

Adsorpsi Karbon Aktif Berbasis Limbah Sawit terhadap Metilen Biru dengan Spektrofotometri UV-Vis : Perbandingan Sumber Bahan

Maya Safitri¹, Ninis Hadi Haryanti², Rahmad Oktafiansyah³, M. Ikhwan Najmi⁴, Noor Asyiah⁵, Maulanie Muhaemina⁶

^{1,2,3,4,5} Program Studi Fisika, Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru, Indonesia

DOI: <https://doi.org/10.29303/Goescienceed.v6i3.1196>

Article Info

Received: 26 Juny 2025

Revised: 07 July 2025

Accepted: 11 August 2025

Correspondence:

Phone: +6282351509285

Abstrak: Pencemaran air oleh zat pewarna sintesis seperti metilen biru menjadi permasalahan lingkungan yang serius karena sifatnya yang toksik dan resisten terhadap degradasi biologis. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja adsorpsi karbon aktif dari dua jenis biomassa kelapa sawit yaitu cangkang dan tandan kosong kelapa sawit terhadap metilen biru. Kedua bahan dikarbonisasi pada suhu 400 °C selama 1 jam, kemudian diuji kemampuan adsorpsinya pada tiga variasi waktu kontak (5, 10, dan 15 menit). Analisis dilakukan menggunakan spektrofotometri UV-Vis pada panjang gelombang 659 nm untuk menentukan nilai absorbansi sebelum dan sesudah adsorpsi. Hasil menunjukkan bahwa efisiensi penurunan absorbansi meningkat seiring waktu kontak, dengan efisiensi tertinggi pada menit ke-15, karbon aktif dari tandan menunjukkan efisiensi tertinggi sebesar 79,91%, sedangkan cangkang mencapai 77,50%. Karbon aktif dari tandan kosong kelapa sawit menunjukkan kinerja terbaik diikuti oleh cangkang kelapa sawit. Temuan ini menunjukkan bahwa biomassa kelapa sawit dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku karbon aktif yang efektif, ramah lingkungan, dan berpotensi diterapkan dalam pengolahan limbah cair industri.

Keywords: Adsorpsi, Karbon Aktif, Kelapa Sawit, Metilen Biru, UV-Vis

Citation: Safitri, M., Haryanti, H., N., Oktafiansyah, R., Najmi, I., M., Asyiah, N., & Muhaemina, M. (2025). Adsorpsi Karbon Aktif Berbasis Limbah Sawit terhadap Metilen Biru dengan Spektrofotometri UV-Vis : Perbandingan Sumber Bahan. *Journal Pendidikan, Sains, Geologi dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 6(3), 1361-1368. doi: <https://doi.org/10.29303/Goescienceed.v6i3.1196>

Pendahuluan

Pencemaran air akibat limbah zat pewarna sintesis, seperti metilen biru, merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang mendesak, terutama di wilayah dengan aktivitas industri tekstil, kertas, dan farmasi. Pewarna ini bersifat tahan degradasi biologis, toksik, dan dapat mengganggu kualitas air serta kesehatan ekosistem (Sahu et al., 2024). Oleh karena itu, diperlukan teknologi yang efisien, murah, dan

ramah lingkungan untuk mengatasi permasalahan ini. Berbagai metode telah digunakan untuk mengurangi pencemar dalam air limbah, seperti koagulasi (Jiang, 2015), filtrasi (Modin et al., 2016), maupun adsorpsi (Suryajaya et al., 2020). Salah satu metode yang banyak digunakan adalah adsorpsi, khususnya menggunakan karbon aktif sebagai adsorben (Haryanti et al., 2024).

Karbon aktif dikenal sebagai material adsorben yang efektif karena memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, volume pori yang besar, serta keberadaan gugus fungsional aktif di permukaan (Trinca et al., 2023). Sementara itu, produksi karbon aktif komersial diketahui masih bergantung pada bahan baku tak terbarukan dan melibatkan biaya tinggi, termasuk energi aktivasi dan bahan kimia aktivator (Kundu et al., 2024). Oleh karena itu, penggunaan biomassa alami yang mudah diperoleh, murah, dan bersifat terbarukan (misalnya sekam padi, kulit kelapa, limbah pertanian) semakin populer sebagai alternatif dalam pengembangan karbon aktif berbasis bahan alam (Bumajdad et al., 2023).

