



Pemanfaatan Komposit Arang Aktif TKKS dan Cangkang Telur Sebagai Adsorben Dalam Menurunkan BOD dan COD Pada Limbah Cair Tahu

Isnaini¹, Teuku Andi Fadly¹, Fera Annis², Nirmala Sari¹, Rahmawati^{1*}, Ayu Syahputri¹, Afrahun Naziah¹

¹Prodi Fisika, Universitas Samudra, Jln. Prof. Dr. Thayeb Syarif, Kota Langsa, Aceh

²Prodi Fisika, Universitas Islam Negri Ar-Raniry, Jln. Jl. Prof. Dr. Syech Abdurrauf, Kota Banda Aceh, Aceh

* Corresponding author. E-mail: rahmawati@unsam.ac.id

ABSTRAK

Limbah cair tahu mengandung bahan organik tinggi yang berpotensi meningkatkan nilai BOD dan COD, sehingga berisiko mencemari lingkungan jika tidak diolah dengan tepat. Kebaruan penelitian ini terletak pada pemanfaatan limbah biomassa TKKS yang diaktivasi fisika menggunakan microwave dan dikombinasikan dengan cangkang telur sebagai material komposit berbasis sumber daya lokal. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas komposit arang aktif TKKS dan cangkang telur dalam menurunkan kadar BOD dan COD pada limbah cair tahu. Metode yang digunakan meliputi sintesis arang aktif melalui karbonisasi dan aktivasi kimia menggunakan KOH, preparasi cangkang telur sebagai adsorben, serta pengujian kinerja komposit dengan variasi komposisi terhadap limbah cair tahu, dilengkapi dengan karakterisasi menggunakan FTIR. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arang aktif TKKS mampu menurunkan kadar BOD dan COD secara signifikan, sedangkan penambahan cangkang telur memberikan kontribusi yang belum optimal dan memerlukan penyesuaian komposisi lebih lanjut. Analisis FTIR mengidentifikasi keberadaan gugus fungsi aktif seperti O-H, C=O, dan Ca-CO yang berperan dalam mekanisme adsorpsi. Komposit berbasis TKKS dan cangkang telur berpotensi sebagai alternatif material ramah lingkungan dalam pengolahan limbah cair tahu, meskipun optimasi formulasi masih diperlukan untuk meningkatkan kinerjanya.

INFO ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diserahkan

13 Mei 2026

Revisi pertama

8 Juni 2026

Diterima

8 Juni 2026

Tersedia secara online

19 Juni 2026

Tanggal Publikasi

19 Juni 2026

Kata Kunci:

limbah cair tahu; TKKS; cangkang telur; arang aktif; BOD; COD; gugus fungsi.

ABSTRACT

Tofu liquid waste contains high organic matter that has the potential to increase BOD and COD values, thus risking environmental pollution if not treated properly. The novelty of this research lies in the utilization of chemically activated OPEFB biomass waste combined with eggshells as a locally resource-based composite material. This study aims to evaluate the effectiveness of OPEFB activated charcoal and eggshell composites in reducing BOD and COD levels in tofu liquid waste. The methods used include activated charcoal synthesis through carbonization and chemical activation using KOH, eggshell preparation as an adsorbent, and composite performance testing with various compositions on tofu liquid waste, complemented by FTIR characterization. The results showed that OPEFB activated charcoal was able to reduce BOD and COD levels significantly, while the addition of eggshells provided a suboptimal contribution and required further composition adjustments. FTIR analysis identified the presence of active functional groups such as O–H, C=O, and Ca–CO that play a role in the adsorption mechanism. OPEFB-based composites and eggshells have the potential as an alternative environmentally friendly material in tofu liquid waste treatment, although formulation optimization is still needed to improve their performance.

ARTICLE INFO**Article History:****Submitted**

May 13, 2026

First Revised

June 8, 2026

Accepted

June 8, 2026

First Available online

June 19, 2026

Publication Date

June 19, 2026

Keyword:

tofu liquid waste; TKKS; egg shells; activated charcoal; BOD; COD; functional groups.

