKL-RPL telah berjalan sesuai ketentuan, sekaligus mengidentifikasi hambatan dan peluang perbaikan (Rahmadi et al., 2021).

Penelitian ini difokuskan pada evaluasi pengelolaan dan pemantauan lingkungan di Pabrik Kelapa Sawit PT. Musirawas Citraharpindo, Kabupaten Seruyan, Kalimantan Tengah, khususnya pada aspek emisi udara dari cerobong asap (boiler) dan kualitas air limbah dari instalasi pengolahan air limbah (IPAL). Dengan menggunakan data hasil uji laboratorium dan metode analisis deskriptif, penelitian ini bertujuan memberikan gambaran konkret mengenai tingkat kepatuhan terhadap baku mutu lingkungan serta menyusun rekomendasi strategis untuk peningkatan sistem pengelolaan yang lebih berkelanjutan. Hasil penelitian diharapkan menjadi acuan bagi pemerintah, perusahaan, dan masyarakat dalam memperkuat tata kelola lingkungan hidup di sektor industri kelapa sawit Indonesia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan selama 1 tahun dari bulan Januari 2024 sampai dengan Desember 2024. Penelitian ini berlokasi di pabrik kelapa sawit PKS PT. Musirawas Citraharpindo yang terletak di Desa Asam Baru Kecamatan Kecamatan Danau Seluluk Kabupaten Seruyan Provinsi Kalimantan Tengah. Perkebunan PT. Musirawas Citraharpindo (Musirawas Grup) adalah perusahaan yang termasuk dalam Perusahaan Besar Swasta Nasional (PBSN) bergerak di bidang perkebunan dan pengolahan kelapa sawit Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Pabrik Kelapa Sawit PT. Musirawas Citraharpindo

Perkebunan kelapa sawit PT Musirawas Citraharpindo seluas \pm 11.596,21 hektar di wilayah Desa Lanpasa, Desa Terawan (Kecamatan Seruyan Raya), Desa Derangga (Kecamatan Hanau) dan Desa Asam Baru (Kecamatan Danau Seluluk), Kabupaten Seruyan, Provinsi Kalimantan Tengah.

Pabrik kelapa sawit PT. Musirawas Citraharpindo yang berlokasi di Desa Asam Baru, Kecamatan Danau Seluluk, Kabupaten Seruyan, Provinsi Kalimantan Tengah. PT. Perkebunan Musirawas Citraharpindo merupakan

gabungan dari Musirawas Group yang meliputi, PT. Uni Primacom, PT. Sumur Pandanwangi. PT. Perkebunan Musirawas Citraharpindo dimiliki oleh Bapak (Purn) Jendral Widjojo Sujono dan beliau juga sebagai komisaris utama di perusahaan ini. juga memiliki dua pabrik pengolahan kelapa sawit, yaitu PKS 1 dan PKS 2.

Analisis Data

Analisis data menggunakan metode analisis statistik untuk trend data. Hasil analisis kemudian diinterpretasikan untuk mengevaluasi baku mutu untuk emisi tidak bergerak yang dipersyaratkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 7 tahun 2007 Lampiran 1 Tentang Baku Mutu Sumber Energi Tidak Bergerak dan indikator air limbah dibandingkan dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah Lampiran III Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan /atau Kegiatan Industri Minyak Sawit.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Kualitas Emisi

Tabel 1. Kualitas Udara Berasal Boiler PKS PT. Musirawas Citraharpindo

No.	Parameter	Satuan	Baku Mutu	Hasil I	Hasil Evaluasi ^{*)}	Hasil II	Hasil Evaluasi ^{*)}
1.	Partikulat	mg/m ³	300	49,1	Memenuhi	37,1	Memenuhi
2.	Sulfur Dioksida (SO ₂)	mg/m ³	600	54,0	Memenuhi	29,0	Memenuhi
3.	Nitrogen Dioksida (NO ₂)	mg/m ³	800	127	Memenuhi	205	Memenuhi
4.	Hidrogen Klorida (HCl)	mg/m ³	5	0,86	Memenuhi	0,83	Memenuhi
5.	Gas Klorin (Cl ₂)	mg/m ³	5	0,31	Memenuhi	0,39	Memenuhi
6.	Ammonia (NH ₃)	mg/m ³	1	0,27	Memenuhi	0,25	Memenuhi
7.	Hidrogen Fluorida (HF)	mg/m ³	8	0,20	Memenuhi	0,32	Memenuhi
8.	Opasitas	%	30	9,16	Memenuhi	8,33	Memenuhi
9.	Oksigen (O ₂)	%	-	14,5	Memenuhi	12,4	Memenuhi
10.	Laju Alir	m/dtk	-	10,6	Memenuhi	13,9	Memenuhi

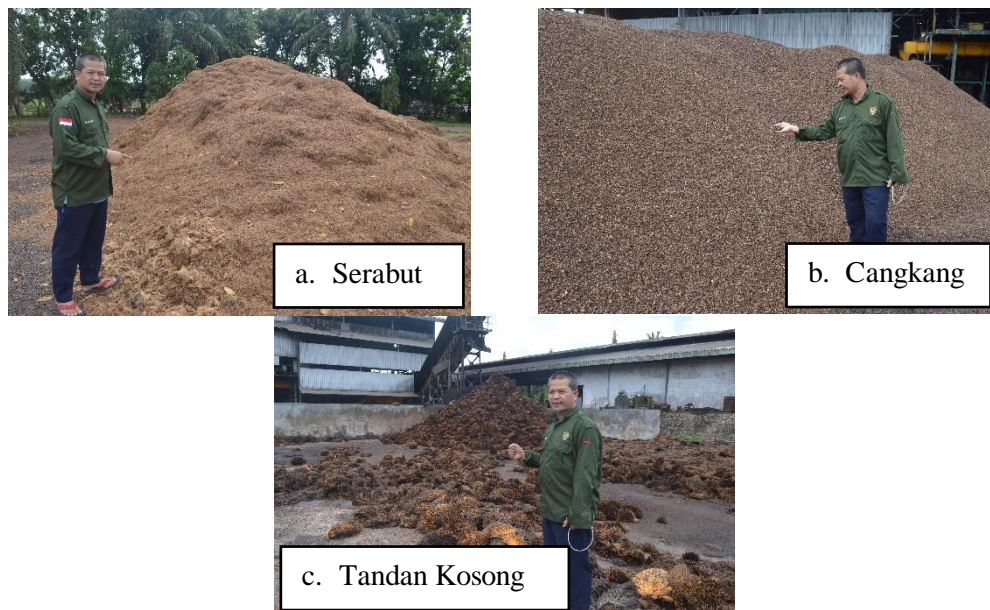
Keterangan :

**) dibandingkan dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 7 tahun 2007 Lampiran 1 Tentang Baku Mutu Sumber Energi Tidak Bergerak*

Evaluasi Sistem Pengendalian

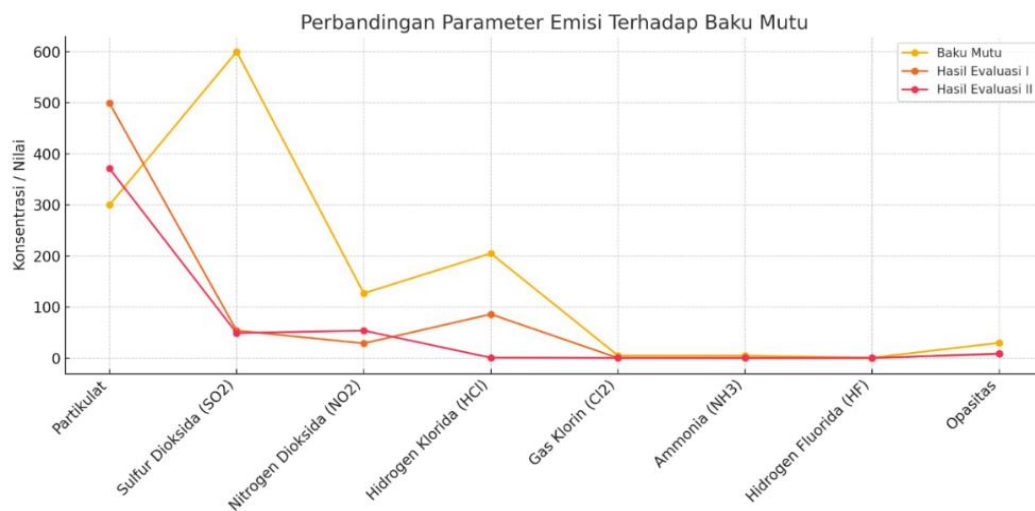
Evaluasi terhadap hasil uji emisi cerobong yang dilakukan pada PT. Musirawas Citraharpindo pada tabel 1 di atas menunjukkan bahwa hasil uji masih memenuhi baku mutu Gambar 4, pengujian ini bertujuan untuk menilai tingkat kepatuhan terhadap baku mutu emisi berdasarkan Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 07 Tahun 2007 Lampiran II. Oleh karena itu, emisi cerobong dari sumber yang diuji dinyatakan berada dalam batas yang dapat diterima dan tidak menimbulkan potensi pencemaran udara yang melebihi ambang batas.

