



Efisiensi Degradasi Limbah *Methylene Blue* Menggunakan Sintesis Hijau Fotokatalis ZnO Ekstrak Nanas dan Karbon Aktif Sekam Padi

(Degradation Efficiency of Methylene Blue Using Green-Synthesized ZnO Photocatalyst with Pineapple Extract and Rice Husk-Derived Activated Carbon)

Adinda Thalia Putri, Tina Anggreani Lestari, Reffa Fitrichia, Nuni Widiarti*

Program Studi Kimia, FMIPA, Universitas Negeri Semarang
 Gedung D6 Kampus Sekaran, Gunungpati, Semarang, 50229, Indonesia

*Corresponding author: nuni_kimia@mail.unnes.ac.id

DOI: [10.20961/alchemistry.21.2.95927.369-377](https://doi.org/10.20961/alchemistry.21.2.95927.369-377)

Received 6 December 2024, Revised 30 January 2025, Accepted 5 September 2025, Published 30 September 2025

Kata kunci:

fotokatalis;
 karbon aktif;
methylene blue;
 ZnO.

ABSTRAK. Pencemaran air akibat limbah zat warna seperti *methylene blue* (MB) merupakan masalah lingkungan yang serius di Indonesia. MB banyak digunakan dalam industri tekstil, kosmetik, dan farmasi, dapat menurunkan kualitas air serta menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia dan ekosistem. Fotokatalisis berbasis ZnO merupakan metode yang menjanjikan untuk mendekontaminasi air, namun keterbatasan penyerapan cahaya mengurangi efektivitasnya. Penelitian ini mengeksplorasi sintesis hijau ZnO menggunakan ekstrak nanas melalui metode presipitasi, dengan tujuan meningkatkan karakteristik dan aktivitas fotokatalitik. Selain itu, ZnO dikombinasikan dengan karbon aktif (KA) dari sekam padi dengan metode impregnasi untuk meningkatkan kinerjanya. Karakterisasi fotokatalis dilakukan menggunakan XRD, FTIR, dan BET untuk mengevaluasi sifat kristalinitas, gugus fungsi, dan luas permukaan material. Hasil XRD menunjukkan ZnO memiliki struktur wurtzit heksagonal dengan ukuran kristal 27,01 nm, sedangkan ZnO/KA memiliki ukuran 20,24 nm dengan struktur wurtzit heksagonal untuk ZnO dan struktur grafit untuk karbon. Hasil FTIR mengonfirmasi keberadaan ikatan Zn–O, C–H, dan O–H, sedangkan hasil BET menunjukkan bahwa ZnO/KA memiliki kurva distribusi pori tipe II dengan pori makro. Penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan karbon aktif secara signifikan meningkatkan efisiensi fotodegradasi MB pada berbagai pH, dengan ZnO/karbon aktif (3:1) (b/b) mencapai kinerja tertinggi, mengurangi kadar MB hingga 99,81% pada pH 8.

Keywords:

photocatalyst;
 activated carbon;
methylene blue;
 ZnO.

ABSTRACT. Water pollution caused by dye waste, such as methylene blue (MB), is a serious environmental issue in Indonesia. Widely used in the textile, cosmetic, and pharmaceutical industries, can degrade water quality and negatively impact human health and ecosystems. ZnO based photocatalysis is a promising method for water decontamination, but its limited light absorption reduces efficiency. This study explores the green synthesis of ZnO using pineapple extract via precipitation method to enhance its characteristics and photocatalytic activity. Additionally, ZnO was combined with activated carbon (AC) derived from rice husks through an impregnation to improve performance further. XRD, FTIR, and BET characterization confirmed the crystallinity, functional groups, and surface area properties. XRD analysis showed a hexagonal wurtzite structure for ZnO with a crystal size of 27.01 nm, while ZnO/AC had a size of 20.24 nm with both wurtzite and graphite structures. FTIR results verified Zn–O, C–H, and O–H bonds, and BET analysis indicated a type II macroporous distribution. Photodegradation tests revealed that ZnO/AC (3:1) (w/w) achieved the highest efficiency, reducing MB concentration by 99.81% at pH 8. These findings demonstrate that activated carbon significantly enhances the photocatalytic performance of ZnO, offering a sustainable approach for dye wastewater treatment.