PENDAHULUAN

Industri tahu merupakan salah satu sektor usaha mikro dan kecil yang berkembang pesat di Indonesia karena proses produksinya relatif sederhana, biaya investasi yang rendah, serta tingginya permintaan pasar terhadap produk olahan kedelai [1]. Meskipun memberikan kontribusi ekonomi yang signifikan, aktivitas industri tahu juga menghasilkan limbah dalam jumlah besar, baik dalam bentuk padat maupun cair, yang berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan apabila tidak

dikelola secara tepat. Limbah cair tahu umumnya mengandung bahan organik terlarut dengan konsentrasi tinggi, yang tercermin dari tingginya nilai *Biological Oxygen Demand* (BOD) dan *Chemical Oxygen Demand* (COD) [2,3].

Tingginya kandungan senyawa organik dalam limbah cair tahu dapat menyebabkan penurunan kualitas air apabila dibuang langsung ke badan perairan. Nilai BOD yang tinggi menunjukkan besarnya kebutuhan oksigen oleh mikroorganisme untuk menguraikan bahan organik, sedangkan nilai COD

merepresentasikan total oksigen yang diperlukan untuk mengoksidasi seluruh senyawa organik secara kimiawi [4,5,6]. Kondisi ini dapat mengakibatkan deplesi oksigen terlarut (*dissolved oxygen*) yang berdampak negatif terhadap kelangsungan hidup biota akuatik dan keseimbangan ekosistem perairan [5,7]. Oleh karena itu, diperlukan teknologi pengolahan limbah yang efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan untuk menurunkan kadar BOD dan COD sebelum limbah dibuang ke lingkungan.

Salah satu metode yang banyak dikembangkan dalam pengolahan limbah cair adalah proses adsorpsi menggunakan arang aktif. Arang aktif merupakan material karbon amorf yang memiliki luas permukaan spesifik tinggi, struktur pori yang berkembang, serta kemampuan adsorpsi yang sangat baik terhadap berbagai kontaminan organik maupun anorganik [8,9]. Sifat-sifat tersebut menjadikan arang aktif sebagai adsorben yang efektif dalam mengurangi beban pencemar pada limbah cair. Bahan baku arang aktif dapat berasal dari limbah biomassa, salah satunya adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) [8,10].

TKKS merupakan limbah lignoselulosa yang dihasilkan dalam jumlah besar oleh industri kelapa sawit.

Pemanfaatan TKKS sebagai bahan baku arang aktif tidak hanya meningkatkan nilai tambah limbah, tetapi juga mendukung prinsip ekonomi sirkular dan pengelolaan limbah berkelanjutan [11]. Selain itu, TKKS memiliki kandungan karbon yang tinggi serta struktur serat yang mendukung pembentukan pori setelah proses aktivasi [12], sehingga potensial sebagai adsorben yang efisien [10,13].

Di sisi lain, cangkang telur juga merupakan limbah biomassa yang belum dimanfaatkan secara optimal. Cangkang telur tersusun atas sekitar 94–97% kalsium karbonat (CaCO_3), yang memiliki sifat adsorptif dan reaktif terhadap berbagai polutan [11,14,15]. Struktur mikropori pada cangkang telur memungkinkan terjadinya interaksi fisik maupun kimia dengan zat pencemar, sehingga berpotensi digunakan sebagai material adsorben alternatif [16,17]. Kombinasi antara arang aktif berbasis TKKS dan cangkang telur dalam bentuk komposit diharapkan dapat meningkatkan efisiensi adsorpsi melalui sinergi antara luas permukaan tinggi dari arang aktif dan sifat kimia CaCO_3 dari cangkang telur [14,18,19].

Penggunaan adsorben dalam bentuk komposit juga memiliki keunggulan dalam hal stabilitas mekanik, kemudahan pemisahan, serta peningkatan kapasitas

adsorpsi dibandingkan dengan penggunaan material tunggal [19,20]. Oleh karena itu, pengembangan komposit arang aktif TKKS dan cangkang telur menjadi pendekatan yang menjanjikan dalam pengolahan limbah cair industri tahu.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji efektivitas komposit arang aktif dari tandan kosong kelapa sawit dan cangkang telur sebagai adsorben dalam menurunkan kadar BOD dan COD pada limbah cair tahu.

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Sampel limbah cair tahu yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari salah satu industri tahu di Kota Langsa. Bahan utama yang digunakan meliputi tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang berasal dari pabrik kelapa sawit swasta di daerah Aceh Timur, serta cangkang telur yang dikumpulkan dari pedagang makanan. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain oven, furnace, microwave, mortar, ayakan berukuran 60 mesh, gelas beker, kertas saring, serta peralatan laboratorium pendukung lainnya.