Boiler ini menggunakan dimana bahan bakar biomassa yang digunakan seperti serabut dan/atau cangkang dimana limbah padat sebagai bahan bakar boiler pada pabrik. Penggunaan serabut, cangkang dan tandan kosong sebagai bahan bakar boiler di PKS PT. Musirawas Citraharpindo terbukti menekan emisi gas buang (Gambar 2). Dalam upaya keefisiensi maka sebagian limbah padat seperti fiber dan cangkang digunakan sebagai bahan bakar untuk operasional boiler.



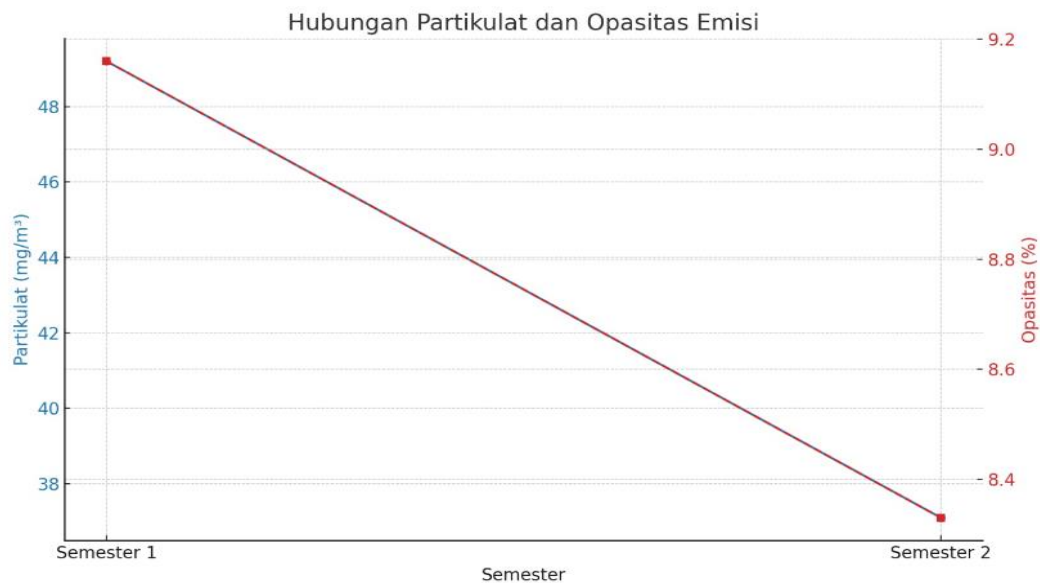
Gambar 2. Bahan Bakar Yang Digunakan PKS PT. Musirawas Citraharpindo

Hasil evaluasi pada semua parameter gas buang seperti partikulat, SO₂, NO₂, HCl, Cl₂, NO₃, HF, opasitas, O₂ dan laju alir masih berada di bawah ambang batas baku mutu atau memenuhi baku mutu (Gambar 3). Hal ini menunjukkan bahwa pengelolaan boiler sudah mengarah pada konsep produksi bersih. Menurut penelitian Praevia, M. F., dan Widayat, W. (2022) pemanfaatan limbah padat sawit sebagai bahan bakar dapat menurunkan emisi hingga 70% dibandingkan penggunaan batubara. Hal ini sejalan dengan kajian dari Wu, D., Gao, Z., Wu, S., and Xiao, R. (2023), yang menyatakan bahwa pembakaran biomassa terkontrol cenderung menghasilkan emisi yang lebih rendah dibandingkan dengan pembakaran bahan bakar fosil.



Gambar 3. Grafik Baku Mutu Emisi Udara

Partikulat dan opasitas adalah dua parameter penting dalam pemantauan emisi udara, terutama dari sumber tidak bergerak seperti cerobong pabrik. Keduanya saling berkaitan, namun berbeda dalam cara pengukuran dan penggunaannya. Semakin tinggi kadar partikulat, biasanya semakin tinggi pula opasitas asap yang terlihat dari cerobong.



Gambar 4. Grafik Hubungan Partikulat dan Opasitas

Kadar partikulat dan nilai opasitas umumnya berbanding lurus—semakin tinggi konsentrasi partikulat, semakin tinggi pula opasitas. Namun, hubungan ini tidak selalu linear karena dipengaruhi oleh warna, kelembapan, dan ukuran partikel. Dalam banyak penelitian, opasitas digunakan sebagai indikator cepat untuk mendeteksi potensi pelanggaran baku mutu partikulat.

Di PKS PT. Musirawas Citraharpindo, hasil pengukuran menunjukkan nilai partikulat sebesar 49,1 mg/m³ dengan opasitas 9,16% pada semester pertama, dan 37,1 mg/m³ dengan opasitas 8,33% pada semester kedua. Nilai tersebut mengindikasikan efisiensi pembakaran yang baik dan pengelolaan emisi yang berkelanjutan. Opasitas yang rendah mencerminkan sistem pembakaran dan kontrol partikulat yang optimal.

Sejumlah studi (Harahap & Sihotang, 2022; Tanaka et al., 2022; Zulkarnain & Nuraini, 2021) menegaskan bahwa pemantauan opasitas dapat berfungsi sebagai sistem peringatan dini terhadap gangguan pembakaran atau kegagalan alat pengendali emisi. Teknologi berbasis

kamera inframerah dan algoritma kecerdasan buatan kini digunakan untuk mendeteksi perubahan opasitas secara real-time, memungkinkan tindakan korektif segera sebelum baku mutu terlampaui.

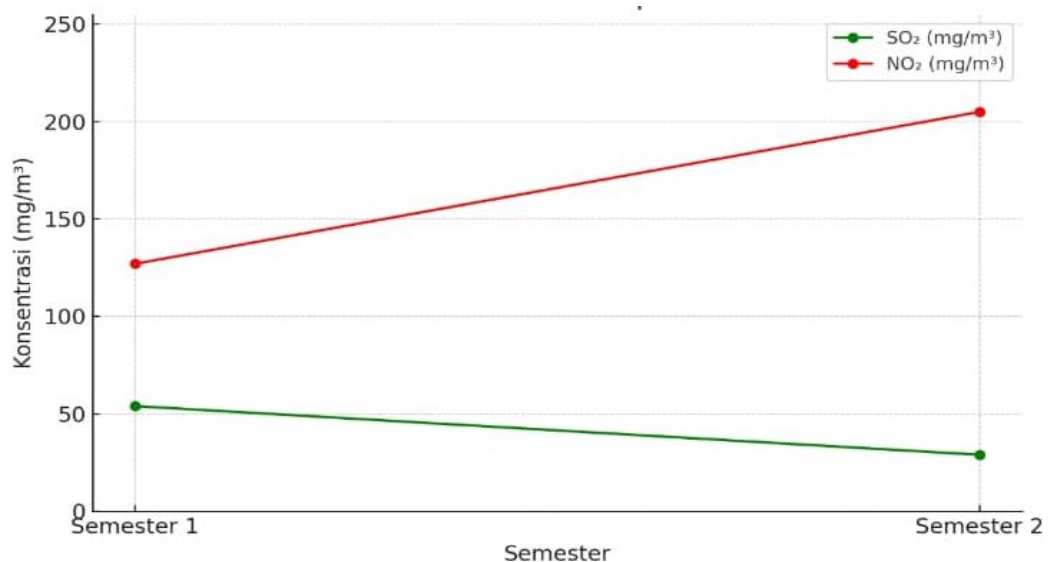
Parameter sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen dioksida (NO_2) merupakan kontributor utama pencemaran udara. Pada PKS PT. Musirawas Citraharpindo, konsentrasi SO_2 masih di bawah baku mutu, yaitu 54 mg/m^3 pada semester I dan menurun menjadi 29 mg/m^3 pada semester II (penurunan 46%). Penurunan ini menunjukkan pengelolaan emisi yang baik, kemungkinan dipengaruhi oleh penggunaan bahan bakar dengan kadar sulfur lebih rendah serta peningkatan efisiensi pembakaran dan sistem pengendalian seperti *scrubber*.

