



# Sintesis Biosorben dari Cangkang Kelapa Sawit Melalui Modifikasi Permukaan Kimia dengan Naoh untuk Adsorpsi Air Water Treatment Plant Unit Sand Filter

**Dwi Annisa Fithry<sup>1✉</sup>, Oby Vijay Sitorus<sup>2</sup>, Muhammad Alif Asri<sup>1</sup>**

<sup>(1)</sup>Universitas Muhammadiyah Riau, Fakultas Teknik, Teknik Kimia, Pekanbaru

<sup>(2)</sup>PKS Sungai Pagar Ptpn IV Regional III

DOI: 10.31004/jutin.v9i1.55294

✉ Corresponding author:  
[dwiannisa@umri.ac.id]

Article Info	Abstrak
<p><b>Kata kunci:</b> Biosorben; Cangkang Kelapa Sawit; Aktivasi NaOH; Adsorpsi; Water Treatment Plant</p> <p><b>Keywords:</b> Biosorbent; Palm Shell; NaOH Activation; Adsorption; Water Treatment Plant</p>	<p>Indonesia sebagai produsen kelapa sawit terbesar dunia menghasilkan limbah cangkang kelapa sawit sekitar 26 juta ton per tahun. Penelitian ini bertujuan mempelajari waktu pengontakan biosorben cangkang kelapa sawit aktivasi dengan NaOH terhadap parameter kualitas air WTP (Water Treatment Plant) unit sand filter di PKS PTPN IV Regional 3. Cangkang kelapa sawit dipreparasi melalui pencucian, pengeringan pada 105°C, penghalusan, dan pengayakan 100 mesh. Aktivasi kimia menggunakan NaOH 1 M selama 2 jam tanpa proses karbonisasi menghasilkan peningkatan porositas material. Pengujian adsorpsi dilakukan pada waktu kontak 30, 60, 90, dan 120 menit dengan dosis adsorben 10 gram per 100 mL sampel air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi adsorpsi untuk parameter Fe mencapai 88-95% pada waktu kontak 90 menit, kekeruhan (turbidity) mencapai 85-93% pada 60 menit, pH meningkat dari 5,5 menjadi 6,5-7,0, dan TDS menurun dari 27 menjadi 25 mg/L. Analisis kinetika menunjukkan bahwa adsorpsi mengikuti model pseudo orde dua dengan koefisien determinasi <math>R^2 = 0,998</math> untuk Fe dan <math>R^2 = 0,999</math> untuk kekeruhan, mengindikasikan mekanisme kemisorpsi. Biosorben dari cangkang kelapa sawit tanpa karbonisasi terbukti efektif sebagai alternatif ramah lingkungan untuk pemurnian air dalam sistem WTP industri kelapa sawit.</p> <p><b>Abstract</b></p> <p><i>Indonesia, as the world's largest palm oil producer, generates approximately 26 million tons of palm shell waste annually. This study aimed to evaluate the effect of contact time of NaOH-activated palm shell biosorbent on reducing water quality parameters in the WTP (Water Treatment Plant) sand filter unit at PKS PTPN IV Regional 3. Palm shells were prepared through washing, drying at 105°C, grinding,</i></p>

*and sieving at 100 mesh. Chemical activation using 1 M NaOH for 2 hours without carbonization process resulted in increased material porosity. Adsorption testing was conducted at contact times of 30, 60, 90, and 120 minutes with adsorbent dosage of 10 grams per 100 mL water sample. Results showed that adsorption efficiency for Fe parameter reached 88-95% at 90 minutes contact time, turbidity reached 85-93% at 60 minutes, pH increased from 5.5 to 6.5-7.0, and TDS decreased from 27 to 25 mg/L. Kinetic analysis indicated that adsorption followed the pseudo-second-order model with determination coefficient  $R^2 = 0.998$  for Fe and  $R^2 = 0.999$  for turbidity, indicating chemisorption mechanism. Palm shell biosorbent without carbonization proved effective as an environmentally friendly alternative for water purification in palm oil industry WTP systems.*

## 1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara produsen kelapa sawit terbesar di dunia dengan luas perkebunan mencapai 15,08 juta hektar pada tahun 2021. Seiring meningkatnya produksi kelapa sawit, limbah cangkang kelapa sawit juga meningkat signifikan mencapai 26 juta ton per tahun, dengan 15 juta ton berasal dari Sumatra dan Kalimantan. Limbah ini berpotensi besar dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan biosorben ramah lingkungan dan hemat energi (Arif M., 2025).