Sintesis Komposit

Tahap awal penelitian dimulai dengan preparasi bahan baku. TKKS dicuci

menggunakan alkohol untuk menghilangkan pengotor, kemudian dikeringkan secara alami dan dilanjutkan dengan pengeringan menggunakan oven pada suhu 120 °C selama 2 jam. Selanjutnya, proses karbonisasi dilakukan menggunakan furnace pada suhu 600 °C selama 1 jam. Arang yang dihasilkan kemudian digerus dan diayak hingga diperoleh ukuran partikel seragam sebesar 60 mesh. Proses aktivasi kimia dilakukan dengan merendam 20 gram arang TKKS dalam larutan KOH 2% sebanyak 300 mL selama 24 jam. Setelah itu, sampel disaring, dicuci menggunakan akuades hingga mencapai pH netral, dan dikeringkan menggunakan microwave selama 15 menit [21].

Preparasi cangkang telur diawali dengan pencucian dan pemisahan membran bagian dalam. Sampel kemudian dikeringkan, dioven pada suhu 120 °C selama 2 jam, digerus, dan diayak sebesar 60 mesh juga hingga ukuran partikel seragam. Serbuk cangkang telur selanjutnya dicuci menggunakan akuades dan dikeringkan kembali menggunakan microwave selama 10 menit.

Komposit kemudian disintesis secara *solid state* yaitu dengan mencampurkan arang aktif TKKS dan serbuk cangkang telur menggunakan

mortar hingga homogen, kemudian diayak kembali menggunakan ayakan 60 mesh untuk memperoleh distribusi ukuran partikel yang seragam. Sebanyak 10 gram campuran digunakan sebagai komposit siap pakai dengan variasi komposisi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Persentase komposisi komposit

Nama sample	Keterangan Sampel	Arang Aktif (wt%)	Cangkang Telur (wt%)
O	Limbah cair tahu	0	0
P	arang aktif	100	0
Q	CaCO ₃	0	100
R	Komposit arang aktif/CaCO ₃	30	70
S	Komposit arang aktif/CaCO ₃	50	50
T	Komposit arang aktif/CaCO ₃	70	30

Karakterisasi Sampel

Selanjutnya dilakukan pengujian efisiensi adsorpsi terhadap limbah cair tahu dengan parameter BOD dan COD setelah waktu kontak selama 1 dan 5 hari. Proses adsorpsi dilakukan melalui metode *dip immersion*, dengan perbandingan limbah cair tahu dan komposit adalah 1:10. Karakterisasi komposit juga dilakukan menggunakan spektroskopi FTIR untuk mengidentifikasi gugus fungsi pada permukaan material. Data yang diperoleh dianalisis secara deskriptif untuk

mengevaluasi efektivitas komposit dalam menurunkan kadar BOD dan COD.

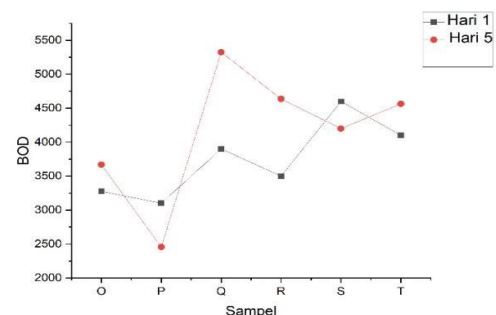
HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi BOD

Pengujian BOD merupakan parameter utama dalam mengevaluasi tingkat pencemaran limbah cair tahu, karena limbah ini umumnya mengandung senyawa organik dalam konsentrasi tinggi. Analisis BOD dilakukan dengan membandingkan kadar oksigen terlarut sebelum dan sesudah inkubasi selama lima hari pada suhu ruang.

