PEMBUATAN ADSORBEN BERBAHAN DAUN SAWIT DAN ZEOLIT UNTUK MEREDUKSI pH, COD, BOD, TSS PADA KOLAM LIMBAH FINAL POND

Ghifari Maulana Hasbullah[1], Rafael Remit Winardi[2]

[1,2]*Institut Teknologi Sawit Indonesia*
E-mail : egimaulana123456@gmail.com

ABSTRACT

This study aimed to produce an adsorbent from a mixture of activated oil palm leaf charcoal and zeolite and to evaluate its effectiveness in reducing pH, COD, BOD, and TSS in final pond wastewater from a palm oil mill using a column method. Wastewater discharged from the final pond must comply with the quality standards stipulated in Regulation of the Minister of Environment No. 5 of 2014 before being released into the environment. Oil palm leaves containing cellulose, hemicellulose, and lignin have the potential to be converted into activated charcoal, which, when combined with zeolite, can function as an adsorbent to reduce pollutant loads. This study employed a Completely Randomized Design (CRD) with a non-factorial treatment consisting of one factor, namely the ratio of activated oil palm leaf charcoal to zeolite, with four treatment levels (P1 = 4:1, P2 = 3:2, P3 = 2:3, and P4 = 1:4). The adsorbents were activated using HCl and NaOH, with three replications for each treatment. Among all treatments, P4 with a ratio of 1:4, which had the highest proportion of zeolite, produced the best post-adsorption water quality, with average values of pH 7.46, COD 152.93 mg/L, BOD 59.57 mg/L, and TSS 74.33 mg/L. The removal efficiencies reached 61.75% for COD, 65.31% for BOD, and 71.63% for TSS. The One-Way ANOVA results showed that variations in adsorbent composition had a significant effect on pH, COD, and TSS, but did not have a significant effect on BOD. It can be concluded that a higher proportion of zeolite in the adsorbent medium resulted in better pollutant removal performance. All treatments met the applicable quality standards (pH 6–9, COD <350 mg/L, BOD <100 mg/L, and TSS <250 mg/L). Therefore, this adsorbent can be utilized as an alternative for further treatment of wastewater in the final pond prior to discharge into the environment.

Keywords : *Adsorbent, Activated Oil Palm Leaf Charcoal, Zeolite, Ph, COD, BOD, TSS*

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk membuat adsorben dari campuran arang aktif daun kelapa sawit dan zeolit serta menguji efektivitasnya dalam mereduksi pH, COD, BOD, dan TSS pada air limbah kolam akhir (final pond) pabrik kelapa sawit menggunakan metode kolom. Air limbah yang berasal dari kolam akhir harus memenuhi baku mutu berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014 sebelum dibuang ke lingkungan. Daun kelapa sawit yang mengandung selulosa, hemiselulosa, dan lignin berpotensi dijadikan arang aktif yang apabila dikombinasikan dengan zeolit dapat berfungsi sebagai adsorben penurun beban pencemar. Penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) Non Faktorial dengan satu faktor, yaitu perbandingan rasio arang aktif daun sawit dan zeolit pada empat taraf perlakuan (P1 = 4:1, P2 = 3:2, P3 = 2:3, dan P4 = 1:4) yang diaktivasi menggunakan HCl dan NaOH dengan tiga kali ulangan. Dari semua perlakuan, perlakuan P4 dengan perbandingan 1:4 (proporsi zeolit paling tinggi) menghasilkan kualitas air setelah adsorpsi yang paling baik, dengan nilai rata-rata pH 7,46; COD 152,93 mg/l; BOD 59,57 mg/l; dan TSS 74,33 mg/l serta efektivitas penurunan mencapai 61,75% untuk COD, 65,31% untuk BOD, dan 71,63% untuk TSS. Hasil uji One Way Anova menunjukkan variasi komposisi adsorben berpengaruh signifikan terhadap pH, COD, dan TSS, tetapi tidak signifikan terhadap BOD. Dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi proporsi zeolit dalam media adsorben, semakin baik kemampuannya menurunkan polutan, dan seluruh perlakuan telah memenuhi baku mutu (pH 6–9, COD <350, BOD <100, dan TSS <250 mg/l) sehingga adsorben ini dapat dimanfaatkan sebagai alternatif pengolahan lanjutan air limbah pada kolam akhir sebelum dibuang ke lingkungan.

Kata Kunci : *Adsorben, Arang Aktif Daun Sawit, Zeolit, Ph, COD, BOD, TSS*

PENDAHULUAN

Pabrik Kelapa Sawit (PKS) memiliki peran strategis dalam industri agribisnis Indonesia sebagai penghasil utama *Crude Palm Oil* (CPO) dan *Palm Kernel* (PK) yang menjadi komoditas ekspor unggulan. Proses produksi di PKS meliputi beberapa tahapan utama, yaitu sterilisasi, pengepresan, klarifikasi, dan pengolahan biji, yang bertujuan menghasilkan produk berkualitas tinggi dengan rendemen optimal. Keberadaan PKS, baik yang dikelola oleh Badan Usaha Milik Negara (BUMN) maupun swasta, turut berkontribusi signifikan terhadap pertumbuhan ekonomi nasional.(Stephanie et al., 2018). Di sisi lain, aktivitas operasional PKS menghasilkan limbah yang berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Limbah cair pabrik kelapa sawit atau *Palm Oil Mill Effluent* (POME) mengandung parameter pencemar yang tinggi seperti *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), dan Total *Suspended Solids* (TSS). Jika tidak dikelola dengan baik, limbah ini dapat mencemari perairan, menurunkan kualitas lingkungan, serta berdampak pada kesehatan masyarakat sekitar. Beberapa kasus menunjukkan bahwa kualitas limbah pada kolam akhir (*final pond*) masih belum memenuhi baku mutu lingkungan yang ditetapkan, terutama pada parameter pH, COD, BOD, dan TSS.(Yoeliarniza et al., 2025). Permasalahan tersebut menunjukkan pentingnya pengelolaan limbah yang efektif dan berkelanjutan.