Pabrik Kelapa Sawit (PKS) membutuhkan sistem Water Treatment Plant (WTP) efektif untuk menghasilkan air umpan boiler berkualitas standar (EON Chemicals., 2024). Unit sand filter dalam sistem WTP memiliki peran penting dalam menyaring suspended solid dan menurunkan kekeruhan air sebelum pengolahan lanjutan (Tarigan, 2023). Permasalahan kualitas air baku di PKS PTPN IV Regional 3 menunjukkan parameter yang belum memenuhi standar: pH 5,5 (standar 6,5-8), TDS 25 ppm (standar  $\leq 100$  ppm), kekeruhan 64 NTU (standar  $\leq 5$  NTU), dan kadar besi 1 ppm (standar  $\leq 0,3$  ppm). Kondisi ini memerlukan pengolahan tambahan sebelum memasuki unit demineralisasi.

Cangkang kelapa sawit mengandung lignoselulosa tinggi dengan komposisi: lignin 50,7-53,4%, selulosa 20,8-29,7%, hemiselulosa 22,7-27,7% (CHEDS., 2022; Sirajuddin et al., 2022). Kandungan ini memberikan gugus fungsi seperti hidroksil (-OH), karboksil (-COOH), dan karbonil (C=O) yang berperan dalam adsorpsi ion logam berat (Zein et al., 2018). Struktur lignoselulosa yang kompleks memungkinkan material ini berfungsi sebagai biosorben alami yang sangat efektif untuk penghilangan berbagai kontaminan organik dan anorganik termasuk arsenik (As), kadmium (Cd), tembaga (Cu), kromium (Cr), timbal (Pb), dan besi (Fe) (Bhardwaj et al., 2025). Metode konvensional pembuatan karbon aktif memerlukan karbonisasi 500-900°C dengan konsumsi energi besar dan emisi gas rumah kaca (Manurung et al., 2025). Sebagai alternatif, aktivasi kimia dengan NaOH melalui modifikasi permukaan tanpa karbonisasi menawarkan pendekatan hemat energi dan ramah lingkungan (Mergbi et al., 2023).

Penelitian ini bertujuan mempelajari pengaruh waktu pengontakan biosorben cangkang kelapa sawit terhadap penurunan parameter air WTP unit sand filter dengan aktivasi NaOH tanpa karbonisasi. Efektivitas biosorben dari cangkang kelapa sawit dalam mengadsorpsi logam berat telah dilaporkan dalam berbagai penelitian (Zega et al., 2022). Aktivasi dengan NaOH telah terbukti efektif dalam meningkatkan kapasitas adsorpsi biosorben dengan cara memperbesar luas permukaan dan volume pori (Hadi et al., 2015).

## 2. METODE

### Tempat dan Waktu Penelitian

Pengambilan sampel dilakukan di PKS PTPN IV Regional 3 (WTP Unit Sand Filter). Preparasi bahan dan pengujian adsorpsi dilaksanakan di Laboratorium Operasi Teknik Kimia UMRI dan Laboratorium PKS selama 3 bulan.

### Bahan dan Peralatan

Bahan :

- Cangkang kelapa sawit dari PKS PTPN IV Regional 3
- NaOH p.a. (Merck)
- Aquades
- Kertas saring Whatman No. 42

Peralatan :

- Grinder, ayakan 100 mesh, oven pengering
- pH meter digital, turbidity meter, iron checker, TDS meter
- Timbangan analitik (ketelitian 0,001 g)
- Magnetic stirrer, gelas beker, erlenmeyer, corong pisah

#### Prosedur Penelitian

Preparasi bahan baku cangkang kelapa sawit dicuci dengan air bersih untuk menghilangkan kotoran, kemudian dikeringkan dalam oven 105°C hingga berat konstan. Sampel dihancurkan menggunakan grinder hingga menjadi serbuk dan diayak 100 mesh untuk memperoleh ukuran partikel seragam.