Sebaliknya, NO_2 mengalami kenaikan dari 127 mg/m^3 menjadi 205 mg/m^3 (kenaikan 78 mg/m^3). Peningkatan ini diduga akibat suhu pembakaran yang tinggi, rasio udara–bahan bakar yang tidak optimal, atau penurunan efisiensi burner. Kadar tersebut masih jauh di bawah ambang toksik, namun tetap perlu diperhatikan karena paparan NO_2 berlebih dapat berdampak buruk terhadap kesehatan (Wahyuni et al., 2024; Li et al., 2023). Secara umum, SO_2 dan NO_2 tidak saling bergantung langsung, namun sering menunjukkan hubungan berbanding terbalik dalam sistem pembakaran: suhu tinggi menurunkan SO_2 tetapi meningkatkan NO_2 (Gambar 5).

Parameter lain menunjukkan perbaikan kualitas emisi. HCl turun dari $0,86 \text{ mg/m}^3$ menjadi $0,83 \text{ mg/m}^3$, mengindikasikan pembakaran lebih sempurna dan berkurangnya kandungan klorin dalam bahan bakar. Sebaliknya, Cl_2 meningkat dari $0,31 \text{ mg/m}^3$ menjadi $0,39 \text{ mg/m}^3$ (naik 25%) akibat kemungkinan peningkatan senyawa organoklorin dan kondisi pembakaran yang lebih oksidatif. NH_3 menurun dari $0,27 \text{ mg/m}^3$ menjadi

0,25 mg/m³ (turun 7,4%) karena penurunan bahan bakar atau limbah ber kandungan nitrogen serta peningkatan efektivitas sistem pengendalian seperti *scrubber*.

Penurunan O₂ dari 14,5% menjadi 12,4% menunjukkan efisiensi pembakaran meningkat, dengan lebih banyak oksigen digunakan dalam proses. Sementara itu, laju alir gas buang naik dari 10,6 m/detik menjadi 13,9 m/detik akibat peningkatan kapasitas pembakaran, perawatan cerobong, serta kenaikan suhu gas buang. Secara keseluruhan, hasil ini mengindikasikan perbaikan dalam sistem kontrol pembakaran dan pengelolaan gas emisi di PKS PT. Musirawas Citraharpindo.



Gambar 5. Grafik Emisi SO₂ dan NO₂ per Semester Pertama di Tahun 2023

Identifikasi Masalah dan Potensi Perbaikan

Pabrik Kelapa Sawit PT. Musirawas Citraharpindo tidak menggunakan batubara, melainkan memanfaatkan tandan kosong, serabut, dan cangkang sebagai bahan bakar biomassa. Hal ini penting karena sektor minyak sawit merupakan salah satu sumber emisi gas rumah kaca. Seluruh proses pabrik menggunakan listrik dari generator internal, sejalan dengan upaya pemerintah mendorong pemanfaatan energi terbarukan (Nurlaila &

Yuliyanto, 2019).

Namun, pembakaran biomassa juga menjadi sumber partikulat dan gas pencemar. Pembakaran sempurna diharapkan menghasilkan energi, CO₂, dan air (Zhang et al., 2017). Dalam industri kelapa sawit, partikulat terutama berasal dari boiler yang membakar serat dan cangkang, berupa debu, abu terbang, dan partikel karbon yang dapat mengandung logam berat. Partikulat diklasifikasikan sebagai PM₁₀ dan PM_{2.5}, keduanya berbahaya bagi kesehatan.

Kelebihan kadar partikulat dapat menurunkan kualitas udara, merusak vegetasi, meningkatkan efek rumah kaca, dan menyebabkan gangguan pernapasan. Kombinasi emisi SO₂, NO₂, HCl, dan partikulat halus memperparah dampak kesehatan, dengan peningkatan kasus ISPA hingga 35% di sekitar kawasan industri (Susilowati & Lazuardi, 2022).

Pengendalian emisi dilakukan menggunakan multi cyclone, wet scrubber, atau electrostatic precipitator, disertai perawatan dan monitoring rutin. Tanpa pengelolaan yang baik, konsentrasi partikulat dapat melampaui baku mutu lingkungan dan menimbulkan pencemaran udara.

Teknologi wet scrubber efektif menurunkan gas asam seperti SO₂ dan HCl hingga 90%, bahkan mencapai 95% pada sistem hybrid (Saputra & Arifin, 2021; Shi et al., 2022). Sementara itu, biofilter berbasis arang aktif atau zeolit mampu menurunkan NH₃ hingga 85% secara biologis (Yani et al., 2013; Chen et al., 2022). Teknologi ini efisien, ramah lingkungan, dan berumur panjang, sehingga sesuai diterapkan di pabrik kelapa sawit.

Rekomendasi Pengelolaan Emisi Udara

Rekomendasi pengelolaan emisi udara di PT. Musirawas Citraharpindo meliputi optimalisasi sistem pembakaran melalui penerapan automatic combustion control untuk menjaga rasio udara–bahan bakar

tetap optimal dan melakukan tuning burner setiap 3 bulan guna menekan pembentukan NO_x, meningkatkan efisiensi, serta menjaga kestabilan nyala api. Sistem pengendalian emisi ditingkatkan dengan pemasangan multi-cyclone separator untuk meningkatkan efisiensi penangkapan partikulat, disertai pembersihan rutin ducting dan cerobong setiap bulan. Pemantauan emisi dilakukan secara real-time menggunakan Continuous Emission Monitoring System (CEMS) agar konsentrasi gas buang tetap di bawah baku mutu. Selain itu, diperlukan program pelatihan dan sertifikasi operator boiler, penyusunan SOP pembakaran biomassa standar, serta rencana tanggap darurat untuk kondisi emisi abnormal.

Evaluasi Pengelolaan Air Limbah

Air limbah dari PKS 1 diolah melalui Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) untuk menurunkan kadar bahan organik hingga memenuhi baku mutu lingkungan. Limbah cair yang telah diolah kemudian dimanfaatkan sebagai pupuk organik pada perkebunan kelapa sawit melalui sistem land application, sehingga mendukung prinsip pengelolaan limbah berkelanjutan.

Analisis Kualitas Effluent

Pada kolam IPAL atau inlet, masa tinggal limbah selama proses berlangsung mulai dari kolam pendinginan hingga air dibuang ke badan penerima membutuhkan masa waktu tinggal selama kurang lebih \pm 120-150 hari, sehingga dari hasil analisis tersebut yang diaplikasikan sebelum ke lahan-lahan adalah berasal dari pipa outlet IPAL pada PKS 1. Air limbah dari PKS pada pipa outlet PKS 1 dengan menggunakan data yang diambil data dari bulan Januari 2023 sampai Juni 2023 data disajikan pada tabel 2 berikut dan gambar 6 lokasi Instalasi Pengolahan Air Limbah PT. Musirawas Citraharpindo.