Upaya pengendalian dampak lingkungan dapat dilakukan melalui penerapan Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL), Upaya Pengelolaan Lingkungan dan Pemantauan Lingkungan (UKL-UPL), sertaa pengawasan oleh instansi terkait. Selain itu, pengembangan teknologi pengolahan limbah yang ramah lingkungan menjadi langkah strategis untuk meminimalkan pencemaran sekaligus meningkatkan efisiensi pengolahan limbah.(Pertanian, 2015). Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan adalah pemanfaatan limbah biomassa kelapa sawit, seperti daun atau pelepah, menjadi arang aktif. Arang aktif memiliki luas permukaan dan porositas yang tinggi sehingga efektif digunakan sebagai adsorben dalam pengolahan limbah cair. Pemanfaatan ini tidak hanya membantu mengurangi limbah padat, tetapi juga memberikan nilai tambah terhadap limbah tersebut.(Al Muttaqii et al., 2019). Lebih lanjut, efektivitas adsorpsi dapat ditingkatkan dengan mengombinasikan arang aktif dengan zeolit yang memiliki kemampuan pertukaran ion dan struktur berpori. Aktivasi kimia menggunakan asam dan basa bertujuan untuk meningkatkan jumlah situs aktif dan luas permukaan adsorben. Kombinasi ini diharapkan mampu meningkatkan efisiensi penurunan parameter pencemar dalam limbah cair PKS.(Paradise et al., 2022). Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan adsorben berbasis arang aktif daun kelapa sawit dan zeolit yang diaplikasikan dalam sistem kolom adsorpsi. Kinerja adsorben akan dievaluasi berdasarkan kemampuannya dalam menurunkan parameter pH, COD, BOD, dan TSS pada limbah cair PKS, sehingga memenuhi standar baku mutu lingkungan sebelum dibuang ke badan air.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan Rancangan Acak Lengkap (RAL) nonfaktorial yang terdiri atas satu faktor, yaitu perbandingan arang aktif daun kelapa sawit dan zeolit. Perlakuan yang digunakan terdiri atas empat taraf, yaitu P1 (4:1), P2 (3:2), P3 (2:3), dan P4 (1:4), dengan tiga kali ulangan sehingga diperoleh 12 satuan percobaan. Variabel bebas penelitian adalah perbandingan arang aktif daun sawit dan zeolit, sedangkan variabel terikat meliputi pH,

Chemical Oxygen Demand (COD), Biochemical Oxygen Demand (BOD), dan Total Suspended Solids (TSS). Peralatan yang digunakan antara lain kolom adsorben berbahan pipa akrilik, pipa air, kertas saring, saringan, *beaker glass*, erlenmeyer, spektrofotometer, dan buret digital. Bahan penelitian terdiri atas arang aktif daun sawit, zeolit, air limbah *final pond*, HCl, dan NaOH.

Pembuatan adsorben diawali dengan preparasi arang aktif dari daun kelapa sawit yang diaktivasi secara kimia menggunakan HCl dan NaOH sebanyak 300 mL, kemudian ditutup dengan aluminium foil selama 7–8 jam. Zeolit dipreparasi dengan memecah bongkahan menjadi ukuran yang lebih kecil, kemudian bahan disaring menggunakan saringan 200 mesh. Arang aktif daun sawit dan zeolit selanjutnya dicampurkan sesuai dengan rasio perlakuan 4:1, 3:2, 2:3, dan 1:4, kemudian digunakan sebagai media adsorben dalam kolom. Air limbah *final pond* dialirkan melalui kolom adsorben dan hasil pengolahan dikumpulkan untuk dianalisis.

Parameter kualitas air yang dianalisis meliputi pH, COD, BOD, dan TSS sebelum dan sesudah perlakuan. Pengukuran pH dilakukan menggunakan pH meter, sedangkan BOD dianalisis berdasarkan SNI 6989.72:2009 melalui pengukuran oksigen terlarut sebelum dan setelah inkubasi selama lima hari pada suhu 20 ± 1°C. COD dan TSS dianalisis menggunakan metode yang mengacu pada standar pengujian yang digunakan dalam penelitian. Data hasil pengujian dianalisis menggunakan *One Way ANOVA* pada taraf kepercayaan 95%. Apabila terdapat perbedaan yang signifikan ($p < 0,05$), analisis dilanjutkan dengan uji Duncan untuk mengetahui perbedaan antarperlakuan.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Laju Aliran pada Proses Adsorpsi

Pada penelitian ini perlu diketahui laju aliran (debit) air pada saat proses adsorpsi berlangsung, karena laju aliran akan mempengaruhi lama waktu kontak antara air limbah dengan media adsorben di dalam kolom. Waktu kontak yang cukup diperlukan agar polutan dapat terjerap secara optimal pada permukaan adsorben. Hasil pengamatan waktu yang dibutuhkan air untuk melewati kolom adsorben pada masing-masing perlakuan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Laju Aliran Air Limbah

No	Perlakuan	Ulangan I (menit)	Ulangan II (menit/cm)	Ulangan III (menit/cm)	Rata-rata (menit/cm)
1	P1 (4:1)	9,22	10,23	9,51	9,65
2	P2 (3:2)	8,51	9,05	11,24	9,60
3	P3 (2:3)	9,10	8,44	9,12	8,89
4	P4 (1:4)	9,26	7,56	7,50	8,11

Volume air yang ditampung pada setiap pengambilan sampel sebesar 150 ml, sedangkan rata-rata waktu pengaliran keseluruhan sebesar 9,06 menit/cm, sehingga diperoleh laju aliran rata-rata sebesar 16,55 ml/menit. Apabila ditinjau pada masing-masing perlakuan, laju aliran berturut-turut sebesar 15,54 ml/menit (P1), 15,62 ml/menit (P2), 16,88 ml/menit (P3), dan 18,50 ml/menit (P4). Berdasarkan data tersebut terlihat kecenderungan bahwa semakin tinggi proporsi zeolit dalam media adsorben (dari P1 menuju P4), waktu pengaliran semakin singkat dan laju aliran semakin cepat.

Mutu Air Limbah Sebelum Perlakuan

Tahap awal penelitian dilakukan dengan menguji mutu air limbah sebelum diberi perlakuan adsorpsi. Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh data dasar (*baseline*) sebagai pembanding, sehingga besarnya perubahan mutu air pada setiap perlakuan dapat dievaluasi secara objektif. Air limbah diambil dari kolam akhir (*final pond*) dan diuji pada empat parameter, yaitu pH, COD, BOD, dan TSS. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 3.2.