Karbon aktif menunjukkan kemampuan adsorpsi yang sangat tinggi untuk berbagai kontaminan, terutama logam berat, senyawa organik, dan gas polutan, luas permukaan spesifik yang besar (hingga $> 2.000 \text{ m}^2/\text{g}$), dan gugus fungsional permukaan yang beragam (Zieliński et al., 2022). Salah satunya adalah karbon aktif yang dihasilkan dari residu minyak (*oily sludge*) melalui aktivasi KOH dapat mencapai luas permukaan BET sekitar $2.263 \text{ m}^2/\text{g}$, volume pori total $\sim 1,37 \text{ cm}^3/\text{g}$, dan menunjukkan kapasitas adsorpsi fenol yang tinggi sesuai model isoterm Freundlich dan kinetika pseudo-sekon orde ($R^2 = 0,99$) (Mojoudi et al., 2019). Selain itu, review modern menekankan bahwa karbon aktif berbasis biomassa dari limbah pertanian menawarkan struktur pori yang dapat disesuaikan dan adsorpsi logam berat yang kuat, menjadikannya sangat efisien serta ekonomis (Wang et al., 2023).

Perkebunan kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) memang banyak berkembang di dataran rendah Kalimantan Selatan termasuk pada lahan-lahan basah seperti area rawa dan gambut. Kelapa sawit menghasilkan limbah biomassa yang sangat besar dari setiap hektarnya. Sekitar 75% berat total tanaman kelapa sawit (termasuk tandan kosong, pelepah, serat, cangkang, dan lumpur pabrik) adalah limbah hasil olahan (Alhaji et al., 2024). Bagian-bagian tanaman ini seperti cangkang kelapa sawit (palm kernel shell), tandan kosong (empty fruit bunch/EFB), dan campuran keduanya merupakan biomassa padat yang kaya

lignoselulosa dan karbon terikat, menjadikannya kandidat potensial sebagai bahan baku karbon aktif (Hayawin, 2018; Intarachandra et al., 2019).

Kandungan kimia yang berbeda antara cangkang dan tandan dapat menghasilkan karakter karbon aktif yang juga berbeda. Cangkang memiliki struktur keras dan kandungan karbon tetap yang tinggi, sementara tandan memiliki serat yang lebih lunak dan berpori, sehingga kombinasi keduanya berpotensi menciptakan karakter pori yang lebih seimbang dan efektif dalam proses adsorpsi (Intarachandra et al., 2019). Beberapa studi telah mengembangkan karbon aktif dari masing-masing bagian secara terpisah. Karbon aktif dari cangkang kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) yang dibuat melalui hidrothermal karbonisasi dan aktivasi, menunjukkan kapasitas adsorpsi metilen biru sebesar $54,0 \text{ mg/g}$ sesuai model isoterma Langmuir pada kondisi tinggi, dengan struktur pori yang relevan pada molekul adsorbat medium dan tinggi (Zakir et al., 2025). Sementara itu, karbon aktif dari tandan kosong kelapa sawit (empty fruit bunch / EFB) yang diaktivasi menggunakan ZnCl_2 mampu mencapai kapasitas adsorpsi metilen biru hingga 225 mg/g dengan luas permukaan BET mencapai $1.058 \text{ m}^2/\text{g}$, menunjukkan potensi yang sangat besar untuk aplikasi penyerapan zat warna (Wirasnita et al., 2015).

Beberapa studi internasional terkini menunjukkan bahwa karbon aktif berbasis limbah kelapa sawit (cangkang sawit, tandan kosong / EFB, atau campurannya) dapat dihasilkan dengan metode aktivasi kombinasi untuk memaksimalkan luas permukaan dan porositas. Misalnya, Ukanwa et al. (2020) menggunakan campuran limbah sawit (EFB, serabut mesokarp, dan cangkang inti sawit) dengan agen kimia alami (trona) dan pemanasan gelombang mikro, menghasilkan karbon aktif dengan luas permukaan spesifik (BET) $\sim 980 \text{ m}^2/\text{g}$ (Ukanwa et al., 2020). Pendekatan serupa impregnasi kimiawi (seperti ZnCl_2 atau KOH) diikuti aktivasi fisika dengan CO_2 dan/atau uap air juga dilaporkan sangat efektif. Sebagai contoh Zaini et al., (2023) menemukan bahwa aktivasi berurutan dengan CO_2 dan uap

meningkatkan *burn-off* dan BET hingga puncak, sehingga kapasitas adsorpsi CH_4 mencapai 4,500 mol/kg.