PENDAHULUAN

Data statistik lingkungan hidup tahun 2023 menunjukkan 90,65% sungai di Indonesia mengalami pencemaran ringan, dimana sebanyak 83% darinya tidak membaik meski telah dilakukan upaya mitigasi. Salah satu sumber pencemaran air adalah cemaran limbah zat warna yang umum digunakan dalam berbagai sektor industri seperti tekstil, cat, kosmetik, farmasi, dan pangan (Khan *et al.*, 2022). *Methylene blue* (MB) merupakan salah satu pewarna sintetis tipe tiazina dengan nama IUPAC [7-(dimetilamino) fenotiazin-3-ilidena]-dimetilazanium klorida dengan

Cite this as: Putri, A. T., Lestari, T. A., Fitrichia, R., and Widiarti, N. (2025). Efisiensi Degradasi Limbah *Methylene Blue* Menggunakan Sintesis Hijau Fotokatalis ZnO Ekstrak Nanas Termomodifikasi Karbon Aktif Sekam Padi. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 21(2), 369-377. doi: [http://dx.doi.org/10.20961/alchemistry.21.2.95927.369-377](https://dx.doi.org/10.20961/alchemistry.21.2.95927.369-377).

berat molekul 319,9 g/mol (Mallick *et al.*, 2024). Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 16 (2019) tentang Baku Mutu Air Limbah, industri tekstil memiliki ambang batas warna maksimal 200 Pt-Co. Dengan demikian, limbah yang mengandung zat warna seperti MB tidak diperkenankan dibuang langsung ke badan air tanpa pengolahan terlebih dahulu. Limbah cair yang langsung dibuang ke perairan, dapat merusak kesehatan serta mengurangi penetrasi cahaya di perairan (Nurullita and Zainul, 2022). Beberapa metode telah digunakan dalam proses pengolahan limbah seperti biodegradasi, koagulasi dan adsorpsi (Machrouhi *et al.*, 2023). Metode tersebut kurang efektif karena menghasilkan polutan baru seperti membran atau adsorben yang sudah tidak terpakai. Fotokatalitik merupakan metode pengolahan limbah yang efektif karena akan didegradasi menjadi H_2O dan CO_2 yang tidak berbahaya (Fathy *et al.*, 2024).

Fotodegradasi adalah proses penguraian senyawa organik menjadi lebih sederhana dengan memanfaatkan energi foton melalui reaksi oksidasi dan reduksi pada permukaan material fotokatalis (Rungsawang *et al.*, 2024). Berbagai material semikonduktor telah dieksplorasi sebagai fotokatalis dalam proses fotodegradasi, masing-masing dengan keunggulan dan keterbatasan yang memengaruhi kinerjanya (Khan *et al.*, 2022). Titanium dioksida (TiO_2), merupakan semikonduktor yang memiliki stabilitas tinggi (Geng *et al.*, 2016). Namun, TiO_2 memiliki mobilitas elektron yang relatif rendah yaitu $2-50\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ untuk fase rutil dan $10-100\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ untuk fase anatase (Kavan, 2024). Hal ini membatasi efisiensi transfer muatan dalam material tersebut, sehingga meningkatkan rekombinasi *electron-hole* (Kavan, 2024). Selain itu, TiO_2 memiliki nilai energi celah pita sebesar 3,2 eV yang hanya memungkinkan penyerapan cahaya pada spektrum UV dari seluruh spektrum cahaya matahari (An *et al.*, 2018). Sementara itu, CdS (Kadmium Sulfida) memiliki energi celah pita sempit sekitar 2,62 eV, yang memungkinkan absorpsi cahaya tampak, namun tingkat toksisitas kadmium dapat menimbulkan masalah lingkungan dan kesehatan (Fard *et al.*, 2016). Hematit (Fe_2O_3), juga memiliki energi celah pita yang sempit sekitar 2,2 eV, tetapi efisiensi pemisahan muatannya yang rendah dapat mempengaruhi performanya dalam aplikasi fotokatalitik (Goudjil *et al.*, 2024). Di sisi lain, zink oksida (ZnO) menunjukkan sifat yang menjadikannya kandidat menarik sebagai fotokatalis (Rabell *et al.*, 2022). ZnO memiliki energi celah pita yang hampir sama dengan TiO_2 , yaitu 3,37 eV tetapi memiliki mobilitas elektron yang lebih tinggi, sebesar $200\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ (Han and Liu, 2021). Mobilitas elektron yang tinggi memberikan keunggulan dalam meminimalkan rekombinasi muatan, sehingga meningkatkan efisiensi pemisahan muatan (Mohamad *et al.*, 2017). Karakteristik ZnO yang aman serta mempunyai stabilitas termal baik dapat meningkatkan reaksi fotodegradasi melalui penyediaan elektron untuk membantu terbentuknya radikal hidroksil ($\cdot OH$) (Kamaraj *et al.*, 2020).