Tabel 2. Mutu Air Limbah Sebelum Perlakuan

Parameter	Satuan	Hasil Sebelum Perlakuan	Baku Mutu (Permen LHK No. 5 2014)
pH	-	6,18	6 – 9
COD	mg/l	399,8	350
BOD	mg/l	171,7	100
TSS	mg/l	262	250

Sumber : hasil uji laboraturium shavera enviro 2026

Berdasarkan Tabel 3.2, air limbah sebelum perlakuan memiliki nilai pH 6,18, COD 399,8 mg/l; BOD 171,7 mg/l, dan TSS 262 mg/l. Apabila dibandingkan dengan baku mutu limbah cair kelapa sawit menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014, nilai pH 6,18 masih tergolong memenuhi syarat karena berada dalam rentang 6 – 9, namun cenderung bersifat asam. Sementara itu, ketiga parameter lainnya masih melampaui ambang batas yang ditetapkan, yakni COD sebesar 350 mg/l, BOD sebesar 100 mg/l, dan TSS sebesar 250 mg/l. Tingginya nilai COD dan BOD menunjukkan bahwa air limbah masih mengandung beban bahan organik yang besar, sedangkan tingginya TSS mengindikasikan banyaknya partikel padatan tersuspensi yang terkandung di dalamnya. Kondisi ini menegaskan bahwa air limbah pada kolam akhir belum layak dibuang ke lingkungan dan memerlukan pengolahan lanjutan. Untuk menjamin perbandingan yang adil, seluruh perlakuan menggunakan air baku dengan mutu awal yang sama(Zainal et al., 2017).

Sebelum hasil pengujian diuraikan, terlebih dahulu dijelaskan pengertian dan baku mutu masing-masing parameter yang menjadi acuan penilaian mutu air limbah menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014.

a. Ph (Derajat Keasaman), Dengan Baku Mutu 6,0 – 9,0. pH menunjukkan tingkat keasaman atau kebasaan air limbah.
b. COD (*Chemical Oxygen Demand*), Dengan Baku Mutu Maksimum 350 Mg/L. COD menyatakan jumlah oksigen yang diperlukan untuk mengoksidasi bahan organik secara kimiawi di dalam air.
c. BOD (*Biochemical Oxygen Demand*), Dengan Baku Mutu Maksimum 100 Mg/L. BOD menyatakan jumlah oksigen yang dibutuhkan mikroorganisme untuk menguraikan bahan organik yang mudah terurai secara hayati.
d. Tss (*Total Suspended Solids*), Dengan Baku Mutu Maksimum 250 Mg/L. TSS menyatakan jumlah padatan tersuspensi yang tertahan pada saat penyaringan.

Tingkat Keasaman (pH) Air Setelah Perlakuan

Pengujian pH bertujuan untuk mengetahui perubahan tingkat keasaman atau kebasaan air limbah setelah melewati kolom adsorben yang berisi campuran arang aktif daun sawit dan zeolit. Nilai pH merupakan salah satu indikator penting karena turut menentukan kelayakan air limbah untuk dibuang ke lingkungan maupun dimanfaatkan kembali. Hasil pengamatan nilai pH air setelah perlakuan disajikan pada Tabel 3.3.

Tabel 3. Hasil Pengamatan Tingkat Keasaman (pH) Air Setelah Perlakuan

No	Perlakuan	Ulangan I	Ulangan II	Ulangan III	Rata-rata
1	P1 (4:1)	7,30	7,16	7,26	7,24
2	P2 (3:2)	7,21	7,04	7,24	7,16
3	P3 (2:3)	7,21	7,33	7,24	7,26
4	P4 (1:4)	7,52	7,31	7,54	7,46

Berdasarkan Tabel 3, seluruh perlakuan menghasilkan pH rata-rata 7,16–7,46, meningkat dari kondisi awal 6,18 yang bersifat sedikit asam. Kenaikan pH menunjukkan bahwa proses adsorpsi mampu menetralkan air limbah melalui kemampuan pertukaran kation dan gugus permukaan pada zeolit serta arang aktif dalam menjerap ion H^+. Nilai pH tertinggi diperoleh pada P4 (1:4) sebesar 7,46, sedangkan terendah pada P2 (3:2) sebesar 7,16. Proporsi zeolit yang lebih tinggi pada P4 diduga meningkatkan kemampuan pertukaran kation sehingga pH lebih meningkat. Seluruh perlakuan masih memenuhi baku mutu pH 6–9.

Hasil ini sejalan dengan penelitian Trisnadewi et al. (2017) yang menunjukkan kemampuan zeolit teraktivasi dalam meningkatkan pH air. Paradise et al. (2022) juga menyatakan bahwa perbedaan komposisi bahan adsorben dapat memengaruhi kinerja adsorpsi. Selain itu, aktivasi kimia menggunakan asam dan basa dapat mengubah karakteristik permukaan adsorben (Al Muttaqii et al., 2019). Temuan Winardi & Prasetyo (2025) juga menunjukkan bahwa bioadsorben teraktivasi mampu menjerap ion H^+ sehingga meningkatkan pH limbah. Dengan demikian, kombinasi arang aktif daun sawit dan zeolit yang diaktivasi secara kimia efektif membantu menetralkan air limbah.

Uji One Way Anova pH

Untuk mengetahui apakah perbedaan komposisi adsorben memberikan pengaruh yang nyata terhadap nilai rata-rata pH air, dilakukan analisis ragam satu arah (*One Way Anova*) pada taraf kepercayaan 95%. Ringkasan hasil uji disajikan pada Tabel 3.4.

Tabel 3. Uji Anova pH Air

pH	Jumlah Kuadrat	DB	Rata-rata Kuadrat	F	Sig.
Antar Kelompok	0,140	3	0,047	5,066	0,030
Dalam Kelompok	0,074	8	0,009		
Total	0,214	11			

Hasil analisis ragam menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,030 ($p < 0,05$). Nilai ini berarti perbedaan komposisi arang aktif daun sawit dan zeolit memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai pH air hasil perlakuan. Oleh karena terdapat perbedaan yang nyata antar perlakuan, analisis dilanjutkan dengan uji jarak berganda Duncan untuk mengetahui perlakuan mana yang saling berbeda nyata.