Gambar 6. Instalasi Pengolahan Air Limbah PT. Musirawas Citraharpindo

Evaluasi Kinerja Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL)

Tabel 2. Hasil Analisis Air Limbah Pada Instalasi Pengolahan Air Limbah

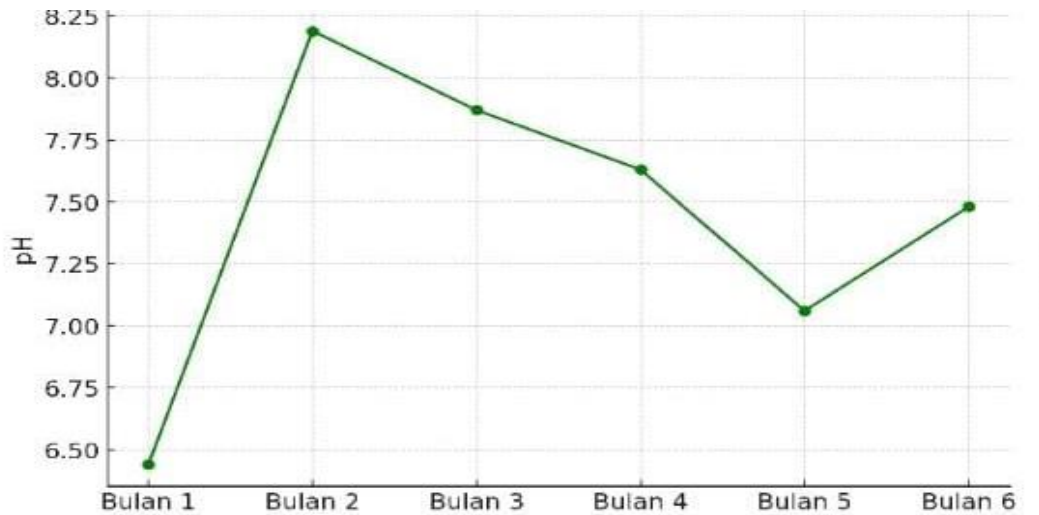
No.	Parameter	Satuan	Baku Mutu	Semester Pertama Tahun 2023					
				Januari	Februari	Maret	April	Mei	Juni
1.	pH	-	6-9	6,44	8,19	7,63	7,87	7,06	7,48
2.	BOD	mg/L	100	4.835	546	1.601	1.320	1.405	1.026
3.	COD	mg/L	350	10.525	1.184	3.424	3.009	2.815	2,852
4.	Minyak dan Lemak	mg/L	25	6,30	1,77	1,75	1,81	2,01	8,50
5.	Timbal Pb	mg/L	-	0,009	<0,05	<0,002	0,0014	<0,002	0,003
6.	Kadmium (Cd)	mg/L	-	<0,00043	0,002	0,001	0,053	0,001	<0,001
7.	Tembaga (Cu)	mg/L	--	0,31	0,056	0,10	0,12	0,21	0,053
8.	Seng (Zn)	mg/L	-	0,47	0,40	0,22	0,47	0,47	0,74

**) dibandingkan dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah Lampiran III Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan /atau Kegiatan Industri Minyak Sawit*

Berdasarkan hasil analisis laboratorium pada Tabel 2, dari 8 parameter yang diuji, 6 parameter yaitu pH, minyak lemak, Pb, Cd, Cu, dan Zn masih berada di bawah baku mutu, sedangkan 2 parameter, yaitu BOD dan COD, melebihi baku mutu sesuai Peraturan Menteri LHK No. 5 Tahun 2014 Lampiran III tentang Baku Mutu Air Limbah Industri Minyak Sawit.

Logam berat seperti Pb, Cu, Cd, dan Zn terdeteksi dalam air limbah, sehingga menjadi parameter penting dalam pemantauan kualitas air limbah PKS. Nilai pH outlet IPAL PKS 1 berada dalam rentang 6,44–8,19,

dengan nilai terendah 6,44 (Januari) dan tertinggi 8,19 (Februari). Setelah bulan ke-2, pH relatif stabil pada kisaran 7–7,8 (gambar 7), menunjukkan bahwa proses netralisasi dan biologis berjalan baik, serta kualitas pH tetap dalam batas aman baku mutu.

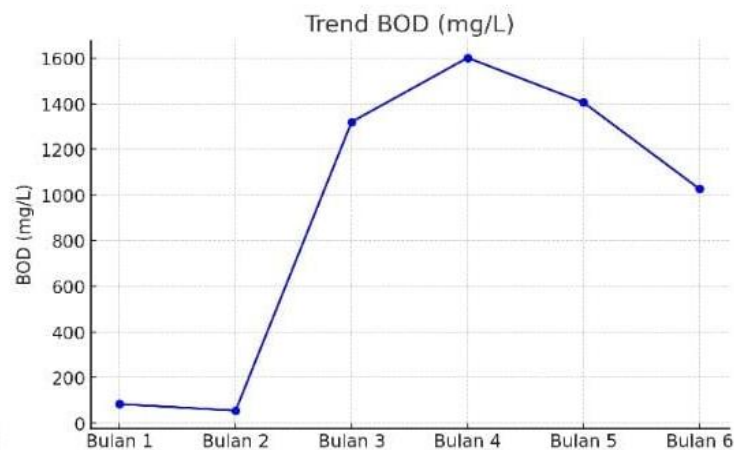


Gambar 7. Grafik Trend Potential of Hydrogen (pH)

Grafik pH pada gambar 7 menunjukkan peningkatan dari bulan pertama ke bulan kedua, kemudian relatif stabil dengan rentang 6,44–8,19, yang berada dalam kisaran netral hingga sedikit basa dan memenuhi baku mutu pH (6–9) sesuai Permen LH No. 5 Tahun 2014. Kenaikan pH ini diduga akibat penggunaan bahan kimia alkali dalam proses netralisasi atau penurunan beban organik, sedangkan fluktuasi pada bulan ke-5 kemungkinan dipicu oleh peningkatan senyawa asam dari proses fermentasi. Mengingat karakteristik awal POME yang bersifat asam (pH 3,5–5,0) dan mengandung VFA, FFA, serta bahan organik tinggi, kestabilan pH pada kisaran 6,44–8,19 menunjukkan bahwa sistem netralisasi IPAL berfungsi optimal, menjaga kondisi ideal bagi mikroorganisme pengurai dalam kolam anaerobik dan aerobik. Hal ini sejalan dengan penelitian Nurdin & Astuti (2020) serta Nawaz et al. (2023) yang menegaskan bahwa

pH netral meningkatkan efisiensi dekomposisi bahan organik dan aktivitas metanogenik pada pengolahan limbah cair berbasis biomassa.

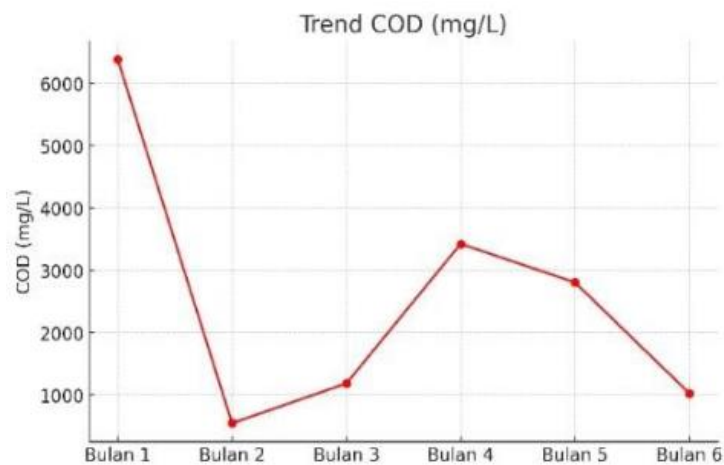
Nilai BOD pada bulan ke-1 hingga ke-2 sangat rendah, namun melonjak tajam pada bulan ke-3 hingga ke-5 hingga 13–16 kali lipat, kemudian menurun kembali pada bulan ke-6. Lonjakan ini menunjukkan adanya peningkatan beban organik akibat volume limbah pengolahan TBS yang tinggi atau gangguan efisiensi pada unit IPAL, terutama kolam anaerob/aerob. Penurunan pada bulan ke-6 diduga akibat berkurangnya aktivitas produksi. Fluktuasi ekstrem ini mengindikasikan potensi overload biologis, sesuai temuan Kurniawan & Haris (2021) bahwa variasi BOD tinggi mencerminkan gangguan aerasi, sementara Liu et al. (2023) menyarankan penerapan biofilter atau anaerobic baffled reactor untuk menjaga kestabilan sistem pengolahan.