Sintesis ZnO melalui pendekatan sintesis hijau untuk mengurangi penggunaan bahan kimia, kebutuhan energi yang lebih sedikit, dan produk yang ramah lingkungan (Maharani and Nurisnaini, 2024). Ekstrak nanas merupakan salah satu pengkelat alami yang diperlukan pada proses sintesis ZnO karena dapat mencegah terjadinya aglomerasi dengan adanya asam sitrat (Rezky and Fathonah, 2019). Senyawa lain dalam nanas seperti asam oksalat juga dapat mencegah rekombinasi elektron dengan radikal hidroksil (Rhamdiyah and Maharani, 2022).

Penggabungan adsorben pada fotokatalis menjadi inovasi untuk mengatasi kekurangan fotokatalis melalui penopangan semikonduktor (Ong *et al.*, 2018). Polutan yang teradsorpsi langsung dapat dioksidasi oleh fotokatalis menjadi CO_2 dan H_2O sehingga proses degradasi polutan lebih efisien (Loke *et al.*, 2022). ZnO perlu dikompositkan dengan karbon aktif untuk meningkatkan aktivitas fotokatalitiknya karena kandungan arang aktif yang bersifat amorf, *internal surface* yang lebar, dan daya adsorpsi yang tinggi (Licona-Aguilar *et al.*, 2024; Nasrollahzadeh *et al.*, 2018). Karbon aktif merupakan material berpori dengan luas permukaan besar, sehingga memungkinkan lebih banyak molekul yang teradsorpsi (Machrouhi *et al.*, 2023). Tingginya daya adsorpsi karbon aktif mampu mengadsorpsi warna, bau, dan zat beracun lainnya (Loke *et al.*, 2022). (Ayu *et al.*, 2015) menyatakan bahwa ZnO /karbon aktif (ZnO/KA) mampu mendegradasi zat warna *Congo red* pada kondisi optimumnya dengan persentase degradasi sebesar $91,81 \pm 1,24\%$. Pada penelitian ini, penambahan arang aktif diharapkan mampu meningkatkan karakter ZnO dan aktivitas fotokataliknya untuk mendegradasi limbah zat warna MB.

METODE PENELITIAN

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi, peralatan kaca (Pyrex), *hotplate* (Thermo scientific), pH meter (Merck), timbangan analitik (Kern ABS-N), kertas saring (Whatman 41), *furnace* (Nabertherm), oven (Mettler), instrumen spektrofotometer UV-Vis (Shimadzu UVMINI 1240), FTIR (Thermo Scientific Nicolet iS10), XRD (X'Pert PRO PANalytical), dan SAA (Quantachrome NovaWin). Bahan yang digunakan dalam penelitian antara lain, sekam padi, zink nitrat tetrahidrat ($Zn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$) (Merck, 99%), natrium hidroksida (NaOH) (Merck, 99%), etanol (Merck, 70%), aquades (Waterone), dan simplisia nanas.

Metode yang dilakukan dalam penelitian ini terdiri atas beberapa tahapan yaitu, preparasi karbon aktif sekam padi, ekstraksi buah nanas, sintesis hijau ZnO, preparasi komposit ZnO/Karbon aktif sekam padi, karakterisasi material, dan uji kinerja fotodegradasi MB.

Preparasi Karbon Aktif Sekam Padi

Sekam padi dibersihkan dan dicuci menggunakan akuades, lalu dioven pada suhu 105 °C selama 24 jam. Selanjutnya sekam padi dikalsinasi dalam *muffle furnace* pada suhu 350 °C selama 1,5 jam. Karbon yang dihasilkan, dihaluskan menggunakan alu dan mortar, kemudian diayak menggunakan ayakan ukuran 50 mesh. Aktivasi arang aktif dilakukan secara kimiawi dengan mencampurkan 10 g karbon ke dalam 100 mL larutan NaOH 10% dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer*. Karbon disaring menggunakan kertas saring lalu dicuci dengan akuades hingga mencapai pH netral. Setelah itu, karbon aktif keringkan menggunakan oven pada temperatur 120 °C selama 2 jam (Garmini and Zairinayati, 2022).