Analisis SEM, BET dan FTIR menunjukkan struktur berpori masif dan fungsionalitas permukaan yang kaya oksigen/unsur lainnya. Misalnya, AC berbasis serat batang sawit yang diaktifasi H_3PO_4 mencapai $\approx 2058 \text{ m}^2/\text{g}$ (Gayathiri et al., 2023). Demikian pula, karbon aktif dari tempurung kelapa (yang juga diaktivasi kimiawi ganda dengan asam dan basa) menunjukkan kapasitas adsorpsi warna kationik (mirip MB) mendekati 1000 mg/g (Saleem et al., 2024). Hasil-hasil ini menegaskan bahwa kombinasi aktivasi kimia (misalnya KOH, H_3PO_4 , ZnCl_2) dan fisika (CO_2 , steam, microwave) dapat menghasilkan karbon aktif kelapa sawit berporositas ganda (mikro-mesoporos) dengan karakteristik permukaan unggul, efektif menyerap molekul organik seperti metilen biru (Ukanwa et al., 2020).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja adsorpsi karbon aktif dari dua variasi sampel dari bahan yang bersumber dari kelapa sawit, yaitu cangkang kelapa sawit dan tandan kelapa sawit terhadap zat pewarna metilen biru. Evaluasi dilakukan menggunakan spektrofotometri UV-Vis, yang mampu mengukur konsentrasi metilen biru secara kuantitatif dan akurat. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan material adsorben berbasis biomassa lokal yang lebih efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan.

Kebaruan dari penelitian ini terletak pada pendekatan komparatif secara langsung terhadap dua jenis limbah biomassa kelapa sawit, yaitu cangkang dan tandan kosong, sebagai bahan baku karbon aktif untuk adsorpsi zat warna sintetis. Berbeda dengan sebagian besar studi sebelumnya yang hanya meneliti satu jenis bahan secara terpisah dan dalam kondisi eksperimental yang bervariasi, penelitian ini menggunakan prosedur aktivasi dan kondisi analisis yang seragam untuk kedua bahan, sehingga memungkinkan perbandingan yang objektif dan sistematis.

Pendekatan ini memberikan kontribusi baru dalam mengevaluasi performa relatif dari masing-masing bahan secara lebih terukur. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi rujukan dalam seleksi dan optimalisasi pemanfaatan limbah sawit sebagai karbon aktif untuk aplikasi pengolahan air limbah.

Metode

Penelitian ini diawali dengan pengambilan bahan baku berupa limbah biomassa kelapa sawit yang terdiri dari cangkang kelapa sawit dan tandan kosong kelapa sawit. Kedua jenis biomassa dikeringkan terlebih dahulu secara alami untuk mengurangi kadar air dan memudahkan proses karbonisasi. Bahan kering kemudian dipotong kecil dan dimasukkan ke dalam furnace untuk proses karbonisasi.

Proses karbonisasi dilakukan pada suhu 400°C selama 1 jam. Pemanasan dilakukan dalam kondisi terbatas oksigen untuk memastikan bahwa biomassa mengalami dekomposisi termal tanpa terbakar sempurna. Setelah pendinginan, sampel yang telah menjadi arang ditandai dengan perubahan warna menjadi hitam pekat dan kerapuhan struktur. Arang tersebut kemudian digerus menggunakan mortar hingga halus dan siap digunakan dalam tahap adsorpsi.

Tahap selanjutnya adalah pembuatan larutan metilen biru, yang digunakan sebagai model polutan zat warna. Larutan disiapkan dengan mencampurkan 1 mL metilen biru murni ke dalam 1000 mL aquades, sehingga diperoleh larutan dengan konsentrasi sekitar 0,1% (v/v). Larutan ini kemudian digunakan sebagai media pengujian kemampuan adsorpsi dari masing-masing karbon aktif yang telah disiapkan.

Proses adsorpsi dilakukan dengan mencampurkan karbon aktif dari masing-masing sampel ke dalam larutan metilen biru. Pengujian dilakukan pada tiga variasi waktu kontak, yaitu 5 menit, 10 menit, dan 15 menit, dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh waktu terhadap efektivitas penyerapan zat warna oleh karbon aktif. Selama proses perendaman, larutan diaduk secara perlahan menggunakan pengaduk magnetik agar proses adsorpsi berlangsung merata.