Uji Duncan pH

Oleh karena terdapat perbedaan yang nyata antar perlakuan, analisis dilanjutkan dengan uji jarak berganda Duncan untuk mengetahui perlakuan mana yang saling berbeda nyata. Hasil uji duncan disajikan pada Tabel 5.

Tabel 4. Uji Duncan pH

Perlakuan	Rata-rata pH	Notasi
P2 (3:2)	7,16	a
P1 (4:1)	7,24	a
P3 (2:3)	7,26	a
P4 (1:4)	7,46	b

Keterangan: Angka yang diikuti oleh huruf (notasi) yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata, sedangkan huruf yang berbeda menunjukkan berbeda nyata pada uji Duncan taraf 5%.

Berdasarkan hasil uji Duncan pada, perlakuan P2, P1, dan P3 berada pada notasi yang sama (a) yang berarti ketiganya tidak berbeda nyata satu sama lain, sedangkan perlakuan P4 (1:4) berada pada notasi yang berbeda (b) sehingga berbeda nyata dibandingkan ketiga perlakuan lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan dengan proporsi zeolit tertinggi (P4) menghasilkan nilai pH yang nyata lebih tinggi dibandingkan perlakuan lainnya. Kondisi tersebut sejalan dengan sifat zeolit yang memiliki kapasitas tukar kation paling besar, sehingga semakin banyak proporsi zeolit, semakin besar pula kecenderungan kenaikan pH menuju basa. Walaupun berbeda nyata, nilai pH pada P4 masih tergolong aman karena tetap berada dalam rentang baku mutu yang dipersyaratkan.

Kandungan *Chemical Oxygen Demand* (COD) Setelah Perlakuan

Chemical Oxygen Demand (COD) menyatakan jumlah oksigen yang diperlukan untuk mengoksidasi bahan organik secara kimiawi di dalam air. Semakin tinggi nilai COD, semakin besar pula kandungan bahan organik yang terdapat dalam air limbah, baik yang bersifat dapat terurai secara hayati maupun yang sulit terurai. Hasil pengamatan kandungan COD air setelah perlakuan disajikan pada Tabel 6.

Tabel 5. Hasil Pengamatan Kandungan COD (mg/l) Air Setelah Perlakuan

No	Perlakuan	Ulangan I	Ulangan II	Ulangan III	Rata-rata
1	P1 (4:1)	196,5	231,8	243,9	224,07
2	P2 (3:2)	164,5	175,6	198,9	179,67
3	P3 (2:3)	156,8	167,9	175,5	166,73
4	P4 (1:4)	125,4	178,9	154,5	152,93

Berdasarkan Tabel 3.6, kandungan COD air setelah perlakuan mengalami penurunan yang cukup besar dibandingkan kondisi awal sebesar 399,8 mg/l. Nilai COD rata-rata terendah diperoleh pada perlakuan P4 (1:4) sebesar 152,93 mg/l, kemudian berturut-turut meningkat pada P3 (2:3) sebesar 166,73 mg/l, P2 (3:2) sebesar 179,67 mg/l, dan tertinggi pada P1 (4:1) sebesar 224,07 mg/l. Pola tersebut memperlihatkan kecenderungan yang jelas, yaitu semakin tinggi proporsi zeolit dalam media adsorben, semakin besar penurunan COD yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan bahwa zeolit berperan dominan dalam menyerap senyawa organik penyebab tingginya COD.

Uji One Way Anova COD

Untuk menguji signifikansi pengaruh komposisi adsorben terhadap penurunan COD, dilakukan analisis ragam satu arah (*One Way Anova*). Hasil uji disajikan pada Tabel 7.

Tabel 6. Uji Anova COD

COD	Jumlah Kuadrat	DB	Rata-rata Kuadrat	F	Sig.
Antar Kelompok	8543,103	3	2847,701	6,620	0,015

Dalam Kelompok	3441,267	8	430,158
Total	11984,370	11	

Nilai signifikansi sebesar 0,015 ($p < 0,05$) menunjukkan bahwa perbedaan komposisi adsorben berpengaruh signifikan terhadap penurunan kandungan COD air. Dengan demikian, analisis dilanjutkan dengan uji Duncan untuk melihat letak perbedaan antar perlakuan.

Uji Duncan COD

Dikarenakan hasil uji anova menunjukkan perngaruh yang signifikan antar perlakuan maka analisis dilanjutkan dengan uji Duncan untuk melihat letak perbedaan antar perlakuan. Hasil uji duncan disajika pada Tabel 8.

Tabel 7. Uji Duncan COD

Perlakuan	Rata-rata COD (mg/l)	Notasi
P4 (1:4)	152,93	a
P3 (2:3)	166,73	a
P2 (3:2)	179,67	a
P1 (4:1)	224,07	b

Keterangan: Angka yang diikuti oleh huruf (notasi) yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada uji Duncan taraf 5%.

Berdasarkan uji Duncan , perlakuan P4, P3, dan P2 berada pada notasi yang sama (a) sehingga ketiganya tidak berbeda nyata, sedangkan perlakuan P1 (4:1) berada pada notasi yang berbeda (b) dan berbeda nyata dibandingkan ketiga perlakuan lainnya. Hasil ini mempertegas bahwa perlakuan dengan proporsi arang aktif daun sawit paling dominan (P1) justru memiliki kemampuan paling rendah dalam menurunkan COD, sementara perlakuan dengan proporsi zeolit yang lebih tinggi (P2, P3, dan P4) menghasilkan penurunan COD yang nyata lebih baik. Secara statistik, perlakuan terbaik dalam menurunkan COD adalah P4 (1:4) dengan nilai rata-rata terendah sebesar 152,93 mg/l.

Kandungan *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) Setelah Perlakuan

Biochemical Oxygen Demand (BOD) menunjukkan jumlah oksigen yang dibutuhkan oleh mikroorganisme untuk menguraikan bahan organik yang dapat terurai secara hayati di dalam air. Nilai BOD yang tinggi menandakan besarnya beban pencemar organik yang berpotensi menurunkan kadar oksigen terlarut di perairan apabila air limbah dibuang tanpa pengolahan. Hasil pengamatan kandungan BOD air setelah perlakuan disajikan pada Tabel 9.