Tabel 2. Hasil analisis BOD

No	Nama Sampel	Hari 1 (mg/L)	Hari 5 (mg/L)
1	O	3275	2527
2	P	3100	2456
3	Q	3900	3900
4	R	3500	3500
5	S	4600	4600
6	T	4100	4100



Gambar 1. Grafik nilai BOD dengan variasi waktu kontak

Hasil pengujian yang ditunjukkan pada Tabel 2 dan gambar 1, terlihat pada sampel P terjadi penurunan kadar BOD dari 3100 mg/L pada hari pertama menjadi 2456 mg/L pada hari kelima. Penurunan ini menunjukkan bahwa arang aktif efektif digunakan sebagai adsorben dalam pengolahan limbah cair tahu. Efektivitas ini sejalan dengan karakteristik arang aktif yang dikenal memiliki luas permukaan dan porositas tinggi, sehingga mampu menyerap zat-zat organik secara efisien dari air limbah [22].

Sebaliknya, pada sampel Q, R, S, dan T yang menggunakan cangkang telur secara tunggal maupun dalam kombinasi terjadi peningkatan kadar BOD. Peningkatan ini kemungkinan disebabkan oleh keberadaan sisa bahan organik yang masih tertinggal pada cangkang telur, baik akibat proses pembersihan yang belum sempurna maupun proses aktivasi yang kurang optimal. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan cangkang telur sebagai material penyerap memerlukan perlakuan awal yang lebih intensif untuk menghilangkan residu organik [18,23].

Dari hasil yang diperoleh nilai BOD pada limbah tahu melebihi baku mutu yang telah ditetapkan peraturan gubernur No.73 Tahun 2013 maksimum nilai BOD adalah 150mg/l, oleh karena itu belum layak untuk

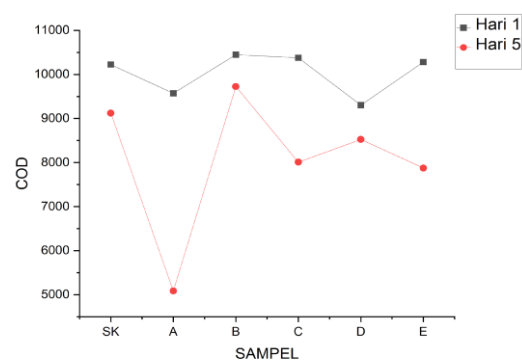
dibuang keperairan [13,24]. Dengan demikian kombinasi kedua bahan tersebut harus dioptimalkan lagi baik dari segi pencampuran, volume dosis dan proses aktivasi.

Karakterisasi COD

Pengujian COD digunakan untuk menentukan jumlah oksigen yang dibutuhkan dalam mengoksidasi senyawa organik dalam limbah cair secara kimia. Pada limbah cair tahu, nilai COD yang tinggi mencerminkan tingginya beban pencemar organik sehingga parameter ini digunakan untuk mengevaluasi efektivitas adsorben dalam menurunkan tingkat pencemaran.

Tabel 3. Hasil analisis COD

No	Nama Sampel	Hari 1 (mg/L)	Hari 5 (mg/L)
1	O	10.224	9122
2	P	9570	5085
3	Q	10.446	9724
4	R	10.378	8008
5	S	9302	8523
6	T	10.282	7874



Gambar 2. Grafik nilai COD dengan variasi waktu kontak

Dari hasil analisis nilai COD pada table 3 dan gambar 2, terdapat sampel yang mengalami penurunan nilai COD yaitu pada sampel P, R, S, dan T, Dimana ketiga sampel tersebut mengandung arang aktif tkks. Maka dapat disimpulkan Tkks merupakan absorben yang baik karena kemampuan absorpsi nya yang tinggi dan juga mengandung selulosa, hemiselulosa dan lignin. Dengan adanya pengolahan limbah menjadi arang aktif sebagai absorben dapat menguraikan kadar organik yang ada pada limbah tahu dan dapat bekerja secara optimal [25]. Tkks juga mempunyai sifat tahan lama terhadap asam dan basa.

Pada penelitian [26] menggunakan cangkang telur karena cangkang telur mempunyai pori-pori serta mempunyai kalsium karbonat yang tinggi dan dapat digunakan sebagai absorben untuk penanganan limbah cair yang baik. Namun, dari data Q yang peroleh diatas dapat dilihat bahwa menggunakan cangkang telur 100% belum dapat menurunkan kadar COD pada limbah cair, salah satu penyebabnya adalah ketika dibersihkan masih tertinggal sisa-sisa bakteri pada kulit cangkang telur.