Setelah proses adsorpsi selesai, larutan disaring untuk memisahkan karbon aktif dari larutan

pewarna. Filtrat yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum metilen biru. Nilai absorbansi yang dihasilkan dari alat ini digunakan untuk menghitung efisiensi penurunan konsentrasi metilen biru oleh masing-masing jenis karbon aktif.

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui sampel karbon aktif mana yang paling efektif dalam menurunkan konsentrasi metilen biru berdasarkan nilai absorbansinya, serta mengevaluasi pengaruh waktu kontak terhadap kapasitas adsorpsi. Dengan demikian, dapat diperoleh gambaran mengenai kinerja dan potensi pemanfaatan limbah kelapa sawit sebagai bahan baku karbon aktif untuk pengolahan air limbah yang mengandung zat warna sintetis.

Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Visual dan Fisik Karbon Aktif

Proses karbonisasi pada suhu 400 °C selama 1 jam menghasilkan perubahan visual yang konsisten pada dua jenis bahan baku cangkang kelapa sawit dan tandan kosong kelapa sawit. Secara umum, seluruh sampel mengalami perubahan warna menjadi hitam pekat, menandakan bahwa proses pirolisis telah berlangsung dengan baik dan menghasilkan material karbon yang matang. Warna ini mencerminkan derajat karbonisasi yang relatif tinggi, yang umumnya diasosiasikan dengan pembentukan struktur aromatik dan pengurangan kandungan volatil.

Namun, karakteristik tekstur dan kepadatan visual antar sampel menunjukkan variasi yang cukup berbeda. Karbon aktif dari cangkang sawit menunjukkan tekstur yang paling keras dan padat, dengan warna hitam pekat mengilap dan partikel yang homogen. Sampel ini juga paling sulit dihancurkan dalam proses penggerusan, yang mengindikasikan struktur internal yang lebih padat dan sedikit rongga. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh struktur selulosa dan lignin yang lebih padat pada cangkang dibandingkan bagian lainnya.

Sementara itu, karbon aktif dari tandan kosong sawit tampak lebih rapuh dan memiliki warna hitam sedikit pudar. Teksturnya yang ringan dan berongga menyebabkan sampel ini lebih mudah digerus menjadi partikel halus. Ini menunjukkan

bahwa tandan memiliki struktur awal yang lebih longgar atau berpori, yang tetap terjaga bahkan setelah proses karbonisasi, memungkinkan pembentukan jaringan pori mikro yang lebih melimpah namun mungkin kurang stabil secara mekanis.

Tabel 1 memperkuat pengamatan visual dan tekstural dari masing-masing sampel. Karbon aktif dari cangkang tampak unggul dari sisi kekuatan mekanik dan stabilitas bentuk, yang umumnya dibutuhkan dalam aplikasi berulang atau filtrasi tekanan tinggi. Sementara itu, tandan menonjol dalam hal porositas alami, yang menguntungkan untuk proses adsorpsi karena ketersediaan lebih banyak situs aktif.

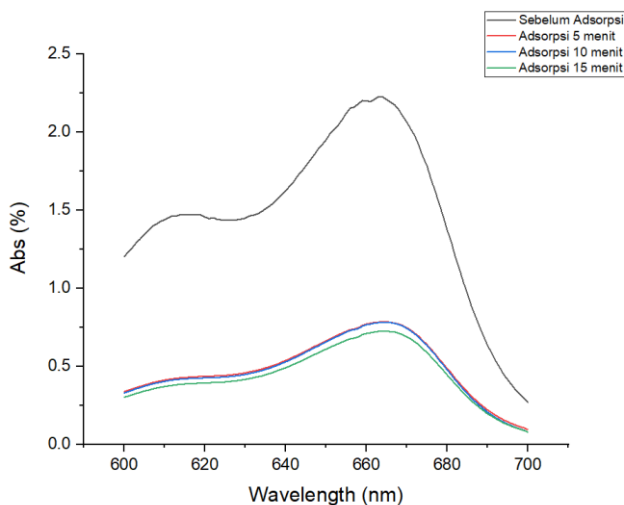
Tabel 1 Karakteristik Fisik dan Visual Karbon Aktif dari Berbagai Bahan

Sampel	Warna	Tekstur	Keterangan Tambahan
Cangkang	Hitam pekat	Keras, padat	Sulit digerus, partikel homogen
Tandan	Hitam pudar	Rapuh, berongga	Mudah digerus, tampak banyak pori