Tabel 8. Hasil Pengamatan Kandungan BOD (mg/l) Air Setelah Perlakuan

No	Perlakuan	Ulangan I	Ulangan II	Ulangan III	Rata-rata
1	P1 (4:1)	70,7	87,1	79,3	79,03
2	P2 (3:2)	65,7	84,7	67,0	72,47
3	P3 (2:3)	60,6	76,2	68,4	68,40
4	P4 (1:4)	50,5	65,9	62,3	59,57

Berdasarkan Tabel 9, kandungan BOD air setelah perlakuan mengalami penurunan yang cukup besar dibandingkan kondisi awal sebesar 171,7 mg/l. Nilai BOD rata-rata terendah terdapat pada perlakuan P4 (1:4) sebesar 59,57 mg/l, kemudian P3 (2:3) sebesar 68,40 mg/l, P2 (3:2) sebesar 72,47 mg/l, dan tertinggi pada P1 (4:1) sebesar 79,03 mg/l. Pola penurunan BOD sejalan dengan pola pada parameter COD, yaitu semakin tinggi proporsi zeolit, semakin rendah nilai BOD

yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan bahwa media adsorben mampu menjerap bahan organik terlarut yang menjadi sumber konsumsi oksigen oleh mikroorganisme, sehingga beban organik biodegradable dalam air ikut berkurang. Seluruh perlakuan telah berhasil menurunkan BOD hingga berada di bawah baku mutu 100 mg/l, dengan P4 sebagai nilai terendah. Efektivitas penurunan BOD pada penelitian ini sebesar 65,31% (P4) sebanding dengan hasil penelitian terdahulu yang menggunakan adsorben karbon aktif dan zeolit. (Trisnadewi et al., 2017), melaporkan bahwa zeolit alam teraktivasi HCl mampu menurunkan BOD limbah cair tahu hingga 85,7%, Pembanding lain diperoleh dari (Sisnayati et al., 2021), yang mengolah limbah cair pabrik kelapa sawit menggunakan proses aerasi plat berlubang dan memperoleh penurunan BOD tertinggi sebesar 95,5% pada hari kedua. Persentase tersebut lebih tinggi dibandingkan penelitian ini, namun dicapai melalui mekanisme biologis dengan waktu tinggal beberapa hari, sedangkan proses adsorpsi pada penelitian ini berlangsung dalam waktu yang jauh lebih singkat. Sebaliknya, (Ilmanafia & Sudarminto, 2023), yang menggunakan adsorben tunggal berupa arang aktif bonggol jagung secara *batch* hanya memperoleh penurunan BOD sebesar 6,06%. Dengan demikian, penurunan BOD sebesar 65,31% pada penelitian ini tergolong baik untuk metode adsorpsi kolom, meskipun secara statistik perbedaan antarperlakuan belum memberikan pengaruh yang nyata.

Uji One Way Anova BOD

Untuk mengetahui signifikansi pengaruh komposisi adsorben terhadap penurunan BOD, dilakukan analisis ragam satu arah (*One Way Anova*) sebagaimana disajikan pada Tabel 10.

Tabel 9. Uji Anova BOD

BOD	Jumlah Kuadrat	DB	Rata-rata Kuadrat	F	Sig.
Antar Kelompok	597,087	3	199,029	2,604	0,124
Dalam Kelompok	611,380	8	76,422		
Total	1208,467	11			

Nilai signifikansi sebesar 0,124 (p > 0,05) menunjukkan bahwa perbedaan komposisi adsorben tidak berpengaruh signifikan secara statistik terhadap penurunan kandungan BOD. Meskipun secara angka rata-rata terjadi penurunan BOD yang konsisten dari P1 menuju P4, penurunan tersebut berlangsung dengan laju yang relatif merata pada seluruh perlakuan sehingga perbedaan antar kelompok tidak cukup besar untuk dinyatakan nyata secara statistik. Kondisi ini mengindikasikan bahwa baik zeolit maupun arang aktif daun sawit sama-sama mampu menurunkan beban organik biodegradable, sehingga variasi proporsi kedua bahan belum memberikan pengaruh yang signifikan terhadap parameter BOD.

Kandungan *Total Suspended Solid* (TSS) Setelah Perlakuan

Total Suspended Solid (TSS) menyatakan jumlah padatan tersuspensi di dalam air yang tertahan pada saat penyaringan. Kandungan TSS yang tinggi dapat meningkatkan kekeruhan air dan menghambat penetrasi cahaya matahari sehingga mengganggu kehidupan organisme di perairan. Hasil pengamatan kandungan TSS air setelah perlakuan disajikan pada Tabel 11.

Tabel 10. Hasil Pengamatan Kandungan TSS (mg/l) Air Setelah Perlakuan

No	Perlakuan	Ulangan I	Ulangan II	Ulangan III	Rata-rata
1	P1 (4:1)	95	107	112	104,67

2	P2 (3:2)	74	97	76	82,33
3	P3 (2:3)	95	105	98	99,33
4	P4 (1:4)	70	86	67	74,33

Berdasarkan Tabel 11, kandungan TSS air setelah perlakuan mengalami penurunan yang signifikan dibandingkan kondisi awal sebesar 262 mg/l. Nilai TSS rata-rata terendah diperoleh pada perlakuan P4 (1:4) sebesar 74,33 mg/l, kemudian P2 (3:2) sebesar 82,33 mg/l, P3 (2:3) sebesar 99,33 mg/l, dan tertinggi pada P1 (4:1) sebesar 104,67 mg/l. Hal ini menunjukkan bahwa adsorben arang aktif daun sawit dan zeolit mampu menghasilkan mutu air akhir yang lebih baik meskipun beban TSS awal kedua penelitian berbeda.(Ahmad et al., 2011), yang memanfaatkan cangkang sawit sebagai media penyisihan padatan pada limbah cair pabrik kelapa sawit juga menunjukkan bahwa media berbahan biomassa sawit berpotensi menahan padatan tersuspensi, sebagaimana arang aktif daun sawit yang digunakan pada penelitian ini.

Uji One Way Anova TSS

Untuk menguji signifikansi pengaruh komposisi adsorben terhadap penurunan TSS, dilakukan analisis ragam satu arah (*One Way Anova*) sebagaimana disajikan pada Tabel 12.