Ekstraksi Buah Nanas

Sebanyak 50 g simplisia buah nanas yang telah dihaluskan dimaserasi dalam 500 mL akuades dengan rasio 1:10 gr/mL. Proses maserasi dilakukan dengan memanaskan larutan menggunakan *hot plate* pada suhu 60 °C. Pemanasan berlangsung selama 30 menit sesuai metode yang dijelaskan oleh Nida *et al.* (2023).

Sintesis Hijau ZnO

Senyawa oksida ZnO disintesis menggunakan 10 g Zink nitrat ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) dalam 200 mL air deionisasi, larutan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dan dipanaskan pada suhu 80 °C. Sambil dipanaskan ditambahkan 100 mL ekstrak nanas ke dalam larutan dan diaduk hingga homogen. Ditambahkan larutan NaOH 2M untuk mencapai pH 7. Pengadukan dilakukan selama sekitar 2 jam hingga terbentuk endapan koloid. Larutan disaring dan endapan yang dihasilkan dicuci tiga kali dengan akuades dan etanol lalu dikeringkan dalam oven pada suhu 120 °C selama 30 menit. Hasil sintesis dikalsinasi pada suhu 450 °C selama 3 jam (Nida *et al.*, 2023).

Preparasi Komposit ZnO/Karbon Aktif Sekam Padi

Komposit ZnO/KA sekam padi dibuat menggunakan metode impregnasi. Larutan zink dan ekstrak yang telah mencapai pH 7, kemudian ditambahkan karbon aktif. Rasio zink terhadap karbon aktif yang digunakan adalah 2:1 dan 3:1 (b/b).

Karakterisasi ZnO/Karbon Aktif Sekam Padi

Senyawa oksida ZnO dan komposit ZnO/KA hasil sintesis dianalisis menggunakan tiga instrumen, yaitu XRD untuk menganalisis kristalinitas, FTIR untuk menganalisis gugus fungsi, dan BET untuk mengetahui luas permukaan. Sedangkan, analit hasil fotodegradasi dianalisis dengan spektrofotometer UV-Vis untuk mengetahui persentase degradasi MB. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui pH dan rasio massa katalis yang optimal pada aktivitas fotodegradasi.

Fotodegradasi *Methylene Blue* (MB) dengan ZnO dan ZnO/KA

Sebanyak 50 mg ZnO ditambahkan 50 mL larutan kerja MB dengan konsentrasi 25 ppm pada variasi pH (6, 7, dan 8). Kinerja fotodegradasi diuji di bawah iradiasi sinar tampak menggunakan lampu LED 5 Watt selama 30 menit. Larutan disaring dengan kertas saring dan dimasukkan ke dalam botol vial untuk analisis lebih lanjut. Perlakuan yang sama juga dilakukan pada katalis ZnO/KA dan karbon aktif sebagai pembanding.

HASIL DAN PEMBAHASAN

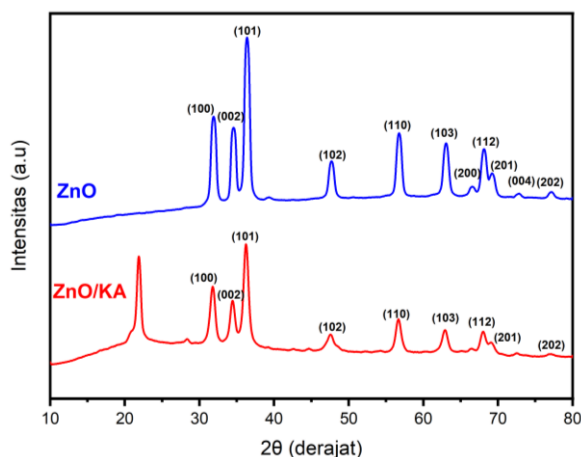
Sintesis ZnO dan ZnO/Karbon Aktif

Material ZnO telah berhasil disintesis melalui metode presipitasi dengan pendekatan sintesis hijau, menggunakan ekstrak nanas sebagai agen pengkelat alami. Dalam proses ini, ion Zink (Zn^{2+}) dari prekursor $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ berinteraksi dengan senyawa bioaktif dalam ekstrak nanas, seperti asam sitrat, yang bertindak sebagai agen pereduksi dan pengkelat. Senyawa ini membantu menstabilkan ion zink dan mendorong pembentukan inti ZnO (Nida *et al.*, 2023). Penambahan NaOH mengakibatkan perubahan pH larutan, hidrolisis ion zink, dan menghasilkan endapan $\text{Zn}(\text{OH})_2$ (Selvaraj *et al.*, 2022).