Spektrum UV-Vis Larutan Metilen Biru Sebelum dan Sesudah Adsorpsi

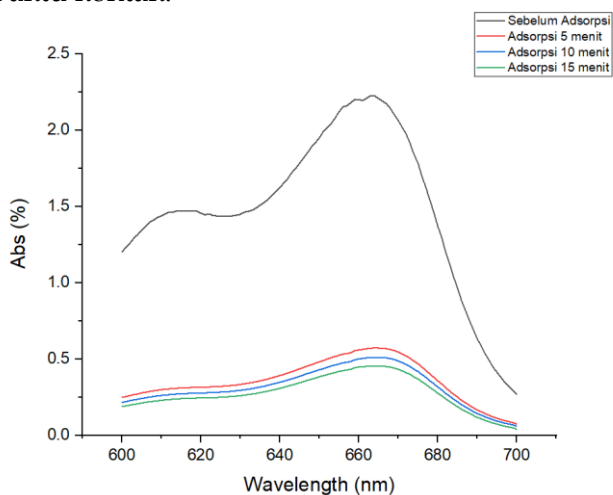
Spektrum UV-Vis digunakan untuk memantau perubahan konsentrasi metilen biru dalam larutan setelah kontak dengan karbon aktif. Metilen biru memiliki puncak serapan maksimum pada panjang gelombang sekitar ~664 nm (Sulaiman et al., 2021), yang mencerminkan keberadaan gugus kromofor aromatik dalam strukturnya. Semakin tinggi nilai absorbansi pada panjang gelombang ini, semakin tinggi pula konsentrasi metilen biru yang tersisa dalam larutan.

Hasil pengukuran spektrum UV-Vis pada masing-masing variasi sampel karbon aktif ditampilkan dalam Gambar 1 hingga Gambar 2. Setiap gambar menunjukkan tren penurunan absorbansi seiring bertambahnya waktu kontak antara karbon aktif dan larutan metilen biru, yang merupakan indikasi terjadinya proses adsorpsi.



Gambar 1 Spektrum UV-Vis karbon aktif cangkang kelapa sawit pada 5, 10, dan 15 menit.

Gambar 1 menunjukkan spektrum UV-Vis untuk sampel cangkang sawit. Pada waktu kontak 5 menit, spektrum absorbansinya berada pada nilai tertinggi. Setelah 10 menit, terjadi penurunan intensitas absorbansi, dan pada 15 menit absorbansi mencapai titik terendah. Tren ini menunjukkan bahwa karbon aktif dari cangkang sawit mampu menyerap metilen biru secara bertahap, dengan efisiensi meningkat seiring waktu kontak.



Gambar 2 Spektrum UV-Vis karbon aktif tandan kosong kelapa sawit pada 5, 10, dan 15 menit

Gambar 2 menggambarkan hasil serupa untuk sampel tandan kosong sawit. Persentase absorbansi tertinggi juga terjadi pada 5 menit, kemudian menurun pada 10 menit dan paling rendah pada 15 menit. Intensitas puncak absorbansi pada tiap waktu kontak tampak sedikit

lebih rendah dibandingkan dengan sampel cangkang, yang mengindikasikan bahwa efisiensi penurunan metilen biru oleh karbon aktif tandan cenderung lebih tinggi dibandingkan cangkang.

Dari kedua grafik, dapat disimpulkan bahwa waktu kontak berbanding lurus dengan efisiensi adsorpsi, di mana spektrum UV-Vis menunjukkan penurunan absorbansi yang signifikan setelah 15 menit perendaman. Selain itu, berdasarkan puncak spektrum terendah pada 15 menit, karbon aktif dari bahan tandan kosong kelapa sawit menunjukkan performa terbaik dalam menyerap metilen biru yang tercermin dari nilai absorbansi terendah.

Efisiensi Penurunan Absorbansi Metilen Biru

Evaluasi efektivitas adsorpsi karbon aktif dari ketiga jenis bahan dilakukan dengan membandingkan nilai absorbansi larutan metilen biru sebelum dan sesudah proses adsorpsi pada berbagai waktu kontak (5, 10, dan 15 menit). Nilai absorbansi diukur pada panjang gelombang maksimum metilen biru, yaitu 659 nm, menggunakan spektrofotometer UV-Vis.