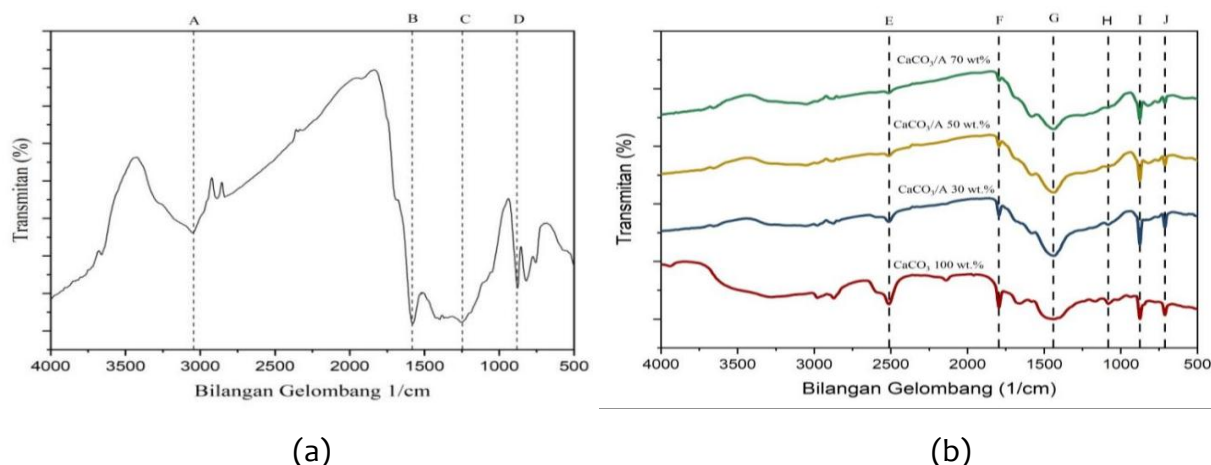
Jadi dapat kita simpulkan bahwa tkks lebih efektif dalam penurunan kadar COD pada limbah cair tahu. Namun,

penggunaan tkks dan cangkang telur masi perlu dioptimalkan agar dapat meningkatkan efisiensi penurunan COD secara menyeluruh. Selain itu volume komposit juga diperlukan untuk mencapai hasil yang lebih maksimal [2].

Karakterisasi FTIR

Analisis Fourier Transform Infrared (FTIR) dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi kimia yang terdapat pada komposit arang aktif berbasis tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dan cangkang telur. Karakterisasi ini bertujuan untuk mengetahui interaksi kimia yang terbentuk selama proses pembuatan komposit serta perubahan struktur permukaan adsorben setelah proses aktivasi dan pencampuran.

Secara Fisika gugus fungsi yang dihasilkan pada penelitian ini bertujuan untuk mengkonfirmasi bilangan gelombang yang ada pada komposit tkks dan cangkang telur seperti yang terlihat pada Gambar 3 dan Tabel 3. Spektra FTIR CaCO_3 terdeteksi adanya gugus fungsi CaCO pada bilangan gelombang 711 cm^{-1} . Adanya gugus fungsi karbonat pada bilangan gelombang 1082 cm^{-1} dan pada bilangan gelombang 2515 cm^{-1} . Pada bilangan gelombang 1798 cm^{-1} terdapat gugus fungsi karbonil [14].



Gambar 3 Spektrum FTIR: (a) arang aktif dan (b) CaCO_3 komposit CaCO_3 + Arang aktif dengan komposisi 30 wt.%, 50 wt.% dan 70 wt.%

Tabel 3 Perbandingan Bilangan Gelombang Puncak Spektrum FTIR antara Referensi dengan Arang Aktif, CaCO_3 , dan Komposit CaCO_3 /Arang Aktif

Sampel	Kode Ikatan	Jenis Ikatan	Wavenumber (1/Cm)		
			Referensi*	Arang Aktif	CaCO_3 /Arang Aktif
Arang aktif 100 wt.%	A	O-H	3757	3034	-
Arang aktif 100 wt.%	B	C-O	1720	1581	-
Arang aktif 100 wt.%	C	C-O	1280	1246	-
Arang aktif 100 wt.%	D	C-H	501	881	-
CaCO_3 100 wt.%	E	CO_3^{2-}	2515,84	-	2515
CaCO_3 100 wt.%	F	C=O	1798,45	-	1798
CaCO_3 100 wt.%	G	Ca-CO	1424,79	-	1424
CaCO_3 100 wt.%	H	CO_3^{2-}	1082,49	-	1082
CaCO_3 100 wt.%	I	Ca-CO	875,69	-	875
CaCO_3 100 wt.%	J	Ca-CO	711,68	-	711