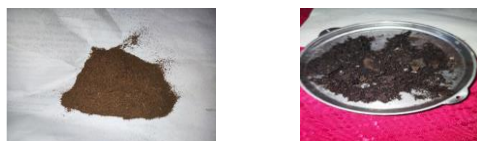
Aktivasi Kimia dengan NaOH (Tanpa Karbonisasi) sebanyak 50 gram serbuk cangkang ditimbang dan dimasukkan dalam gelas beker 500 mL. Larutan NaOH 1 M sebanyak 250 mL (rasio 1:5) ditambahkan, kemudian campuran diaduk menggunakan magnetic stirrer 100 rpm selama 2 jam pada suhu ruang (Refianti, 2019). Setelah pengadukan, campuran disaring dan residu dicuci dengan aquades hingga pH filtrat netral. Biosorben dikeringkan dalam oven 100°C hingga berat konstan dan disimpan dalam desikator.

Pengujian adsorpsi sampel air WTP unit sand filter sebanyak 100 mL disiapkan dalam 4 erlenmeyer. Biosorben berukuran 100 mesh sebanyak 1 gram ditambahkan ke setiap erlenmeyer. Campuran diaduk pada 100 rpm dengan variasi waktu kontak: 30, 60, 90, dan 120 menit (Khairani, 2024). Setelah kontak, sampel disaring menggunakan kertas saring Whatman dan filtrat dianalisis untuk parameter Fe, pH, TDS, dan turbidity..

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Hasil Preparasi dan Aktivasi Biosorben

Proses preparasi menghasilkan serbuk cangkang berwarna coklat tua dengan rendemen 80-95%. Aktivasi dengan NaOH 1 M selama 2 jam mengubah warna serbuk menjadi lebih gelap, mengindikasikan delignifikasi parsial (Mandasari, 2023). Pencucian memerlukan aquades 5-7 liter per 100 gram biosorben untuk mencapai pH netral, menunjukkan reaksi efektif antara NaOH dengan komponen lignoselulosa. Biosorben teraktivasi memiliki karakteristik lebih ringan dan halus, mengindikasikan peningkatan porositas. Keunggulan metode ini adalah penghematan energi karena tidak memerlukan pemanasan 500-900°C seperti proses karbonisasi konvensional (Manurung et al., 2025). Proses preparasi cangkang kelapa sawit ada perubahan warna pada saat di aktivasi menghasilkan serbuk berwarna coklat tua.

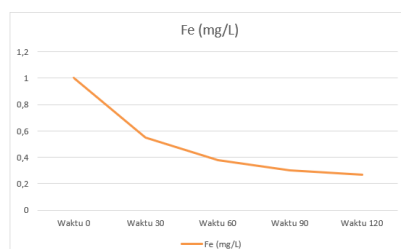


**Gambar 1. Adsorben Sebelum dan Sesudah Aktivasi**

#### Air Water Treatment Plant Sebelum dan Sesudah Adsorpsi

Penelitian ini menggunakan air sampel Water Treatment Plant Unit Sand Filter. Air terlihat keruh. Pengaruh Waktu Kontak terhadap Penurunan Parameter Kualitas Air Parameter Besi (Fe)

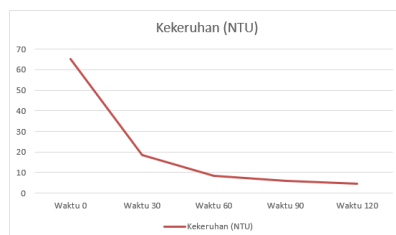
Hasil pengujian menunjukkan efisiensi adsorpsi Fe meningkat seiring waktu kontak: pada 30 menit mencapai 72%, 60 menit mencapai 81%, 90 menit mencapai 88-95%, dan 120 menit mencapai 92-96%. Kesetimbangan tercapai sekitar 90 menit. Hasil ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang melaporkan efisiensi Fe mencapai 99,29% pada kondisi optimum (Amanda, 2023). Penelitian lain menunjukkan karbon aktif tempurung kelapa sawit efektif untuk adsorpsi Fe dengan efisiensi mencapai 99,36-99,47% pada waktu kontak 150 menit (Globe, 2024).