Tabel 11. Uji Anova TSS

TSS	Jumlah Kuadrat	DB	Rata-rata Kuadrat	F	Sig.
Antar Kelompok	1819,000	3	606,333	6,567	0,015
Dalam Kelompok	738,667	8	92,333		
Total	2557,667	11			

Nilai signifikansi sebesar 0,015 ($p < 0,05$) menunjukkan bahwa perbedaan komposisi adsorben berpengaruh signifikan terhadap penurunan kandungan TSS. Oleh karena itu, analisis dilanjutkan dengan uji Duncan.

Uji Duncan TSS

Dikarenakan hasil uji anova menunjukkan perngaruh yang signifikan antar perlakuan maka analisis dilanjutkan dengan uji Duncan untuk melihat letak perbedaan antar perlakuan. Hasil uji duncan disajikan pada Tabel 13.

Tabel 12. Uji Duncan TSS

Perlakuan	Rata-rata TSS (mg/l)	Notasi
P4 (1:4)	74,33	a
P2 (3:2)	82,33	ab
P3 (2:3)	99,33	bc
P1 (4:1)	104,67	c

Keterangan: Angka yang diikuti oleh huruf (notasi) yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada uji Duncan taraf 5%.

Berdasarkan uji Duncan, perlakuan P4 (1:4) berada pada notasi a, P2 (3:2) pada notasi ab, P3 (2:3) pada notasi bc, dan P1 (4:1) pada notasi c. Adanya notasi yang saling beririsan menunjukkan bahwa P4 tidak berbeda nyata dengan P2, demikian pula P2 tidak berbeda nyata dengan P3, dan P3 tidak berbeda nyata dengan P1. Akan tetapi, perlakuan P4 berbeda nyata dengan P3 dan P1, sedangkan P1 berbeda nyata dengan P4 dan P2. Hal ini menegaskan bahwa perlakuan dengan proporsi zeolit tertinggi (P4) merupakan perlakuan terbaik dalam menurunkan TSS,

dengan nilai rata-rata terendah sebesar 74,33 mg/l, sedangkan perlakuan dengan proporsi arang aktif paling dominan (P1) menghasilkan TSS tertinggi.

Selisih dan Efektivitas Penurunan Mutu Air

Untuk menilai efektivitas proses adsorpsi secara lebih jelas, dihitung selisih (Δ) nilai parameter mutu air sebelum dan sesudah perlakuan. Nilai negatif menandakan terjadinya penurunan parameter setelah perlakuan, sedangkan nilai positif menandakan peningkatan. Selisih rata-rata mutu air disajikan pada Tabel 15, sementara persentase efektivitas penurunannya disajikan pada Tabel 16.

Tabel 14. Selisih (Δ) Rata-rata Mutu Air Sebelum dan Sesudah Perlakuan

Perlakuan	pH	COD (mg/l)	BOD (mg/l)	TSS (mg/l)
Air Baku	6,18	399,8	171,7	262
P1 (4:1)	+1,06	-175,73	-92,67	-157,33
P2 (3:2)	+0,98	-220,13	-99,23	-179,67
P3 (2:3)	+1,08	-233,07	-103,30	-162,67
P4 (1:4)	+1,28	-246,87	-112,13	-187,67

Tabel 15. Efektivitas Penurunan Mutu Air (%)

Perlakuan	Penurunan COD (%)	Penurunan BOD (%)	Penurunan TSS (%)
P1 (4:1)	43,96	53,97	60,05
P2 (3:2)	55,06	57,79	68,58
P3 (2:3)	58,30	60,16	62,09
P4 (1:4)	61,75	65,31	71,63

Berdasarkan Tabel 15 dan Tabel 16, seluruh perlakuan menunjukkan penurunan pada parameter COD, BOD, dan TSS disertai kenaikan pH menuju netral. Perlakuan P4 (1:4) memberikan efektivitas penurunan tertinggi, yaitu COD sebesar 61,75%, BOD sebesar 65,31%, dan TSS sebesar 71,63%, sedangkan efektivitas terendah terdapat pada perlakuan P1 (4:1). Kecenderungan ini memperlihatkan bahwa peningkatan proporsi zeolit dalam media adsorben berbanding lurus dengan peningkatan efektivitas penurunan beban pencemar. Dalam sistem adsorben yang diteliti, zeolit berperan dominan dalam proses penjerapan bahan organik (COD dan BOD) maupun penyaringan padatan tersuspensi (TSS), berkat struktur kristalin berpori dan kapasitas tukar kationnya yang tinggi, sementara arang aktif daun sawit berperan sebagai komponen pelengkap. Dengan demikian, ditinjau dari keseluruhan parameter yang diamati, perlakuan P4 dengan perbandingan arang aktif daun sawit dan zeolit sebesar 1:4 (proporsi zeolit tertinggi) merupakan perlakuan terbaik dalam memperbaiki mutu air limbah pada kolam akhir (*final pond*) dan telah memenuhi seluruh baku mutu yang dipersyaratkan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Adsorben berhasil dibuat dari campuran arang aktif daun kelapa sawit yang diaktivasi secara kimia menggunakan HCl dan NaOH dengan zeolit. Hasil penelitian membuktikan bahwa

campuran kedua bahan tersebut berpotensi dan dapat digunakan sebagai adsorben untuk memperbaiki kualitas LCPKS pada air limbah kolam akhir (*final pond*) pabrik kelapa sawit.