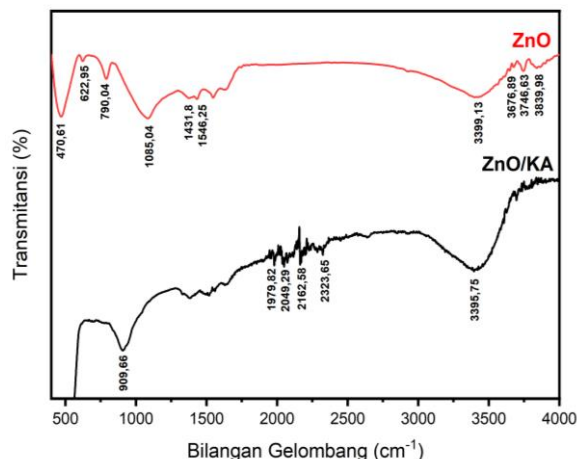
Pada tahap ini, pembuatan komposit ZnO/KA sekam padi dilakukan dengan menambahkan karbon aktif setelah larutan zink dan ekstrak nanas mencapai pH 7. Karbon aktif ditambahkan ke dalam larutan zink dengan rasio sebesar 2:1 dan 3:1. Penambahan karbon aktif bertujuan untuk meningkatkan sifat fotokatalitik ZnO dengan memperbesar luas permukaan dan meningkatkan efisiensi transfer elektron, sehingga memperkuat kemampuan degradasi fotokatalis (Loke *et al.* 2022). Setelah penambahan karbon aktif, pengadukan dilanjutkan hingga campuran homogen, memastikan distribusi merata partikel ZnO di seluruh matriks karbon aktif. Endapan koloid yang dihasilkan kemudian disaring, dicuci, dikeringkan, dan dikalsinasi pada suhu 450 °C selama 1 jam untuk menghasilkan komposit ZnO/KA dengan struktur kristalin yang stabil dan aktivitas fotokatalitik yang baik.

Karakterisasi ZnO dan ZnO/KA

Struktur kristalin dari ZnO dan ZnO/KA dianalisis menggunakan XRD dan menghasilkan grafik difraktogram pada Gambar 1. Pola difraksi XRD dari ZnO menunjukkan puncak tajam pada sudut 31,93°; 34,58°; 36,37°; 39,25°; 47,67°; 56,72°; 62,96°; 66,51°; 68,03°; 69,20°; dan 72,75° yang sesuai masing-masing dengan bidang difraksi (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201), (004), dan (202). Bidang difraksi ini adalah karakteristik dari ZnO dengan struktur wurtzit heksagonal (ICSD 98-016-7320) (Loke *et al.* 2022). Pola difraksi XRD dari ZnO/KA (3:1) menunjukkan puncak XRD yang sesuai dengan struktur wurtzit heksagonal sama seperti pola difraksi ZnO murni. Puncak diamati pada posisi sudut 2θ dengan nilai indeks Miller (hkl) yang sesuai pada 31,80° (100), 34,45° (002), 36,29° (101), 47,59° (102), 56,67° (110), 62,86° (103), 67,96° (112), dan 69,25° (201).



Gambar 1. Difraktogram XRD ZnO dan ZnO/Karbon Aktif.



Gambar 2. Hasil analisis FTIR ZnO/KA dan ZnO.

Pada pola difraksi ZnO/KA terdapat puncak tajam pada sudut 21,90° yang menunjukkan karakteristik puncak dari karbon aktif dengan struktur grafit yang sesuai dengan penelitian Naghani *et al.* (2023). Puncak-puncak difraksi yang tajam menunjukkan hasil sintesis ZnO/KA dengan kristalinitas tinggi, yang dapat meningkatkan aktivitas fotokatalisis ZnO/KA dengan membatasi rekombinasi pasangan e^-/h^+ dan menghasilkan lebih banyak *active sites* untuk reaksi yang efisien dengan molekul MB (Loke *et al.*, 2022). Ukuran rata-rata kristal hasil sintesis dari ZnO dan ZnO/KA masing-masing 27,01 dan 20,24 nm, ukuran kristal ini dianalisis dengan Persamaan 1 (Rungsawang *et al.*, 2024).