*[17,25]

Arang aktif pada bilangan gelombang 881 cm^{-1} terdapat gugus fungsi C-H, pada bilangan gelombang 1246 cm^{-1} dan bilangan gelombang 1581 cm^{-1}

terdapat gugus fungsi C-O [25]. Terakhir gugus fungsi O-H pada bilangan gelombang 3034 cm^{-1} . Dari hasil yang didapatkan pada gugus fungsi arang aktif

600°C bahwa arang aktif yang terbuat dari tkks teridentifikasi mempunyai gugus fungsi C-H, C-O dan O-H. Sampel CaCO_3 100 wt.% puncak Ca-CO, karbonat dan karbonil terlihat semakin tajam seiring dengan penambahan arang aktif dengan presentase 30 %, 50 % dan 70 % intensitas puncak CaCO_3 mengalami penurunan. Keberadaan gugus fungsi O-H berpengaruh terhadap penurunan intensitas puncak Ca-CO, karbonat dan karbonil pada komposit arang aktif/ CaCO_3 . Tidak adanya gugus fungsi pada variasi arang aktif disebabkan karena arang aktif tidak bereaksi secara kimia dengan CaCO_3 . Gugus fungsi CaCO_3 dan arang aktif tidak saling mengikat [27].

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, arang aktif berbasis tandan kosong kelapa sawit (TKKS) terbukti efektif sebagai adsorben dalam menurunkan kadar BOD dan COD pada limbah cair tahu karena memiliki luas permukaan dan daya adsorpsi yang tinggi. Sementara itu, penambahan cangkang telur dalam bentuk komposit belum memberikan hasil optimal akibat kemungkinan masih adanya residu organik dan belum optimalnya proses aktivasi maupun komposisi campuran. Hasil karakterisasi FTIR menunjukkan adanya

gugus fungsi aktif seperti O-H, C-O, C=O, dan Ca-CO yang berperan dalam proses adsorpsi. Secara keseluruhan, komposit TKKS dan cangkang telur berpotensi digunakan sebagai material adsorben ramah lingkungan, namun masih diperlukan optimasi lebih lanjut untuk meningkatkan efektivitas penurunan BOD dan COD agar memenuhi baku mutu limbah cair.

REFERENSI

- [1] Derosya, V., & Ihsan, T. (2025). Assessing the environmental impact of tofu production: A systematic review for a sustainable industry. *Agrointek: Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 19(2), 261–272. <https://doi.org/10.21107/agrointek.v19i2.22482>
- [2] Cahyani, M. R., Zuhaela, I. A., Saraswati, T. E., Raharjo, S. B., Pramono, E., Wahyuningsih, S., Lestari, W. W., & Widjonarko, D. M. (2021). Pengolahan Limbah Tahu dan Potensinya. *Proceeding of Chemistry Conferences*, 6, 27. <https://doi.org/10.20961/pcc.6.o.55086.27-33>
- [3] Pagoray, H., Sulistyawati, S., & Fitriyani, F. (2021). Limbah Cair Industri Tahu dan Dampaknya Terhadap Kualitas Air dan Biota Perairan. *Jurnal Pertanian Terpadu*, 9(1), 53–65. <https://doi.org/10.36084/jpt.v9i1.312>