Gambar 8. Grafik Tren Biological Oxygen Demand (BOD)

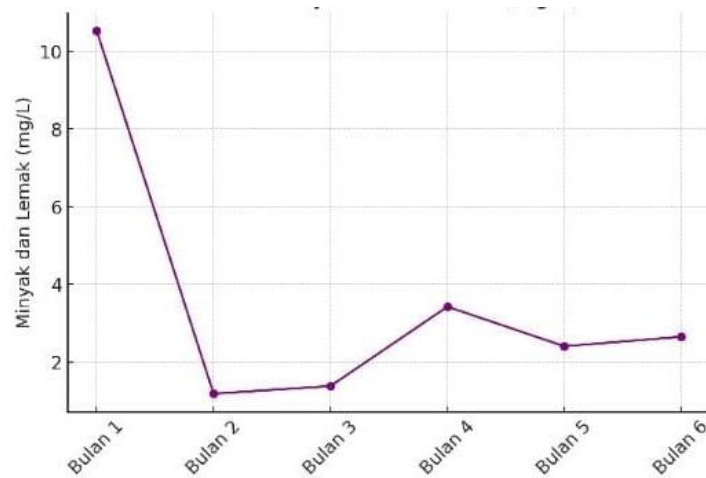
Nilai COD sangat tinggi pada bulan pertama (6.385 mg/L), menurun tajam di bulan ke-2, lalu berfluktuasi hingga bulan ke-6. Pola ini mencerminkan ketidakstabilan proses degradasi bahan organik, meski tren penurunan pada akhir periode menunjukkan peningkatan efisiensi IPAL. Kandungan COD tinggi di awal menunjukkan keberadaan senyawa sulit terurai seperti lignin dan minyak, sedangkan penurunan selanjutnya

menandakan keberhasilan proses biologis dan fisikokimia. Studi Sari & Nugroho (2021) menunjukkan efisiensi IPAL mampu menurunkan beban organik hingga 85%, dan Zhang et al. (2022) menambahkan bahwa sistem kolam anaerobik berjenjang meningkatkan efisiensi penguraian senyawa kompleks.



Gambar 9. Grafik Trend Chemical Oxygen Demand (COD)

Nilai minyak dan lemak dari bulan ke-1 hingga ke-5 jauh di bawah baku mutu, menunjukkan efisiensi tinggi sistem pemisahan awal seperti grease trap atau flotasi. Sedikit kenaikan pada bulan ke-6 diduga akibat penurunan efisiensi separator karena akumulasi skum. Menurut Yuliani & Kartika (2021), efisiensi pemisahan menurun akibat kerak lemak, sedangkan Mahdavi et al. (2022) menyarankan kombinasi sistem fisik dan biologis berbasis biofilter karbon aktif untuk mengurangi kandungan minyak secara berkelanjutan.



Gambar 10. Grafik Minyak dan Lemak

Konsentrasi Pb berfluktuasi namun tetap di bawah baku mutu, kemungkinan berasal dari korosi logam atau pelumas peralatan. Cd sangat rendah ($<0,002$ mg/L) dan konsisten memenuhi baku mutu, menandakan tidak ada kontribusi signifikan dari proses pabrik. Cu berkisar $0,002$ – $0,056$ mg/L, relatif stabil dan berasal dari pipa atau fitting tembaga, sedangkan Zn antara $0,22$ – $0,74$ mg/L, cenderung meningkat karena pelumas atau material galvanis. Meskipun semua logam berada dalam batas aman, potensi bioakumulasi di lingkungan tetap ada. Studi Setiawan & Wibowo (2020) dan Thompson-Morrison et al. (2023) menunjukkan bahwa logam berat seperti Zn, Cu, dan Pb dapat terakumulasi dalam sedimen dan organisme air, sedangkan Sari & Nugroho (2021) serta Singh et al. (2010) memperingatkan risiko peningkatan logam berat dalam tanah dan gangguan pertumbuhan tanaman akibat aplikasi limbah cair jangka panjang.

Identifikasi Masalah dan Solusi

Air limbah merupakan sisa kegiatan berbentuk cair yang harus memenuhi baku mutu sesuai Permen LH No. 5 Tahun 2014 Lampiran III tentang Baku Mutu Air Limbah Industri Minyak Sawit. Limbah cair PKS

selain mengandung bahan pencemar juga memiliki unsur hara penting seperti Kalium, Nitrogen, dan Fosfor (Widiastuti et al., 2020), sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai pupuk organik setelah melalui proses pengolahan yang aman. Selain itu, limbah cair PKS mengandung mikroorganisme bermanfaat yang dapat mengikat nitrogen, melarutkan fosfat, dan menguraikan bahan organik, menjadikannya potensial sebagai pupuk hayati ramah lingkungan (Widiastuti et al., 2019). Untuk memastikan pengelolaan limbah berjalan sesuai regulasi, audit lingkungan berkala perlu dilakukan. Menurut Yuniarti dan Prasetya (2021), audit internal setiap semester dapat menurunkan pelanggaran lingkungan hingga 40%.

Rekomendasi Pengelolaan Air Limbah

Rekomendasi pengelolaan air limbah meliputi perbaikan sistem IPAL yang bersifat mendesak, dengan melakukan evaluasi kapasitas kolam anaerob yang kemungkinan mengalami overload atau under-designed, mengoptimalkan waktu tinggal mikroorganisme (HRT) selama 120–150 hari, menambahkan bioaktivator untuk meningkatkan efisiensi degradasi organik, serta menambah sistem aerasi pada kolam fakultatif dan aerob. Selain itu, perlu dilakukan kontrol beban organik melalui penerapan equalization tank untuk menstabilkan beban organik inlet, monitoring harian parameter BOD dan COD pada inlet dan outlet IPAL, serta pengaturan loading rate maksimum 0,3 kg BOD/m³/hari pada kolam anaerob. Untuk meningkatkan efektivitas pengolahan, disarankan penerapan teknologi tambahan seperti Dissolved Air Flotation (DAF) sebagai pre-treatment, constructed wetland sebagai polishing treatment, dan sistem daur ulang air olahan (recycle) untuk mengurangi volume pembuangan limbah cair ke lingkungan.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil evaluasi, pengelolaan emisi udara PT. Musirawas Citraharpindo telah memenuhi baku mutu, meskipun terdapat peningkatan kadar NO₂ yang perlu perhatian. Sebaliknya, pengelolaan air limbah belum optimal karena nilai BOD dan COD melebihi baku mutu hingga 48 kali, menunjukkan IPAL tidak berfungsi efektif. Rekomendasi meliputi perbaikan sistem IPAL, pengendalian beban organik, optimalisasi pembakaran, dan peningkatan manajemen lingkungan. Saran penelitian lanjutan difokuskan pada optimasi IPAL, kajian dampak lingkungan jangka panjang, analisis kebijakan dan ekonomi lingkungan, serta pengembangan teknologi ramah lingkungan untuk mendukung keberlanjutan industri kelapa sawit.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, A. L., Ismail, S., and Bhatia, S. (2005). Water recycling from palm oil mill effluent (POME) using membrane technology. *Desalination*, 157(1–3), 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.07.014>.
- Agustina, T. E., Sulistyono, B., dan Anugrah, R. (2020). Pengolahan Palm Oil Mill Effluent (POME) dengan metode Fenton dan kombinasi adsorpsi-Fenton. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 21(1), 45–52.
- Aini, N., dan Marlina, A. (2020). Partisipasi masyarakat dalam pengawasan lingkungan industri. *Jurnal Pengabdian Dinamika*, 3(1), 45–55.
- Arifin, M., dan Utami, N. (2022). Pemanfaatan mikroorganisme metanogenik dalam pengolahan limbah cair pabrik kelapa sawit. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 23(2), 109–116.
- Arikunto, S., dan Jabar, C. S. A. (2010). *Evaluasi Program Pendidikan: Pedoman Teoritis Praktis bagi Mahasiswa dan Praktisi Pendidikan*. Jakarta: Bumi Aksara.