Tabel 2 Nilai Absorbansi Larutan Metilen Biru Setelah Adsorpsi

Sampel	5 menit	10 menit	15 menit
Cangkang	0.762	0.703	0.495
Tandan	0.554	0.495	0.442

Tabel 2 menyajikan data nilai absorbansi hasil uji UV-Vis untuk masing-masing sampel pada tiga waktu kontak. Nilai awal absorbansi metilen biru tanpa adsorpsi (sebagai kontrol) yaitu sebesar 2,201. Dari tabel tersebut terlihat bahwa nilai absorbansi menurun secara konsisten dengan bertambahnya waktu kontak. Hal ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak antara karbon aktif dan larutan metilen biru, semakin banyak molekul pewarna yang teradsorpsi.

Berdasarkan hasil pengukuran absorbansi menggunakan spektrofotometri UV-Vis pada waktu kontak 5, 10, dan 15 menit, terlihat bahwa baik karbon aktif dari cangkang maupun tandan kosong kelapa sawit mengalami penurunan nilai absorbansi metilen biru seiring bertambahnya waktu kontak. Karbon aktif dari tandan menunjukkan penurunan absorbansi yang lebih signifikan, yaitu dari 0.554 (5 menit) menjadi 0.442 (15 menit), dibandingkan dengan cangkang yang

turun dari 0.762 menjadi 0.495 pada waktu yang sama. Performa adsorpsi yang lebih baik pada tandan dapat dikaitkan dengan struktur pori yang lebih terbuka dan lebih banyak dibandingkan cangkang, sebagaimana juga terkonfirmasi dari pengamatan visual. Porositas yang tinggi memungkinkan lebih banyak situs aktif untuk interaksi dengan molekul metilen biru, sehingga meningkatkan efisiensi adsorpsi. Sebaliknya, meskipun karbon aktif dari cangkang menunjukkan efisiensi yang cukup baik, kinerjanya lebih lambat dan kurang optimal dibandingkan tandan, kemungkinan karena struktur fisiknya yang lebih padat dan keras, sehingga membatasi difusi zat warna ke dalam pori-pori.

Tabel 3 Efisiensi Penurunan Absorbansi Metilen Biru (%)

Sampel	5 menit	10 menit	15 menit
Cangkang	65.37%	68.07%	77.50%
Tandan	74.83%	77.51%	79.91%

Berdasarkan Tabel 3, terlihat bahwa efisiensi penurunan absorbansi metilen biru meningkat seiring bertambahnya waktu kontak untuk kedua jenis karbon aktif. Pada menit ke-5, karbon aktif dari tandan menunjukkan efisiensi tertinggi sebesar 74,83%, sedangkan cangkang mencapai 65,37%. Tren ini terus berlanjut hingga menit ke-15, di mana efisiensi adsorpsi tandan mencapai 79,91%, sedikit lebih tinggi dibandingkan cangkang yang berada pada 77,50%. Perbedaan ini menunjukkan bahwa karbon aktif dari tandan kosong kelapa sawit lebih efektif dalam menyerap metilen biru, terutama pada waktu kontak yang lebih singkat.

Tingkat efisiensi yang lebih tinggi pada karbon aktif dari tandan kosong menunjukkan bahwa struktur internalnya lebih mendukung proses adsorpsi. Secara kasat mata, tandan memiliki tekstur yang lebih berpori, yang memungkinkan adsorpsi larutan metilen biru lebih mudah dan interaksi dengan permukaan aktif lebih maksimal. Sebaliknya, karbon aktif dari cangkang memiliki karakteristik fisik yang lebih padat dan kompak, yang dapat menghambat pergerakan molekul zat warna ke dalam struktur porinya. Meskipun tetap mampu menyerap metilen biru

secara bertahap, laju adsorpsinya cenderung lebih lambat.

Pengaruh Waktu Kontak terhadap Efisiensi Adsorpsi

Peningkatan waktu kontak antara karbon aktif dan larutan metilen biru memberikan pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi proses adsorpsi. Dari hasil penelitian, seluruh sampel menunjukkan tren peningkatan efisiensi penurunan absorbansi secara konsisten dari waktu kontak 5 menit, 10 menit, hingga 15 menit. Efisiensi terendah tercatat pada menit ke-5, di mana jumlah molekul metilen biru yang berhasil teradsorpsi masih relatif sedikit. Hal ini dapat dijelaskan oleh mekanisme difusi adsorbat, di mana pada tahap awal, molekul metilen biru mulai bergerak dari larutan menuju permukaan karbon aktif dan berinteraksi dengan gugus fungsional aktif yang tersedia. Seiring waktu, semakin banyak molekul metilen biru yang berhasil menembus dan menempati pori-pori adsorben, sehingga menyebabkan peningkatan efisiensi.