- [4] Destanti, M., Sari, N., Annisa, F., & Fadlly, T. A. (t.t.). Adsorpsi Zat Organik Limbah Laundry Menggunakan Karbon Aktif dari ... *JIPFRI (Jurnal Inovasi Pendidikan Fisika dan Riset Ilmiah)*, 9(2), 136–145. <https://doi.org/https://doi.org/10.30599/jipfri.v9i2.4823>
- [5] Fadzy, N., Eniati, E., & Hidayat, H. (2021). Analysis of COD, BOD and DO Levels in Wastewater Treatment Instalation (IPAL) at Balai Pengelolaan Infrastruktur Air Limbah dan Air Minum Perkotaan Dinas PUP-ESDM Yogyakarta. *IJCER (International Journal of Chemistry Education Research)*, 78–83. <https://doi.org/10.20885/ijcer.vol5.iss2.art5>
- [6] Usman, R., & Wahyuningsih, P. (2022). Improving the quality of palm oil liquid waste using nanocomposite TiO₂/EPB activated carbon through adsorption-photodegradation. *Journal of Aceh Physics Society*, 11(3), 70–74. <https://doi.org/10.24815/jacps.v11i3.25626>
- [7] Gulo, F. D. (2025). Manajemen Kualitas Air di Perairan Umum. *PERAUT: Jurnal Perikanan dan Kelautan*, 02(1), 107–113. <https://doi.org/https://doi.org/10.70134/peraut.v1i1.690>
- [8] Rahmawati, Fajri, R., Fadlly, T. A., Sari, N., Annisa, F., & Husna, S. S. (2025). The Effect of Microwave Time Radiation on Pore Characteristics of Cassava Peel Activated Carbon (Manihot Esculenta Crantz). *JST (Jurnal Sains Dan Teknologi)*, 14(2), 349–358. <https://doi.org/10.23887/jst-undiksha.v14i2.95528>
- [9] Triana, Y., Efriana, S., Pratama, R., Anjani, S. W., Tominaga, M., Kurniawan, F., Astuti, W., & Ismail, A. I. (2025). Synthesis and Characterization of Oil Palm Empty Fruit Bunch-Activated Carbon for Battery Electrodes. *Energy Storage*, 7(3), e70159. <https://doi.org/10.1002/est2.70159>
- [10] Rosmalinda, R., Fadlly, T. A., & Rahmawati, R. (2021). Pengaruh Variasi Karbon Aktif Dari Tkks Pada Tio₂ Terhadap Efisiensi Sel Surya Dssc Menggunakan Dye Kulit Jengkol (Pitchellobium Lobatum Benth). *Wahana Fisika*, 6(2), 142–150. <https://doi.org/https://doi.org/10.17509/wafi.v6i2.39222>
- [11] Yoshi, L. A., Nurhalizah, F. F., Daranova, D., Hariansyah, N., Enjarlis, E., Ismojo, I., & Handayani, S. (2025). Review: Potential of Oil Palm Empty Fruit Bunches Waste to Become an Ultrafiltration Membrane for Clean Water Treatment. *Journal of Bioresources and Environmental Sciences*, 4(2), 88–101. <https://doi.org/10.61435/jbes.2025.19953>
- [12] Amraini, S. Z., Nazaris, N. N., Andrio, D., Mardhiansyah, M., & Helwani, Z. (2023). Utilization of Empty Palm Fruit Bunches as a Carbon Source for Cellulase Production to Reduce Solid Waste from Palm Oil. *Leuser Journal of Environmental Studies*, 1(1), 34–38. <https://doi.org/10.60084/ljes.v1i1.41>
- [13] Anindita, F., Naani, L., Permana, D., Karelius, K., & Kedang, Y. I. (2024).