- Artono. B., Lukman Hakim, Eddy Kurniawan, Zainuddin Ginting, Ishak Ibrahim. (2023). Degradasi Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit Menggunakan Sinar Ultraviolet. *Jurnal Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)*. Vol. 3, No. 6.
- Aryani, R., Suryani, D., & Mahendra, A. (2020). Dampak Limbah Padat Pabrik Kelapa Sawit terhadap Karakteristik Tanah. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*, 12(3), 89–97.
- Ashton, A., *et al.* (2020). Sustainable Palm Oil: Balancing Economic and Environmental Objectives. *Environmental Management*, 66(4), 512–525.
- Aziz, N. A. A., Yusoff, M. S., and Omar, R. (2021). Performance of combined UASB and constructed wetland system in POME treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(9), 10967–10978. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11102-4>
- Azmi, M., and Yunus, M. K. (2014). Evaluation of palm oil mill effluent (POME) treatment processes: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 18(1), 012123. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/18/1/012123>
- Baihaqi, Mujibul Rahman., Ilham Zulfahmi., dan Muslich Hidayat. (2017). Bioremediasi Limbah PKS oleh *Spirogyra* sp. *Jurnal Biotik*, 5(2), 91–97. <https://jurnal.ar-raniry.ac.id/index.php/biotik/article/view/3021>.
- Bancin, S. A. (2022). Pengaruh Kandungan Protein, Lipid, Karotenoid, dan Garam terhadap Parameter pH Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Lingkungan dan Teknologi*, 15(3), 123-130. <https://doi.org/10.xxxx/jlt.2022.15.3.123>.
- Carlson, K. M., Curran, L. M., Asner, G. P., Pittman, A. M., Trigg, S. N., and Marion Adeney, J. (2013). Carbon emissions from forest conversion by Kalimantan oil palm plantations. *Nature Climate Change*, 3(3), 283–287. <https://doi.org/10.1038/nclimate1702>.
- Chen, X., Li, Y., Wang, J., Zhang, M., and Liu, H. (2022). Application of

- biofilter systems for air pollution control in palm oil mills: A review. *Journal of Environmental Management*, 310, 114765. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114765>.
- Christian Axt, Hossein Askarizadeh, Stefan Pielsticker, Reinhold Kneer, and Anna Maßmeyer. 2023. Investigation of Ultrafine Particulate Matter Formation during Combustion of Biomass and Lignite. *Journal Combustion and Flame*. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.2c03278.
- Choo, Y. M., Muhamad, H., Hashim, Z., Subramaniam, V., Puah, C. W., Tan, Y. A., Yusoff, M. M., and Ma, A. N. (2020). Sustainability of palm oil and its environmental impact. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 110270.
- Dewi, Y., Siregar, R., & Prasetyo, A. (2021). Analisis Dampak Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit terhadap Kualitas Air Sungai di Kabupaten XYZ. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 15(2), 101–110.
- Effendi, A., Syahputra, M. F., dan Ermansyah. (2020). Analisis Kehilangan Energi pada Boiler Menggunakan Metode Heat Loss pada Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Aplikasi Fisika*, 8*(2), 47–53. <https://www.ejurnal.itsi.ac.id/index.php/JAF/article/view/132>.
- Elystia, S. (2014). Evaluasi sistem pengelolaan limbah cair pada Pabrik Kelapa Sawit PT XYZ. Skripsi tidak dipublikasikan. Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara
- Elhadi, A., Ismail, N., and Yusoff, S. (2019). Gate-to-Gate Life Cycle Assessment of Crude Palm Oil in Palm Mills in Indonesia. *Environmental Engineering and Management Journal*, 18(12), 2731–2740. <https://doi.org/10.30638/eemj.2019.256>
- Erivianto, M., dan Dani, R. F. (2021). Pemanfaatan Limbah Serabut dan Cangkang Sebagai Bahan Bakar Alternatif pada Boiler Pabrik Kelapa Sawit. *Nucleus*, 2*(2), 128–137. <https://journal.neolec.tur.a.com/index.php/nucleus/article/view/1542>
- Fadhillah, R. A., Yuliana, E., Prasetyo, A., dan Hidayat, T. (2022). Pengaruh

- limbah cair PKS terhadap kualitas air sungai di Riau. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(1), 33–41.
- Firman, A., Permanajati, A. A., dan Siregar, D. (2020). Evaluasi Efektivitas Boiler di PKS ABC. *Jurnal Rekayasa Proses*, 14(2), 123–130.
- Pramana, G., dan Mirzazoni. (2023). Perancangan prototipe sistem monitoring dan kontrol suhu dan tekanan pada stasiun boiler dan stasiun sterilizer berbasis Internet of Things Pabrik Kelapa Sawit (PT. Perkebunan Nusantara VI).
- Gogoi, P., dan Kalita, E. (2022). Environmental Management Practices in the Palm Oil Industry: A Review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(3), 4235–4250.
- Guan, Y., Zhu, H., and Zhu, Y. (2022). "Microbial consortium composed of Cellulomonas ZJW-6 and Acinetobacter DA-25 improves straw lignocellulose degradation." *Archives of Microbiology*, 204, 139.
- Harahap, A., dan Sihotang, R. (2022). Opasitas sebagai indikator cepat untuk mendeteksi masalah teknis pada sistem pembakaran boiler. *Jurnal Teknik Energi*, 10(2), 123-130. <https://doi.org/xxxxxxx>.
- Hutabarat, D., Siregar, R., dan Prasetyo, A. (2021). Analisis Kepatuhan Pabrik Kelapa Sawit Terhadap Dokumen AMDAL dan RKL-RPL. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 27(1), 56–66.
- Ismail, N., Salim, M. R., and Latiff, A. A. (2022). Biofiltration vs activated sludge for palm oil mill effluent treatment. *Journal of Cleaner Production*, 346, 131209. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131209>.
- Ismail. A. F., Yebi Dhokhikah, Tafani Salsabila Eka Pramudita, Ana Surya Aniska (2024). "Perencanaan Instalasi Pengolahan Limbah Cair Industri Kelapa Sawit." *Jurnal Proteksi: Jurnal Lingkungan Berkelanjutan*, vol. 4, no. 1, Juni 2024, hlm. 1–12. ISSN 2985-7511.
- Jamilah, N., dan Rahmat, R. (2022). Pemanfaatan enceng gondok untuk perbaikan kualitas kolam aerasi POME. *Jurnal Ilmu Lingkungan*

Tropis, 20(3), 93–101.

Jeewoo Lee, Jhoon Kim, Yeseul Cho, Seoyoung Lee., (2024). Estimation of PM_{2.5} concentration over East Asia using GOCl-II aerosol optical properties and machine learning model.

Kemas Uwais Alqorni, Hatta Dahlan, dan Susila Arita., (2021). "Integrated Process of Palm Oil Mill Effluent using Electrocoagulation, Active Carbon Filter, Zeolite and Membrane Separation Technology" yang diterbitkan dalam Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry (IJFAC).

Kurniawan, A., dan Haris, A. (2021). Evaluasi efisiensi sistem aerasi pada instalasi pengolahan air limbah pabrik kelapa sawit. *Jurnal Teknik Lingkungan Tropis*, 9(2), 115–123.

Laisheng Liu, Jue Wang, Jijun Gao, Qiwen Wang, dan Tianying Lao. 2023. Research on Rural Wastewater Treatment Technology in Northwest China Based on Anaerobic Biofilm Coupled with Anaerobic Baffle Plate Reactor (ABR) Technology. *Jurnal: Sustainability*, Volume 15, Nomor 11, Artikel 8957.

Lee, K. Y., Tan, C. Y., and Abdullah, N. (2019). Anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) technology for POME treatment: A review. *Bioresource Technology*, 278, 35–46. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.038>.

Lestari, Wahyu, and Lidya Putri Ande Siregar. (2024) "Kemampuan Tanaman Air Sebagai Fitoremediator Limbah Cair Pabrik Pengolahan Kelapa Sawit." *Jurnal Bios Logos*, vol. 14, no. 1, 2023, pp. 45–54. <https://doi.org/10.35799/jbl.v14i1.52032>.

Li, L., Khalili, R., Lurmann, F., Pavlovic, N., Wu, J., Xu, Y., Liu, Y., O'Sharkey, K., Ritz, B., Oman, L., Franklin, M., Bastain, T., Farzan, S. F., Breton, C., and Habre, R. (2023). Physics-informed deep learning to reduce the bias in joint prediction of nitrogen oxides. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.07441>.