Peningkatan signifikan biasanya terjadi hingga titik waktu tertentu ketika hampir seluruh situs aktif telah terisi oleh molekul adsorbat. Berdasarkan data yang diperoleh, waktu kontak 15 menit memberikan efisiensi tertinggi bagi semua jenis sampel, yang menunjukkan bahwa sistem mulai mendekati kondisi kesetimbangan adsorpsi. Pada kondisi ini, laju adsorpsi dan desorpsi menjadi seimbang, sehingga penurunan konsentrasi metilen biru cenderung melambat atau bahkan berhenti meskipun waktu kontak diperpanjang. Fenomena ini sejalan dengan teori kinetika adsorpsi, di mana keberhasilan adsorpsi sangat bergantung pada waktu interaksi antara adsorbat dan adsorben serta kapasitas maksimum permukaan adsorben untuk menerima molekul pewarna.

Dengan demikian, waktu kontak 15 menit dapat dianggap sebagai waktu optimum dalam penelitian ini, karena pada durasi tersebut efisiensi penyerapan telah mendekati maksimum. Meskipun tidak menutup kemungkinan peningkatan waktu kontak lebih lanjut dapat meningkatkan efisiensi. Temuan ini menegaskan pentingnya pengaturan waktu kontak yang tepat dalam aplikasi teknologi adsorpsi, terutama untuk

pengolahan limbah zat warna sintetis yang bersifat persisten dan sulit terurai secara alami.

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengevaluasi dan membandingkan kinerja adsorpsi karbon aktif yang berasal dari dua jenis biomassa kelapa sawit, yaitu cangkang dan tandan kosong, terhadap zat pewarna metilen biru. Hasil menunjukkan bahwa efisiensi penurunan absorbansi meningkat secara signifikan seiring bertambahnya waktu kontak, dengan waktu optimum terjadi pada menit ke-15. Pada waktu tersebut, karbon aktif dari tandan kosong kelapa sawit menunjukkan efisiensi tertinggi sebesar 79,91%, sedangkan cangkang mencapai 77,50%. Perbedaan efektivitas ini diduga dipengaruhi oleh karakteristik fisik dari bahan yaitu struktur pori. Karbon aktif dari tandan kosong menunjukkan kinerja adsorpsi terbaik karena porositas alaminya yang lebih tinggi, sementara karbon aktif dari cangkang memiliki keunggulan pada ketahanan struktur fisiknya yang lebih padat dan keras, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi berulang atau penggunaan dalam sistem filtrasi berkelanjutan. Secara keseluruhan, karbon aktif berbasis limbah kelapa sawit, khususnya dari tandan kosong, berpotensi sebagai adsorben yang efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan untuk pengolahan limbah zat warna sintetis seperti metilen biru.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam penyelesaian penelitian ini, khususnya Kelompok Keahlian Fisika Material, Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Lambung Mangkurat.

Daftar Pustaka

- Alhaji, A. M., Almeida, E. S., Carneiro, C. R., da Silva, C. A. S., Monteiro, S., & Coimbra, J. S. dos R. (2024). Palm Oil (*Elaeis guineensis*): A Journey through Sustainability, Processing, and Utilization. *Foods*, 13(17), 2814. <https://doi.org/10.3390/foods13172814>
- Bumajdad, A., Khan, M. J. H., & Lukaszewicz, J. P. (2023). Nitrogen-enriched activated carbon derived from plant biomasses: a review on reaction mechanism and applications in wastewater treatment. In *Frontiers in Materials* (Vol. 10). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1218028>
- Gayathiri, M., Pulingam, T., Lee, K. T., Mohd Din, A. T., Kosugi, A., & Sudesh, K. (2023). Sustainable oil palm trunk fibre based activated carbon for the adsorption of methylene blue. *Scientific Reports*, 13(1), 22137. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49079-0>
- Haryanti, N. H., Suarso, E., Manik, T. N., Suryajaya, Sari, N., & Darminto. (2024). Activated Carbon from Nipa Palm Fronds (*Nypa fruticans*) with H₃PO₄ and KOH Activators as Fe Adsorbers. *Journal of Renewable Materials*, 12(2), 203–214. <https://doi.org/10.32604/jrm.2023.043549>
- Hayawin, Z. (2018). Carbonisation-activation of oil palm kernel shell to produce activated carbon and methylene blue adsorption kinetics. *Journal of Oil Palm Research*, 30. <https://doi.org/10.21894/jopr.2018.0039>
- Intarachandra, N., Siriworakon, S., & Sangmanee, T. (2019). Preparation of oil palm empty fruit bunch based activated carbon for adsorption of dye from aqueous solution. *MATEC Web of Conferences*, 268, 06008. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926806008>
- Jiang, J.-Q. (2015). The role of coagulation in water treatment. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 8, 36–44. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coche.2015.01.008>
- Kundu, S., Khandaker, T., Anik, M. A. A. M., Hasan, M. K., Dhar, P. K., Dutta, S. K., Latif, M. A., & Hossain, M. S. (2024). A comprehensive review of enhanced CO₂ capture using activated carbon derived from biomass feedstock. In *RSC Advances* (Vol. 14, Issue 40, pp. 29693–29736). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d4ra04537h>
- Modin, O., Frank, P., Britt-Marie, W., & Hermansson, M. (2016). Nonoxidative removal of organics in the activated sludge process. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(7), 635–672. <https://doi.org/10.1080/10643389.2016.1149903>