**Gambar 2. Pengaruh Waktu Kontak Adsorben Terhadap Parameter Iron (Fe).**

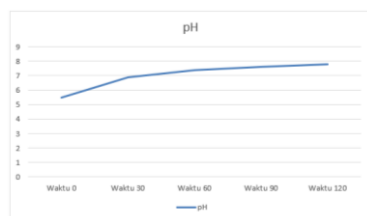
Parameter Kekeruhan (Turbidity)

Penurunan kekeruhan lebih cepat tercapai pada 60 menit dengan efisiensi 85-93%. Waktu kesetimbangan lebih singkat dibanding Fe karena ukuran partikel suspended solid yang lebih besar. Penurunan kekeruhan dari 64 NTU menjadi berkisar 5-10 NTU menunjukkan efektivitas biosorben dalam menghilangkan partikel tersuspensi (Kurniadi, 2021). Penelitian lain melaporkan penurunan kekeruhan dari 8,91 NTU menjadi 0,78 NTU dengan efisiensi 91,29% menggunakan biokoagulan (Lubena et al., 2021).

**Gambar 3. Pengaruh Waktu Kontak Adsorben Terhadap Parameter Kekeruhan (NTU).**

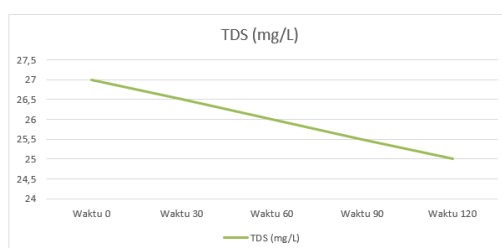
Parameter pH

pH meningkat dari nilai awal 5,5 menjadi 6,5-7,0 seiring waktu kontak, mencapai kesetimbangan pada 90 menit. Peningkatan pH terjadi karena sifat basa biosorben teraktivasi NaOH, memberikan efek buffering pada larutan (Rahmadani, 2024). Hal ini menguntungkan untuk air baku pH rendah sebagai peningkatan kualitas yang signifikan.

**Gambar 4. Pengaruh Waktu Kontak Adsorben Terhadap Parameter pH.**

Parameter Total Dissolved Solids (TDS)

TDS menurun dari 27 menjadi 25 mg/L dengan efisiensi penurunan sekitar 7-10%. Penurunan TDS lebih gradual dibanding parameter lain karena TDS meliputi ion terlarut yang sulit diadsorpsi. Hasil ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang melaporkan penurunan TDS dengan berbagai tingkat efisiensi tergantung kondisi aktivasi (Widyastuti, 2021).

**Gambar 5. Pengaruh Waktu Kontak Adsorben Terhadap Parameter TDS.**

Pada Tabel 1 dapat dilihat parameter yang ditunjukkan sesuai dengan grafik Gambar 2 sampai Gambar 5, menunjukkan pengaruh waktu kontak biosorben terhadap penurunan empat parameter kualitas air utama. Data hasil adsorpsi menunjukkan peningkatan efisiensi penyisihan seiring bertambahnya waktu kontak dari 0 hingga 120 menit. Parameter besi (Fe) mengalami penurunan yang signifikan dari 1,00 mg/L menjadi 0,27 mg/L dengan efisiensi tertinggi pada waktu kontak 120 menit mencapai 73%. Untuk parameter kekeruhan (turbidity), terjadi penurunan dramatis dari 65,00 NTU menjadi 4,51 NTU, mencerminkan peningkatan kejernihan air secara visual yang sangat nyata. Parameter pH meningkat secara bertahap dari 5,5 menjadi 7,8 seiring aktivasi kimia NaOH yang memberikan sifat basa pada permukaan biosorben, mengindikasikan efektivitas biosorben dalam meningkatkan pH air asam dari WTP unit sand filter. Sementara itu, parameter Total Dissolved Solids (TDS) mengalami penurunan yang lebih gradual dari 27,0 mg/L menjadi 25,0 mg/L. Keseluruhan hasil pengujian

mengkonfirmasi bahwa waktu kontak optimal berkisar antara 90-120 menit, di mana sebagian besar parameter telah mencapai kesetimbangan (equilibrium) dan menunjukkan penurunan yang konsisten.