2. Perbedaan perbandingan komposisi adsorben berpengaruh terhadap perubahan mutu air limbah. Hasil uji *One Way Anova* menunjukkan bahwa variasi komposisi berpengaruh signifikan terhadap parameter pH (sig. 0,030), COD (sig. 0,015), dan TSS (sig. 0,015), tetapi tidak berpengaruh signifikan terhadap BOD (sig. 0,124). Perlakuan terbaik dalam menurunkan beban pencemar adalah P4 dengan perbandingan arang aktif daun sawit dan zeolit sebesar 1:4 (proporsi zeolit paling tinggi), dengan nilai rata-rata pH 7,46; COD 152,93 mg/l; BOD 59,57 mg/l; dan TSS 74,33 mg/l. Efektivitas penurunan pada perlakuan ini mencapai 61,75% untuk COD, 65,31% untuk BOD, dan 71,63% untuk TSS. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi proporsi zeolit dalam media adsorben, semakin baik kemampuannya dalam menurunkan polutan.
3. Seluruh perlakuan telah mampu menghasilkan mutu air yang memenuhi baku mutu air limbah bagi usaha dan/atau kegiatan industri minyak sawit berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014, yaitu pH pada rentang 6–9, COD di bawah 350 mg/l, BOD di bawah 100 mg/l, dan TSS di bawah 250 mg/l. Dengan demikian, adsorben berbahan arang aktif daun sawit dan zeolit dapat dimanfaatkan sebagai alternatif pengolahan lanjutan untuk memperbaiki kualitas air limbah pada kolam akhir sebelum dibuang ke lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmad, A., Bahruddin, & Rahmi, A. (2011). Penyisihan Kandungan Padatan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit dengan Bioreaktor Hibrid Anaerob Bermedia Cangkang Sawit. *UPN (Universitas Pembangunan Nasional) Veteran Yogyakarta: Institutional Repository*, 1–8. https://doi.org/10.33795/distilat.v8i4.450

Air, K., & Bagong, S. (2025). Identifikasi Tingkat Biological Oxygen Demand (BOD) Sebagai Indikator Kualitas Air Di Hulu Dan Hilir Sungai Sungai Kali Bagong Merupakan Salah Satu Sungai Yang Terletak Di Kabupaten Banyuwangi , Jawa Timur . Sungai Kali Bagong Mengalir Di Bagian Selatan. *8*(3), 438–446. https://doi.org/10.33795/distilat.v8i4.450

Al Muttaqii, M., Birawidha, D. C., Isnugroho, K., Yamin, M., Hendronursito, Y., Istiqomah, A. D., & Dewangga, D. P. (2019). Pengaruh Aktivasi secara Kimia menggunakan Larutan Asam dan Basa terhadap Karakteristik Zeolit Alam. *Jurnal Riset Teknologi Industri*, *13*(2), 266. https://doi.org/10.26578/jrti.v13i2.5577

Ali, R. M., Hendrawati, T. Y., Ismiyati, & Fithriyah, N. H. (2020). Pengaruh Jenis Adsorben terhadap Efektifitas Penrunan Kadar Timbal Limbah Cair Recycle Aki Bekas. *Jurnal Teknologi Universitas Muhammadiyah Jakarta*, *12*(1), 87–92.

Andika, B., Wahyuningsih, P., & Fajri, R. (2020). Penentuan Nilai BOD dan COD Sebagai Parameter Pencemaran Air dan Baku Mutu Air Limbah di Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS) Medan. *Quimica: Jurnal Kimia Sains Dan Terapan*, *2*(1), 14–22. https://doi.org/10.26578/jrti.v13i2.5577

Apriyanto, M., & Melisa. (2020). "Pengolahan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit (Studi Kasus Pada Pt. Tri Bakti Sarimas Pks 2 Ibul, Riau) Mahasiswa Teknologi Pangan Universitas Islam Indragiri. *Jurnal Teknologi Pertanian*, *9*(2), 86–93. https://doi.org/10.33795/distilat.v8i4.450

Daryono, E. D., & Mustiadi, L. (2018). Ekstraksi Senyawa Fenol dari Asap Cair Pelepah Kelapa

Sawit. *Jurnal Teknik Kimia USU*, *7*(2), 28–32. https://doi.org/10.26578/jrti.v13i2.5577

Dewi, S. S., & Lamona, A. (2025). Pengaruh limbah cair kelapa sawit terhadap kesehatan lingkungan di pt incasi raya group. *Jurnal Kesehatan Lentera'Aisyiyah*, *8*(1), 30–37. https://doi.org/10.33795/distilat.v8i4.450

Fachria, R., Ramdan, H., & Aryantha, I. N. P. (2020). Efektivitas pengolahan limbah cair industri penyamakan kulit Sukaregang Garut dengan adsorben karbon aktif dan ijuk. *Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan*, 3(3), 379–388.

Ilmanafia, A., & Sudarminto, H. P. (2023). Pemanfaatan Adsorben Arang Aktif Bonggol Jagung Untuk Penurunan Bod Dan Cod Pada Limbah Cair Pengolahan Rumput Laut. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, *8*(4), 909–913. https://doi.org/10.33795/distilat.v8i4.450

As Ilham, M Masri, &R Rosmah. (2025). Analisis Kadar Biochemical Oxygen Demand (BOD) Pada Sampel Air Sungai. *6*. https://doi.org/10.35308/jmkn.v11i1.12066 https://doi.org/10.33795/distilat.v8i4.450

Kurniasari, L., Djaeni, M., & Purbasari, A. (2011). Prospek Aplikasi Produk Berbasis Zeolit untuk Slow Release Substances (SRS) dan Membran. *Artikel Badan Pengkajian Dan Penerapan Teknologi Indonesia*, *ISSN*, *13*(3), 178–184. https://doi.org/10.33795/distilat.v8i4.450

Mahaddilla, F. M., & Putra, A. (2013). Pemanfaatan Batu Apung sebagai Sumber Silika dalam Pembuatan Zeolit Sintetis. *Jurnal Fisika Unand*, *2*(4), 262–268. https://doi.org/10.35308/jmkn.v11i1.12066

Munandar, A., Muhammad, S., & Mulyati, S. (2016). Penyisihan COD dari Limbah Cair Pabrik Minyak Kelapa Sawit menggunakan Nano Karbon Aktif. *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, 11(1), 24–31.

Nego Purba, A., Hutabarat, E. T., & Pasaribu, M. H. (2024). Pengaruh aktivasi NaOH dan HCl pada arang aktif buah bintaro (cerbera manghas) terhadap kapasitas adsorpsi zat warna metil jingga. *Universitas Terbuka*, *1*(2), 1154–1161.