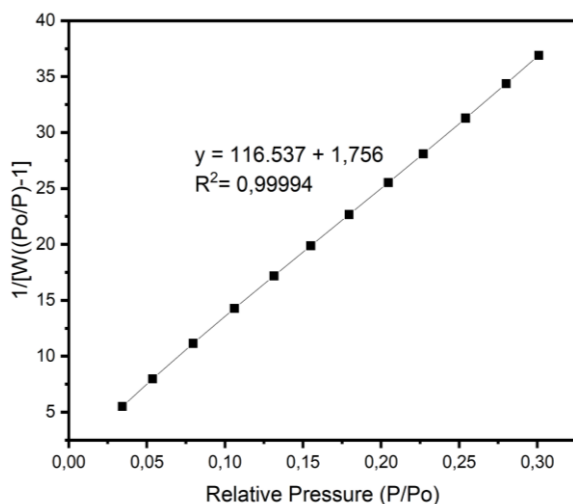
$$D = \frac{k \cdot \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

dimana k merupakan konstanta Debye-Scherrer (0,89), β adalah FWHM (radian) (*full width at half maximum*), λ (Cu K α = 0,15406 nm) adalah panjang gelombang sinar x, dan θ (°) adalah sudut difraksi Bragg yang diperoleh dari nilai 2θ yang sesuai dengan puncak intensitas maksimum dalam pola XRD.

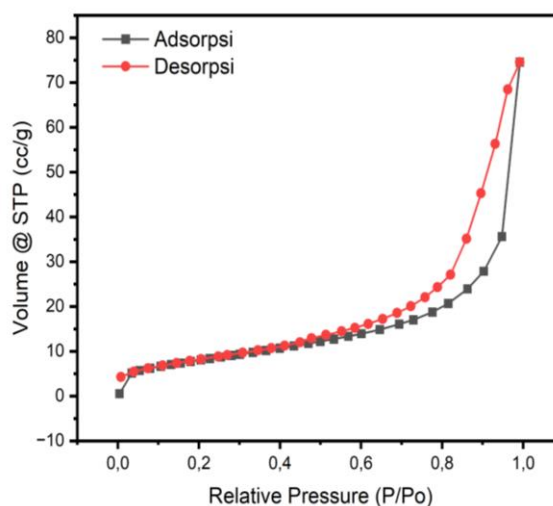
Karakterisasi gugus fungsi ZnO/KA dilakukan dengan analisis FTIR yang ditunjukkan pada Gambar 2. Gugus fungsi ZnO terdeteksi pada bilangan gelombang 622 cm⁻¹, 790 cm⁻¹ dan 1085 cm⁻¹ sebagai Zn–O *stretching* akibat adanya atom dari kisi ZnO yang bergetar (Elina *et al.*, 2023). Puncak ZnO pada 470 cm⁻¹ merupakan indikator keberhasilan pembuatan komposit dengan hasil bahwa karbon aktif memiliki gugus fungsi Zn–O (Rungsawang *et al.*, 2024). Gugus fungsi C–H dihasilkan pada panjang gelombang 675 cm⁻¹ hingga 995 cm⁻¹.

Gugus fungsi C–O yang dihasilkan dari karbon aktif sekam padi berada pada panjang gelombang 1431 cm^{-1} dan 1546 cm^{-1} . Puncak serapan terdapat pada bilangan gelombang $3200 - 3500\text{ cm}^{-1}$ yang menandakan adanya O–H stretching (Fanani and Ulfindrayani, 2019).

Beberapa sifat luas permukaan, ukuran, serta volume pori dipelajari melalui analisis BET. Gambar 3 menunjukkan kurva BET *multipoint* yang digunakan untuk menentukan luas permukaan. Berdasarkan Tabel 1, luas permukaan dan porositas ZnO/Karbon aktif adalah $29,440\text{ m}^2/\text{g}$ dan volume pori sebesar $0,1153\text{ cm}^3/\text{g}$ dengan volume kumulatif pori BJH mencapai $0,1097\text{ cm}^3/\text{g}$, sedangkan volume kumulatif BJH pada desorpsi sekitar $0,115\text{ cm}^3/\text{g}$. Parameter ini menunjukkan kemampuan pori untuk difusi molekul pewarna yang memiliki ukuran lebih kecil daripada nilai-nilai tersebut. Dengan luas permukaan yang tinggi dan struktur berpori akan meningkatkan transfer target dari larutan ke permukaan fotokatalis (Licona–Aguilar *et al.*, 2024).