- Study on Utilizing Oil Palm Empty Fruit Bunch Waste into Carbon Nanodots. *Journal of The Indonesian Society of Integrated Chemistry*, 16(2), 140–146.
<https://doi.org/10.22437/jisic.v16i2.38583>
- [14] Zubaidah, S., Putri Hartoyo, A. P., Sihombing, J. K., Herliyana, E. N., Darmawan, S., Sari, N. R., Prabowo, M. N. I., Hermawan, I., Maulida, I., & Solikhin, A. (2021). Oil palm empty fruit bunch valorization for activated and non-activated carbon nanoparticles and its heavy-metal-removal efficiency. *Water Science and Technology*, 83(11), 2652–2668.
<https://doi.org/10.2166/wst.2021.166>
- [15] Arrizal, H., Maftukhah, S., & Agustine, D. (2024). Potensi Limbah Cangkang Telur Ayam Sebagai Biosorben Logam Mangan (Mn) Dan Perbandingannya Dengan Koagulan Kimia. *Jurnal Teknik & Teknologi Terapan*, 2(2), 32–37.
<https://doi.org/10.47970/jttt.v2i2.749>
- [16] Wulandari, S. S., Alawiyah, T., Nastiti, K., & Hidayah, N. (2025). Pemanfaatan Cangkang Telur Sebagai Adsorben dalam Menurunkan Kadar Tembaga (Cu) pada Air Sungai Sebanan Kabupaten Tanah Bumbu: Utilization of Eggshells as Adsorbent in Reducing Copper (Cu) Level in Sebanan River Water, Tanah Bumbu Regency. *Jurnal Surya Medika*, 11(2), 80–90.
<https://doi.org/10.33084/jsm.v11i2.9682>
- [17] Fitriani, F., Fauzi, M., & Hasniah, H. (2024). Karakterisasi Kalsium Karbonat Dari Cangkang Telur Bebek Alabio Dengan Analisis Ft-Ir Dan Sem Sebagai Pendekatan Aspek Morfologi. *Jurnal Kesehatan Tambusai*, 5(4), 13854–13861.
<https://doi.org/10.31004/jkt.v5i4.35828>
- [18] Zahra, M. A. H., Irfan Ashari; Syaima, Husna. (2025). Pemanfaatan Cangkang Telur Ayam sebagai Sumber CaO: Studi Karakterisasi menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR. *JURNAL ATOMIK*, (Vol 10 No 2 (2025)), 133–137.
- [19] Hosny, A., Wael, N., Hossam, M. A., Abdelmonem, M., El-Sayed, S. M., Abu-Hussien, S. H., & Abd-Elhalim, B. T. (2025). Eggshell waste as a bioremoval agent for potentially toxic elements/metals and microbial contaminants from raw water of the Nile River in Egypt. *BMC Research Notes*, 18(1), 171.
<https://doi.org/10.1186/s13104-025-07199-y>
- [20] Sulistyaningrum, D. E., Suryanto, A., Mulyanto, T., Rahayuningsih, T., Muhariyanto, R. E., & Fadilah, R. (2024). *Organic Fertilizer the Result of Innovation Egg Shell Waste*. 2(6).
- [21] Iftikhar, L., Ahmad, I., Saleem, M., Rasheed, A., & Waseem, A. (2024). Exploring the chemistry of waste eggshells and its diverse applications. *Waste Management*, 189, 348–363.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.08.024>
- [22] Zustriani, A. K., & Aghnia, T. B. (2025). Efektivitas Cangkang Telur Teraktivasi

- Asam Dan Basa Untuk Adsorpsi Logam Tembaga (Cu) Pada Limbah Cair Laboratorium. *Jurnal Crystal: Publikasi Penelitian Kimia dan Terapannya*, 7(1), 32–39. <https://doi.org/https://doi.org/10.36526/jc.v7i1.4612>
- [23] Oktaviani, Z., Wahyuni, D., & Nurhanisa, M. (2024). Sintesis Karbon Aktif dari Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Aktivator Gelombang Mikro dan Pengujian Kualitas Berdasarkan SNI 06-3730-1995. *Newton-Maxwell Journal of Physics*, 5(1). <https://doi.org/10.33369/nmj.v5i1.33499>
- [24] Kahar, K., & Prasetya, B. (2023). Gambaran Kadar Biochemical Oxygen (BOD) dan Chemical Oxygen Demand (COD) pada Limbah Cair Industri Tahu. *Jurnal Sanitasi Profesional Indonesia*, 4(2), 101–110. <https://doi.org/10.33088/jspi.4.2.101-110>
- [25] Khomsatun, K., & Zairinayati. (2022). Efektifitas Tandan Kosong Kelapa Sawit (Elaeis Guineensis Jacq) Dalam Menurunkan Kadar COD Limbah Cair Kain Jumputan. *Jurnal Indobiosains*, 4(2), 61–70. <https://doi.org/https://doi.org/10.31851/indobiosains.v4i2.8433>
- [26] Rahmawati, R., & Fadlly, T. A. (2019). Karakteristik energi gap (Eg) komposit ZnO/karbon aktif dari tandan sawit (Elaeis guineensis Jack)) untuk aplikasi sel surya. *Jurnal Fisika*, 9(2), 60–68.
- [27] Zonato, R. de O., Estevam, B. R., Perez, I. D., Aparecida dos Santos Ribeiro, V., & Boina, R. F. (2022). Eggshell as an adsorbent for removing dyes and metallic ions in aqueous solutions. *Cleaner Chemical Engineering*, 2, 100023. <https://doi.org/10.1016/j.clce.2022.100023>