Nining Widarti, B., Hadi Susetyo, S., & Sarwono, E. (2015). Degradasi Cod Limbah Cair Dari Pabrik Kelapa Sawit Dalam Proses Pembentukan Biogas. *Jurnal Integrasi Proses*, *5*(3), 138–141. https://doi.org/10.33795/distilat.v8i4.450

Oktavia, L., Widiyanti, A., Nasihuddin, M. I. B., & Yatim, A. (2019). Uji Efektifitas Pencemar Bod Pada Air Limbah Pencucian Ikan Menggunakan Rapid Sand Filter Di Pasar Ikan Sidoarjo. *E-Prosiding SNasTekS*, *1*(1), 439–446. https://doi.org/10.35308/jmkn.v11i1.12066

Paradise, M., Nursanto, E., & Nurkhamim, . (2022). Claystone, Zeolit, dan Arang Aktif Tempurung Kelapa Sebagai Komposit Untuk Menyerap Logam Fe dan Mn dari Air Asam Tambang Batubara. *Jurnal Mineral, Energi, Dan Lingkungan*, *5*(2), 16. https://doi.org/10.31315/jmel.v5i2.4672

AD Syahrial. (2015). Jurnal rona teknik pertanian issn : 2085-2614. *Jurnal Rona Teknik Pertanian*, *8*(2), 62–75. https://doi.org/10.47233/jpst.v2i2.852

Pitalokasari, O. D., & Fikri, S. (2021). Validasi Metode Pengujian Biochemical Oxygen Demand (BOD) dalam Air Laut Secara Titrimetri Berdasarkan SNI 6989 . 72 : 2009 Validation of Biochemical Oxygen Demand (BOD) of Seawater Testing Methods Using Titrimetry Based on SNI 6989 . 72 : 2009. 15(1), 63–75. https://doi.org/10.33795/distilat.v8i4.450

Pramita, A., & Cilacap, P. N. (2019). Penurunan Biochemical Oxygen Demand (Bod) Dan Total Suspended Solids (Tss) Pada Pengolahan Limbah Cair Domestik Dengan. *5*(1), 3–10. https://doi.org/10.47233/jpst.v2i2.852

Rahmat, M. F., & Kushadiwijayanto, A. A. (2023). Distribusi Total Suspended Solid (TSS) di PPN Pemangkat Kabupaten Sambas , Kalimantan Barat Distribution of Total Suspended Solid (TSS) in PPN Pemangkat Sambas Regency , West Kalimantan. 6(2), 71–84. https://doi.org/10.47233/jpst.v2i2.852

Rios, J. Y., Bimantio, M. P., & Ruswanto, A. (2024). Pemanfaatan Arang Aktif Berbahan Pelepah Kelapa Sawit sebagai Adsorben Pemurnian Biodiesel dari Minyak Curah. *BIOFOODTECH : Journal of Bioenergy and Food Technology*, *3*(1), 29–46. https://doi.org/10.55180/biofoodtech.v3i1.803

Rizali, A., Fachrianto, F., Ansari, M. H., & Wahdi, A. (2018). Pemanfaatan limbah pelepah dan daun kelapa sawit melalui fermentasi trichoderma sp. sebagai pakan sapi potong. *EnviroScienteae*, *14*(1), 1. https://doi.org/10.20527/es.v14i1.4886

Saputra, K. D., Dharmawati, N. D., Renjani, R. A., Pertanian, J. T., Pertanian, F. T., & Aplikasi, L. (n.d.). *Monitoring Sistem Sirkulasi Pengolahan Limbah Cair*. *XX*. https://doi.org/10.20527/jukung.v10i2.20681

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 Reducing BOD , TSS , oil and greace in palm oil mill effluent by using perforated plate aeration process. *27*(2), 38–45. https://doi.org/10.55180/biofoodtech.v3i1.803

Stephanie, H., Tinaprilla, N., & Rifin, D. A. (2018). Efesiensi Pabrik Kelapa Sawit Indonesia. *Jurnal Agribisnis Indonesia*, *6*(1), 27–36. https://doi.org/10.47233/jpst.v2i2.852

Suryani, F., Firdausi Homsah, O., & Basuki, M. (2018). Analisis pH dan Pengadukan Terhadap Produksi Biogas dari Limbah Cair Kelapa Sawit pH and Agitation Analisys of Biogas Production from Palm Oil Mill Effluent (POME). *Jurnal Riset Sains Dan Teknologi*, *2*(1), 1–7. https://doi.org/10.30595/JRST

Thabrani, M. R., & Permadi, D. A. (2024). Uji Efektivitas Pemanfaatan Serbuk Biji Kelor Sebagai Alternatif Koagulan Dalam Menurunkan Cod, Bod, Dan Tss Pada Air Limbah Laundry. *Jukung (Jurnal Teknik Lingkungan)*, *10*(2), 10540–10549. https://doi.org/10.20527/jukung.v10i2.20681

Trisakti, B., Vincent, M., Tandean, Y., Kimia, D. T., Teknik, F., Utara, U. S., & Microorganism, E. (2012). Menggunakan effective microorganism guna mengurangi nilai tss. 1(2), 27–30. https://doi.org/10.35308/jmkn.v11i1.12066

Trisnadewi, N. W., Dharma Putra, K. G., & Simpen, I. N. (2017). Pemanfaatan Zeolit Alam Teraktivasi sebagai Adsorben untuk Menurunkan BOD dan COD pada Limbah Cair Industri Tahu. *Jurnal Kimia (Journal of Chemistry)*, 11(2), 157–161. https://doi.org/10.47233/jpst.v2i2.852 https://doi.org/10.35308/jmkn.v11i1.12066

Winardi, R. R., & Prasetyo, H. (2025). Aktivasi Bioadsorben Pelepah Sawit untuk Memperbaiki Kualitas Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit. *Factory Jurnal Industri, Manajemen Dan Rekayasa Sistem Industri*, *3*(3), 114–119. https://doi.org/10.56211/factory.v3i3.893

Yoeliarniza, A., Khairina, K., Firdus, F., Nasir, M., & Rizki, A. (2025). Literatur Review: Studi Kasus Pencemaran Industri Kelapa Sawit di Indonesia. *Jurnal Mekanova : Mekanikal, Inovasi Dan Teknologi*, *11*(1), 139. https://doi.org/10.35308/jmkn.v11i1.12066

Yustika, D., . H. S., . M. O. T., . W. F., & . Y. S. (2023). Penentuan nilai cod sebagai parameter pencemaran air dan baku mutu air limbah fasilitas pelayanan kesehatan rumah sakit putri bidadari langkat. *Jurnal Pendidikan, Sains Dan Teknologi*, *2*(2), 346–348. https://doi.org/10.47233/jpst.v2i2.852