Gambar 3. Grafik *multipoint* BET.



Gambar 4. Grafik isoterm adsorpsi-desorpsi N_2 .

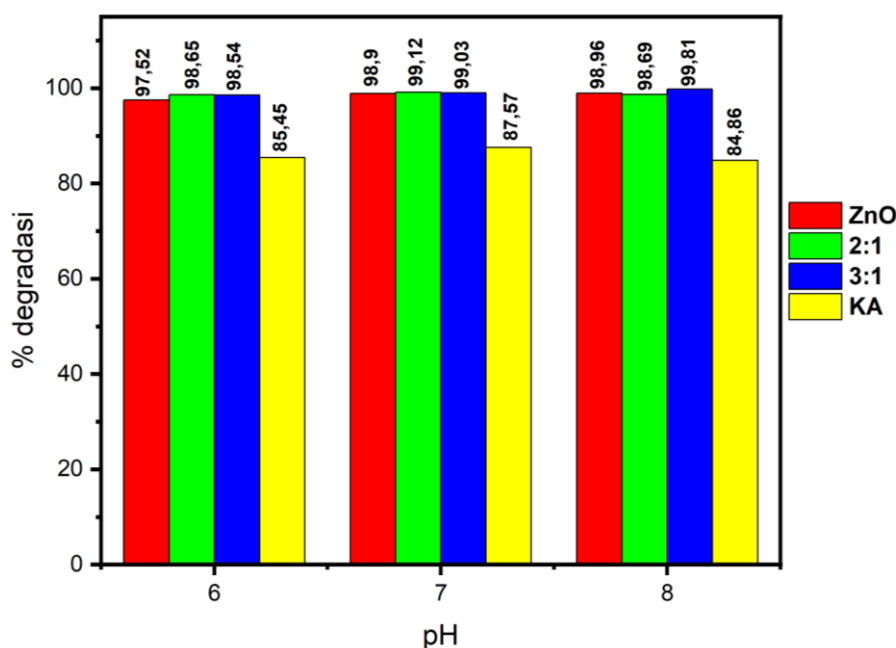
Kurva isoterm adsorpsi-desorpsi pada Gambar 4 menunjukkan bahwa material hasil sintesis memiliki karakteristik isoterm Tipe II yang diasosiasikan dengan proses adsorpsi multilapis pada permukaan makroporous. Pada tekanan relatif rendah, peningkatan adsorpsi menunjukkan pengisian mikropori, sementara pada tekanan mendekati $P/P_o = 1$, kenaikan signifikan mengindikasikan keberadaan makropori (Saini *et al.*, 2017). Pada kurva tersebut juga terlihat adanya loop histeresis yang disebabkan oleh kondensasi dan penguapan kapiler (Loke *et al.*, 2022). Loop histeresis yang teramati merupakan loop tipe C, yang berkaitan dengan struktur pori yang tidak seragam dan adanya konektivitas antarpori, sehingga mengindikasikan distribusi pori yang kompleks pada material ZnO/KA hasil sintesis (Zhang *et al.*, 2023).

Tabel 1. Karakteristik ZnO/Karbon aktif berdasarkan data BET.

Karakteristik	Detil Karakteristik	Besaran
Luas Permukaan	Luas permukaan BET	$29,44\text{ m}^2/\text{g}$
	Luas permukaan langmuir	$47,09\text{ m}^2/\text{g}$
	Luas permukaan eksternal t-Plot	$29,44\text{ m}^2/\text{g}$
Volume Pori	Volume total pori adsorpsi titik tunggal untuk radius kurang dari 1147.87 Å pada $P/P_o = 0.991581$	$0,1153\text{ cm}^3/\text{g}$
	Metode BJH untuk volume pori akumulasi adsorpsi	$0,1097\text{ cm}^3/\text{g}$
	Metode BJH untuk volume pori akumulasi desorpsi	$0,1151\text{ cm}^3/\text{g}$
		$0,1151\text{ cm}^3/\text{g}$
Ukuran Pori	Rata-rata radius pori	$78,33\text{ Å}$
	Rata-rata radius pori adsorpsi metode BJH	$15,51\text{ Å}$
	Rata-rata radius pori desorpsi metode BJH	$18,59\text{ Å}$