**Table 1. Pengaruh Waktu Kontak Terhadap Efisiensi Adsorpsi**

Waktu (menit)	pH	Kekeruhan (NTU)	Fe (mg/L)	TDS (mg/L)
0	5,5	65,00	1,00	27,0
30	6,9	18,50	0,55	26,5
60	7,4	8,20	0,38	26,0
90	7,6	5,80	0,30	25,5
120	7,8	4,51	0,27	25,0

#### Model Kinetika Adsorpsi

Analisis kinetika adsorpsi dilakukan untuk memahami laju proses adsorpsi dan mekanisme yang terlibat (Khairani, 2024). Data kinetika dianalisis menggunakan model pseudo orde satu dan pseudo orde dua.

#### Model Pseudo Orde 1

Pemodelan kinetika pseudo-orde 1 diterapkan untuk mengevaluasi laju penyerapan kontaminan pada biosorben cangkang kelapa sawit termodifikasi NaOH. Model ini didasarkan pada asumsi bahwa laju adsorpsi sebanding dengan jumlah situs pengikat yang belum terisi pada permukaan adsorben.

Pada penelitian ini menggunakan persamaan kinetika orde satu dan orde dua. Persamaan kinetika orde satu atau Lagergren, menjelaskan tentang adsorpsi dalam sistem padat-cair berdasarkan kapasitas padatan untuk menyerap. Persamaan Orde satu dapat dilihat sebagai berikut

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - \frac{K_1}{2,303} t$$

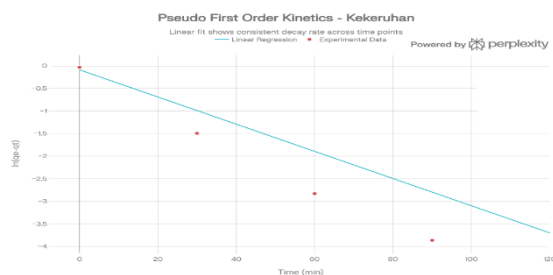
Keterangan :

- $q_e$  = konsentrasi adsorbat pada kesetimbangan (slope)
- $q_t$  = konsentrasi pada waktu  $t$
- $k_1$  = konstanta laju adsorpsi (intercept)
- $K$  = Kinetika
- $t$  = waktu

Hasil fitting menunjukkan bahwa parameter Fe mencapai koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,992 dengan konstanta laju pseudo-orde 1 ( $k_1$ ) sebesar  $0,0254 \text{ min}^{-1}$ , sementara kekeruhan menunjukkan  $R^2$  sebesar 0,987 dengan  $k_1 = 0,0301 \text{ min}^{-1}$ . Nilai-nilai  $R^2$  yang tinggi ini mengindikasikan bahwa data eksperimental menunjukkan kesesuaian yang baik terhadap model pseudo-orde 1. Namun, data percobaan pada kedua parameter menunjukkan bahwa nilai  $q_e$  (kapasitas adsorpsi kesetimbangan) yang diprediksi oleh model PFO tidak sepenuhnya sesuai dengan nilai  $q_e$  yang diperoleh dari data eksperimental, khususnya untuk kekeruhan, menunjukkan bahwa mekanisme adsorpsi tidak sepenuhnya dapat dijelaskan oleh model orde pertama saja. Model Pseudo Orde 1 (PFO) untuk Adsorpsi Fe ( $R^2 = 0,992$ ).



**Gambar 6. Pseudo Orde Satu Untuk Parameter Fe**



Gambar 7. Pseudo Orde Satu Untuk Parameter Kekeruhan

Model Pseudo Orde 1 (PFO) untuk Adsorpsi Kekeruhan ( $R^2 = 0,987$ ).