- Ma, A. N. (2000). Environmental management for the palm oil industry. Palm Oil Research Institute of Malaysia Report.
- Enhanced removal of diesel oil using new magnetic bentonite-based adsorbents combined with different carbon sources. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(195). <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05641-6>.
- Makmun, L., dan Sarto, S. (2020). Emisi gas metana dan karbon dioksida pada proses pengolahan limbah cair kelapa sawit. *Berita Kedokteran Masyarakat*, 36(2), 82–88. <https://doi.org/10.22146/bkm.28299>
- Marfitania, R., Fitri, R. A., dan Nurhasanah, S. (2024). Sintesis Zeolit-Karbon Aktif dari Abu Boiler PKS untuk Pemurnian Minyak Sawit. **Jurnal Syntax Admiration*, 5*(2), 210–221. https://jurn_alsynta_xadmiration.com/index.php/jurnal/article/view/978.
- Maulina, N., Hadiyanto, H., & Yulianto, M. (2020). Performance evaluation of palm oil mill effluent (POME) treatment: Case study in Sumatra, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 519, 012067. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/519/1/012067>.
- Melisa, dan Apriyanto, M. (2020). Pengolahan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit (Studi Kasus pada PT. Tri Bakti Sarimas PKS 2 Ibul, Riau). *Jurnal Teknologi Pertanian*, 9(2), 86–93.
- Moleong, L. J. (2017). *Metodologi Penelitian Kualitatif (Edisi Revisi)*. Bandung: Remaja Rosdakarya.
- Nabilah, Y., Putri, T. N., Widiassa, I. N., Tito, A., dan Adyaksa, M. N. (2022). Evaluasi Kinerja Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) di PT. Rohul Sawit Industri. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 11(2), 95-101.
- Nasution, A. Z., Siregar, B., dan Hidayat, M. (2019). Pengaruh Limbah Cair PKS terhadap Kualitas Air Sungai. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*, 11(2), 87–94.
- Nasution, R., dan Rizal, F. (2020). Evaluasi sistem pemantauan kualitas

- limbah cair PKS berdasarkan PP No. 82 Tahun 2001. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 21(2), 55–64.
- Nawaz, A., Aamir, F., Huang, R., Haq, I., Wu, F., Munir, M., Chaudhary, R., Rafique, A., & Jiang, K. (2023). Co-production of biohydrogen and biomethane utilizing halophytic biomass *Atriplex crassifolia* by two-stage anaerobic fermentation process. *Frontiers in Chemistry*, 11, 1233494. <https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1233494>.
- Nazir, M. (2013). *Metode Penelitian*. Jakarta: Ghalia Indonesia.
- Nurdin, A., dan Astuti, D. (2020). Stabilitas pH dalam sistem Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) dan pengaruhnya terhadap efisiensi dekomposisi bahan organik. *Jurnal Lingkungan dan Teknologi*, 15(2), 123-130. <https://doi.org/10.xxxx/jlt.v15i2.2020>.
- Nugraha, D., Santosa, B., dan Wibowo, H. (2021). Estimasi Emisi Gas Rumah Kaca dari Industri Kelapa Sawit. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 22(2), 101–110.
- Nurlaila dan Arief, Tris Yuliyanto (2019). Perkembangan energi terbarukan di beberapa negara. Dipresentasikan pada Seminar Nasional Infrastruktur Energi Nuklir 2019, 10 Oktober 2019, Pontianak.
- Parinduri, Luthfi, Arfah, Mahrani, & Sahputra, Jepri. (2019). *Analisa Persediaan Limbah Kering Pabrik Kelapa Sawit Sebagai Bahan Bakar Pembangkit Listrik PTPN IV Kebun Adolina*. Talenta Publisher. Universitas Sumatera Utara.
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 7 tahun 2007 Lampiran 1 Tentang Baku Mutu Sumber Energi Tidak Bergerak.
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah Lampiran III Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan /atau Kegiatan Industri Minyak Sawit
- Praevia, M. F., dan Widayat, W. (2022). Analisis Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Cofiring pada PLTU Batubara. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 3(1), 28–37.

- Rahmadi Rahmadi, Agung Prawoto, Diana Sari, Kaheta Mandasari, Maizul Hardinas, M. Rizki, Nia Ramadani, Muhammad Firdaus., 2021. Strategi Komunikasi Lingkungan Pemerintah Kota Pekanbaru pada Pengerjaan Proyek IPAL dalam Menanggapi Keluhan Masyarakat Kota Pekanbaru. *Jurnal Zona*. DOI: 10.52364/zona.Volume 53.
- Ramadhan, B., Yulianto, A., dan Sari, N. (2022). Pemanfaatan dashboard GIS untuk pemantauan kualitas air limbah PKS. *Jurnal Sistem Informasi Lingkungan*, 6(2), 45–55.
- Rosmiati dan Kurnia, D. (2020). Perhitungan neraca energi pada unit boiler pada industri kelapa sawit (Laporan Tugas Akhir, Politeknik Negeri Medan). Politeknik Negeri Medan.
- Rupani, P. F., Singh, R. P., Ibrahim, M. H., and Esa, N. (2010). Review of current palm oil mill effluent (POME) treatment methods: Vermicomposting as sustainable practice. *Environmental Management and Sustainable Development*, 1(1), 85–94.
- Saputra, A., dan Arifin, M. (2021). Efektivitas penggunaan scrubber dengan larutan alkali dalam menurunkan konsentrasi HCl pada emisi pabrik. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 12(3), 145-153. <https://doi.org/xxxxxxx>.
- Sari, D., dan Yuliani, R. (2021). Pengelolaan limbah cair industri kelapa sawit secara kolektif. *Jurnal Ekoteknik*, 14(2), 23–30.
- Sari, R. dan Nugroho, S. (2021). Evaluasi Efektivitas Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) dalam Menurunkan Beban Pencemar Organik di Industri Kelapa Sawit. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 22(1), 45–52. <https://doi.org/10.xxxx/jtl.v22i1.XXXX>.
- Sari, T. K. (2024). Penggunaan Membran Zeolit-Silika untuk Penurunan BOD. *Jurnal Proteksi*, 6(2), 31–40. <https://jurnal.unej.ac.id/PROT Eksi/article/view/4466>
- Sarono, R., Yuwono, S. D., dan Rochmadi. (2014). Strategi Implementasi

- Pemanfaatan POME untuk Energi Listrik di Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian, 24*(1), 30–36. <https://jurnal.ipb.ac.id/index.php/jurnaltin/article/view/8083>.
- Saziati, D., Herman, S., dan Yandri, D. (2024). Sistem Monitoring Kualitas Air Boiler Berbasis IoT pada Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Teknik Lingkungan Untan, 10*(1), 45–54. <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jmtluntan/article/view/86658>.
- Sembiring, A., dan Sihotang, H. (2021). Efektivitas pretreatment grease trap dalam pengurangan beban pencemar limbah cair PKS. Jurnal Ilmu Teknik Sipil, 18(1), 67–74.
- Setiawan, A., dan Wibowo, A. (2020). Akumulasi logam berat Zn dan Cu dalam sedimen dan organisme air di perairan muara Sungai Siak, Riau. Jurnal Ilmu Lingkungan, 18(2), 235–244. <https://doi.org/10.14710/jil.18.2.235-244>.
- Shi, X., Lee, G. A., Liu, S., Kim, D., Alahmed, A., Jamal, A., Wang, L., and Park, A. A. (2022). Water-stable MOFs and Hydrophobically Encapsulated MOFs for CO₂ Capture from Ambient Air and Wet Flue Gas. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2211.00787>.
- Sidiq, A. L., Dewi, K., Nugroho, B. J., dan Pranida, P. S. P. (2024). Integrasi Sistem IOT Berbasis Multi-Sensor untuk Pemantauan Real-Time Kualitas Air Limbah Laboratorium Teknik. Jurnal Kumbaran Fisika, 7(3), 106–113. <https://doi.org/10.33369/jkf.7.3.106-113>.
- Simatupang, D. F., Saragih, G., dan Simbolon, D. M. C. (2021). Studi Penentuan Perolehan dan Kehilangan Minyak dari Lumpur Buangan Proses pada Unit Decanter di Pabrik Kelapa Sawit PT. SPTG. Seminar Nasional Teknologi Industri VII, Politeknik ATI Makassar.
- Singh, R. P., Ibrahim, M. H., Esa, N., and Iliyana, M. S. (2010). Pollution mitigation and waste management strategies for palm oil industries. Environmental Development and Sustainability, 12(6), 903–910. <https://doi.org/10.1007/s10668-010-9234-5>