- Mojoudi, N., Mirghaffari, N., Soleimani, M., Shariatmadari, H., Belver, C., & Bedia, J. (2019). Phenol adsorption on high microporous activated carbons prepared from oily sludge: equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55794-4>
- Sahu, D., Pervez, S., Karbhal, I., Tamrakar, A., Mishra, A., Verma, S. R., Deb, M. K., Ghosh, K. K., Pervez, Y. F., Shrivastava, K., & Satnami, M. L. (2024). Applications of different adsorbent materials for the removal of organic and inorganic contaminants from water and wastewater – A review. *Desalination and Water Treatment*, 317. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100253>
- Saleem, J., Moghal, Z. K. B., Pradhan, S., & McKay, G. (2024). High-performance activated carbon from coconut shells for dye removal: study of isotherm and thermodynamics. *RSC Advances*, 14(46), 33797–33808. <https://doi.org/10.1039/d4ra06287f>
- Sulaiman, N. S., Amini, M. H. M., Danish, M., Sulaiman, O., & Hashim, R. (2021). Kinetics, thermodynamics, and isotherms of methylene blue adsorption study onto cassava stem activated carbon. *Water (Switzerland)*, 13(20). <https://doi.org/10.3390/w13202936>
- Suryajaya, Haryanti, N. H., Husain, S., & Safitri, M. (2020). Preliminary study of activated carbon from water chestnut (*Eleocharis dulcis*). *Journal of Physics: Conference Series*, 1572(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1572/1/012053>
- Trinca, A., Bassano, C., Verdone, N., Deiana, P., & Vilardi, G. (2023). Modelling and economic evaluation of CCS/PtX technologies integrated into biomass MTG plants. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(1), 109184. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.109184>
- Ukanwa, K. S., Patchigolla, K., Sakrabani, R., & Anthony, E. (2020). Preparation and Characterisation of Activated Carbon from Palm Mixed Waste Treated with Trona Ore. *Molecules*, 25(21). <https://doi.org/10.3390/molecules25215028>
- Wang, B., Lan, J., Bo, C., Gong, B., & Ou, J. (2023). Adsorption of heavy metal onto biomass-derived activated carbon: review. In *RSC Advances* (Vol. 13, Issue 7, pp. 4275–4302). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d2ra07911a>
- Wirasnita, R., Hadibarata, T., Rahim, A., Yusoff, M., & Lazim, Z. M. (2015). *Jurnal Teknologi Full Paper Preparation And Characterization Of Activated Carbon From Oil Palm Empty Fruit Bunch Wastes Using Zinc Chloride* (Vol. 74). www.jurnalteknologi.utm.my
- Zaini, M. S. M., Arshad, M., & Syed-Hassan, S. S. A. (2023). Adsorption Isotherm and Kinetic Study of Methane on Palm Kernel Shell-Derived Activated Carbon. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 8(1), 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2022.11.002>
- Zakir, M., Taba, P., Permatasari, N. U., Nurdin, M., & Muliadi. (2025). Palm kernel shell based hydrothermal carbon for methylene blue removal in wastewater treatment: application of dual adsorption isothermal models. *Journal of Ecological Engineering*, 26(7), 394–407. <https://doi.org/10.12911/22998993/203741>
- Zieliński, B., Miądlicki, P., & Przepiórski, J. (2022). Development of activated carbon for removal of pesticides from water: case study. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25247-6>