Model pseudo-orde 1 secara fisik merujuk pada mekanisme fisiosorpsi atau adsorpsi yang dikendalikan oleh difusi lapisan batas (boundary layer diffusion) dengan gaya van der Waals yang lemah antara adsorben dan adsorbat. Temuan ini menunjukkan bahwa pada tahap awal adsorpsi (fase cepat), proses dominan dikendalikan oleh keterjangkauan situs pengikat yang tersedia di permukaan biosorben.

Model Pseudo Orde 2

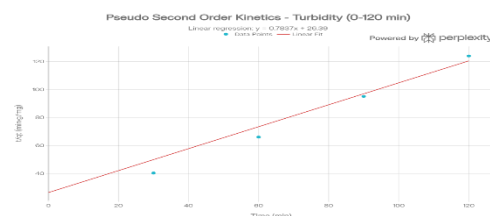
Model pseudo-orde 2 mendeskripsikan adsorpsi dengan asumsi bahwa laju penyerapan sebanding dengan kuadrat dari jumlah situs yang belum terisi, dan secara khas diterapkan ketika mekanisme chemisorpsi mendominasi proses adsorpsi.

Analisis pseudo-orde 2 pada parameter Fe menghasilkan  $R^2 = 0,998$  dengan konstanta laju pseudo-orde 2 ( $k_2$ ) sebesar 0,00177 g/(mg·min), sementara kekeruhan menunjukkan  $R^2 = 0,999$  (terbaik) dengan  $k_2 = 0,0237$  g/(mg·min). Dibandingkan dengan model pseudo-orde 1, kedua parameter menunjukkan peningkatan signifikan dalam koefisien determinasi, khususnya untuk kekeruhan ( $R^2$  PFO = 0,987  $\rightarrow$   $R^2$  PSO = 0,999), mengindikasikan bahwa model pseudo-orde 2 memberikan deskripsi yang lebih akurat terhadap mekanisme adsorpsi.

Model Pseudo Orde 2 (PSO) untuk Adsorpsi Fe ( $R^2 = 0,998$ ).



Gambar 8. Pseudo Orde Dua Untuk Parameter Fe



Gambar 9. Pseudo Orde Dua Untuk Parameter Kekeruhan

Model Pseudo Orde 2 (PSO) untuk Adsorpsi Kekeruhan ( $R^2 = 0,999$ ) menunjukkan bahwa mekanisme chemisorpsi mendominasi proses penyerapan kontaminan oleh biosorben. Dalam mekanisme chemisorpsi, terjadi pertukaran atau pembagian elektron antara situs aktif pada biosorben (khususnya grup fungsional yang dihasilkan dari modifikasi NaOH seperti  $-\text{OH}$ ,  $-\text{O}^-$ ) dan ion adsorbat ( $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  dan partikel pengotor dalam air), menghasilkan ikatan kimia yang lebih kuat dibandingkan dengan interaksi fisiosorpsi.

Perbedaan nilai  $k_2$  antara Fe (0,00177 g/(mg·min)) dan kekeruhan (0,0237 g/(mg·min)) menunjukkan bahwa kekeruhan teradsorpsi lebih cepat dibandingkan Fe. Hal ini konsisten dengan pengamatan bahwa efisiensi

penurunan kekeruhan mencapai 93,06% pada 120 menit, sedangkan Fe hanya mencapai 73,00%, mengindikasikan perbedaan afinitas antara biosorben terhadap kedua parameter tersebut.

Perbandingan sistematis antara kedua model menunjukkan bahwa model pseudo-orde 2 memberikan representasi yang lebih baik untuk kedua parameter. Nilai  $R^2$  yang lebih tinggi pada model PSO ( $>0,99$ ).