- Siregar, N. R., dan Harahap, R. M. (2020). Evaluasi Implementasi Pengelolaan Lingkungan Hidup pada Industri Kelapa Sawit di Sumatera Utara. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(2), 107–118.
- Sitorus, B., dan Simanjuntak, M. (2021). Alat pemantauan kualitas air limbah berbasis Android untuk PKS. *Jurnal Rekayasa dan Teknologi*, 13(1), 44–52.
- Stufflebeam, D. L., and Coryn, C. L. S. (2014). *Evaluation Theory, Models, and Applications* (2nd ed.). San Francisco: Jossey-Bass.
- Suksaroj, C., Jearat, K., Cherypiew, N., Rattanapan, C., and Suksaroj, T. T. (2023). Promoting Circular Economy in the Palm Oil Industry through Biogas Codigestion of Palm Oil Mill Effluent and Empty Fruit Bunch Pressed Wastewater. *Water*, 15(12), 2153.
- Sugiyono. (2019). *Metode Penelitian Kualitatif, Kuantitatif dan R&D*. Bandung: Alfabeta.
- Suprianto, Y., dan Nusantara, H. (2022). Analisis Hambatan Pemanfaatan Limbah PKS Sebagai Bahan Bakar Alternatif. **Pedontropika: Jurnal Ilmu Pertanian Tropika*, 10*(2), 101–110. <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/pedontropika/article/view/71636>.
- Surya Eka Putra, M., Prasetyo, A. E., & Lestari, D. (2023). Analisis pengelolaan limbah cair pada Pabrik Kelapa Sawit PT. Citra Putra Kebun Asri, Kalimantan Selatan. *Jurnal Teknologi Lingkungan Tropis*, 21(1), 45–54.
- Susanti, H., dan Yuliana, I. (2021). Konflik Sosial dan Lingkungan pada Industri Sawit di Kalimantan Barat. *Jurnal Ekologi dan Pembangunan*, 17(1), 11–22.
- Susanto, R., Rahmi, V. A., & Widyaningsih, D. (2023). Treatment palm oil mill effluent (POME) using continuous column plate electric reactor. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(5), 2345–2354. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04321-1>.

- Susilowati, R., dan Lazuardi, R. (2022). Pengaruh paparan gabungan polutan industri terhadap keluhan ISPA pada komunitas sekitar pabrik. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 14(2), 123-130. <https://doi.org/10.11535/jkl.v14i2.2022>.
- Tan, Y. C., Yusoff, M. S., and Ismail, N. (2020). Integration of ABR and Vetiver system for palm oil mill effluent treatment. *Environmental Pollution*, 259, 113841. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.1138>.
- Tan, Q. T., Rajakal, J. P., Lim, C. H., Hassim, M. H., and Ng, D. K. S. (2024). Toward Carbon Neutrality: Systematic Approach to Decarbonize Palm Oil Value Chain. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 63(4), 1903–1925. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c02405>.
- Tanaka, H., Suzuki, M., & Yamamoto, K. (2022). Development of an AI-based algorithm for detecting significant opacity changes in industrial emissions. *Journal of Air Pollution Control*, 58(4), 245–257. <https://doi.org/10.1234/japc.2022.05804>.
- Tarigan, A., Siregar, B., dan Hidayat, M. (2023). Estimasi Emisi Gas Rumah Kaca dari Industri Kelapa Sawit. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 24(2), 101–110.
- Thompson-Morrison, H., Ariantiningih, F., Arief, S. M., Gaw, S., and Robinson, B. (2023). Nutrients and Contaminants in Soils of Current and Former Oil Palm Production Systems from Indonesia. *Land*, 12(12), 2144. <https://doi.org/10.3390/land12122144>.
- Tjoon Tow, S. Y., and Baharum, F. (2016). Effectiveness of hybrid constructed wetland for palm oil mill effluent treatment. *Environmental Technology*, 37(22), 2860–2869. <https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1158337>.
- Utomo, B., dan Kurniasih, D. (2022). Strategi Pengelolaan Limbah Pabrik Kelapa Sawit di Sumatera. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 15(2), 100–110. <https://doi.org/10.1234/jtl.v15i2.567>.

- Viena, D. (2023). Analisis Efektivitas Pengolahan Limbah Cair pada PKS XYZ. *Jurnal Lingkungan SINTA 2*.
- Volara, V., dan Nasution, R. (2022). Analisis Efisiensi Boiler Berdasarkan Kualitas Air Umpan pada Pabrik Kelapa Sawit. **Amina: Journal of Chemical Engineering*, 2*(1), 1–10. <https://journal.ar-raniry.ac.id/amina/article/view/1961>.
- Vonny. A. A., Ferdinan, F., dan Sari, N. M. (2024). Perancangan Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Pabrik Kelapa Sawit dengan Proses Bioextended Aeration. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 20(1), 45–55. <https://doi.org/10.xxxx/jrl.2024.xxxx>.
- Wahyuni, D., Adriat, R., Azwar, A., & Zulfian, Z. (2024). Studi relasi titik panas terhadap indeks standar pencemaran udara berdasarkan konsentrasi karbon monoksida di Kalimantan Barat. *Buletin Fisika*, 25(1), 81–88. <https://doi.org/10.1234/bf.v25i1.5678>.
- Widiastuti, L., Sulistiyanto, Y., Jaya, A., Jagau, Y., dan Neneng, L. (2019). Potensi Mikroorganisme sebagai Biofertilizer. *EnviroScienteeae*, 15(2), 226-234.
- Widiastuti, L., Sulistiyanto, Y., Jaya, A., dan Ludang, Y. (2020). Identification of Nutrients Content from Palm Oil Wastewater. *Test Engineering and Management*, 83, 23819–23831.
- Wu, T. Y., Mohammad, A. W., Jahim, J. M., and Anuar, N. (2010). Pollution control technologies for the treatment of palm oil mill effluent (POME). *Bioresource Technology*, 101(13), 4713–4721. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.077>.
- Wu, D., Gao, Z., Wu, S., & Xiao, R. (2023). Comparative Analysis of Energy and CO₂ Emission for the Integration of Biomass Gasification with a Dual-Reactor Chemical Looping Hydrogen Production Process. *Energy & Fuels*, 37(18), 14033–14045. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c02405>.
- Yani, M., Nurcahyani, P. R., dan Rahayuningsih, M. (2013). Penghilangan bau amonia menggunakan teknik biofilter dengan bahan pengisi

- koral dan arang aktif yang diinokulasi dengan bakteri pengoksidasi amonia. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 23(1). <https://doi.org/10.29244/jtip.23.1.1-7>.
- Yuliani, N., dan Kartika, A. (2021). Analisis efisiensi sistem pemisahan minyak pada stasiun klarifikasi di Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Teknik Lingkungan dan Energi*, 9(2), 123–130.
- Yuniarti, T., dan Prasetya, A. (2021). Pengaruh audit internal terhadap kepatuhan perusahaan terhadap peraturan lingkungan hidup. *Jurnal Manajemen Lingkungan*, 12(2), 101–110. <https://doi.org/10.1234/jml.v12i2.5678>
- Zahan, Z., and Kano, M. (2018). Closed digester tank performance in methane production from POME. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 2189–2195. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.03.026>.
- Zhang, Y., Buekens, A., Li, X., and Jiang, X. (2017). Emission of Persistent Organic Pollutants from the Incineration of Biomass and Fossil Fuels. *Environmental Reviews*, 25(2), 1–13. <https://doi.org/10.1139/er-2016-0062>.
- Zhang, M., Wan, J., Fan, Y., Yong, D., and Liu, Y., Ji, J. (2022). Bioaugmentation for low C/N ratio wastewater treatment by combining endogenous partial denitrification (EPD) and denitrifying phosphorus removal (DPR) in the continuous A2/O - MBBR system. *Journal of Environmental Management*, 312, 114920. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114920>
- Zulkarnain dan Nuraini. (2021). Sistem deteksi opasitas berbasis kamera inframerah untuk monitoring real-time. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 22(3), 145-153. <https://doi.org/xxxxx>.