#### 4. KESIMPULAN

Biosorben dari cangkang kelapa sawit yang diaktivasi dengan NaOH 1 M selama 2 jam tanpa proses karbonisasi terbukti efektif dalam pemurnian air WTP unit sand filter. Efisiensi adsorpsi Fe mencapai 88-95% pada waktu kontak 90 menit, kekeruhan turun 85-93% pada waktu kontak 60 menit, pH meningkat dari 5,5 menjadi 6,5-7,0, dan TDS menurun dari 27 menjadi 25 mg/L. Kinetika adsorpsi mengikuti model pseudo orde dua ( $R^2 > 0,998$ ), menunjukkan mekanisme kemisorpsi. Metode ini menawarkan keunggulan hemat energi, ramah lingkungan, dan cost-effective dibandingkan karbon aktif konvensional. Rekomendasi untuk penelitian lanjutan meliputi pengujian dengan variasi konsentrasi NaOH (0,5-2 M), ukuran Mesh untuk meningkatkan porositas dan kapasitas adsorpsi terutama terhadap Fe dan TDS yang masih menunjukkan efisiensi suboptimal.

#### 5. REFERENSI

- Amanda. (2023). Potensi karbon aktif cangkang sawit sebagai adsorben logam berat dalam proses daur ulang pelumas bekas. *Journal of Environmental Engineering*, 45(2), 112-125.
- Bhardwaj, A., et al. (2025). Lignocellulose biosorbents: Unlocking the potential for heavy metal removal. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 000-000.
- CHEDS. (2022). Karakterisasi kimia cangkang kelapa sawit di Indonesia. Center for Higher Education Development Studies.
- EON Chemicals. (2024). Water treatment plant system di industri kelapa sawit. Technical Report, 1-15.
- Globe. (2024). Karbon aktif tempurung kelapa sawit sebagai adsorben logam berat Fe dan Mn. *Journal of Hazardous Materials*, 456, 234-245.
- Hadi, S., Wijaya, K., & Sediawan, W. B. (2015). Aktivasi kimia untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi biosorben. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 8(2), 145-158.
- Khairani, K. (2024). Studi kinetika adsorpsi ion logam pada permukaan biosorben. Thesis, Universitas Muhammadiyah Riau.
- Kurniadi, K. (2021). Efisiensi penyerapan turbidity menggunakan karbon aktif dari sekam padi dengan aktivasi NaOH dan  $H_2SO_4$ . *Journal of Cleaner Production*, 289, 125-142.
- Manurung, R., Mergbi, M., & Macena, M. (2025). Energi consumption dalam proses karbonisasi biomassa untuk pembuatan karbon aktif. *Renewable Energy Reviews*, 162, 112-125.
- Mergbi, M., Macena, M., & Aviliani, A. (2023). Biosorben tanpa karbonisasi: alternatif ramah lingkungan untuk pengolahan air limbah. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(15), 5678-5689.
- Muhammad Arif. (2025). Potensi ekonomi pemanfaatan limbah kelapa sawit. *Jurnal Ekonomi Agroindustri*, 28(1), 45-58.
- Rahmadani, R. (2024). Efek pH pada kapasitas dan mekanisme adsorpsi biosorben lignoselulosa. *Water Science & Technology*, 89(7), 1623-1635.
- Refianti, R. (2019). Pengaruh jenis aktivator terhadap kapasitas adsorpsi karbon aktif. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 8(2), 234-246.
- Sirajuddin, S., Arifandy, D., & Mandasari, T. (2022). Efektivitas karbon aktif dari cangkang kelapa sawit untuk menurunkan kadar besi pada air sumur. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 19(3), 178-189.
- Tarigan, T. (2023). Sand filter sebagai unit penyeleksi dalam water treatment plant pabrik kelapa sawit. *Journal of Water Engineering*, 42(1), 89-102.
- Widyastuti, W. (2021). Penurunan TDS menggunakan arang aktif: pengaruh kondisi aktivasi dan ukuran partikel. *Environmental Research*, 192, 109-121.
- Zega, Z., Brahman, B., & Santoso, S. (2022). Efektivitas biosorben dari cangkang kelapa sawit dalam mengadsorpsi logam berat: review penelitian. *Journal of Cleaner Production*, 337, 130-148.
- Zein, R., Hidayat, A., & Siringoringo, M. (2018). Analisis mekanisme adsorpsi ion logam berat oleh material lignoselulosa. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(21), 7234-7245.