Uji Kinerja Fotokatalis

Uji kinerja fotokatalis dilakukan dengan mencampurkan 50 mg fotokatalis (ZnO, ZnO/KA (2:1 dan 3:1), serta KA) ke dalam 50 mL larutan MB berkonsentrasi 25 ppm. Hasil efisiensi yang diperoleh ditunjukkan dalam [Gambar 5](#). Hasil pengukuran absorbansi dan perhitungan efisiensi yang diperoleh ditampilkan dalam *Supplementary Information* (SI) [Gambar S1](#) dan [Tabel S1 – S4](#). [Gambar 5](#) menunjukkan efisiensi degradasi MB menggunakan ZnO/KA (3:1) pada pH 8 memiliki persentase degradasi yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan ZnO murni, ZnO/KA (2:1), dan KA murni. Perbedaan dikaitkan dengan jumlah ZnO yang lebih besar pada komposit ZnO/KA (3:1), sehingga berpotensi menghasilkan radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$) lebih banyak ([Nasrollahzadeh et al., 2018](#)). Secara teori, pada lingkungan pH asam, permukaan adsorben menjadi bermuatan positif akibat protonasi gugus karboksilat dan amino, sehingga mengurangi kapasitas adsorpsi karena tolakan elektrostatis dengan molekul MB yang juga bermuatan positif. Sebaliknya, pada pH basa jumlah ion hidroksil meningkat, mendorong pembentukan radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$) melalui proses oksidasi, sehingga degradasi MB lebih besar ([Khan et al., 2022](#)). Selain itu, gaya tarik elektrostatis pada lingkungan pH basa juga memperkuat interaksi antara partikel fotokatalis dengan MB, sehingga meningkatkan hasil degradasi ([Noorimotlagh et al., 2016](#)).



Gambar 5. Hasil fotodegradasi MB dengan katalis ZnO/KA pada berbagai pH.

Efisiensi degradasi MB menggunakan fotokatalis komposit ZnO/KA pada kondisi optimal mencapai 99,81%, menunjukkan kecenderungan peningkatan hasil degradasi. Karbon aktif dengan struktur grafitnya menyediakan luas permukaan dan kapasitas adsorpsi yang besar, sekaligus memfasilitasi transfer elektron serta mobilisasi molekul MB menuju permukaan ZnO ([Naghani et al., 2023](#)). Mekanisme ini membuat molekul MB lebih terakumulasi pada permukaan fotokatalis sehingga lebih mudah terurai oleh radikal $\cdot\text{OH}$ ([Saini et al., 2017](#)). Secara keseluruhan hasil analisis degradasi menunjukkan persentase degradasi tertinggi sebesar 99,81% oleh fotokatalis ZnO/KA (3:1) pada lingkungan pH 8. Akan tetapi, nilai efisiensi degradasi menggunakan fotokatalis ZnO/KA (3:1) pada pH 8 ini dinilai tidak berbeda cukup signifikan dengan nilai efisiensi degradasi pada kondisi pH 6 – 7. Hal ini dimungkinkan rentang pH 6 – 8, peningkatan konsentrasi $\cdot\text{OH}$ tidak terlalu signifikan dalam memengaruhi perbedaan efisiensi degradasi.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mensintesis fotokatalis ZnO/KA dan telah dibuktikan melalui berbagai teknik analisis serta menunjukkan potensi signifikan dalam fotodegradasi *Methylene Blue* (MB). Karakterisasi FTIR mengkonfirmasi adanya gugus fungsi Zn–O dan C–H pada ZnO/KA, serta indikasi adanya O–H *stretching* yang mendukung kemampuan adsorpsi dari fotokatalis tersebut. Analisis XRD mengungkapkan bahwa baik ZnO maupun ZnO/KA memiliki struktur kristalin wurtzit heksagonal, dengan ZnO/KA menunjukkan kristalinitas yang

tinggi dan ukuran kristal yang lebih kecil dibandingkan dengan ZnO murni, yang dapat meningkatkan efisiensi fotokatalisis. Karakterisasi BET menunjukkan bahwa ZnO/KA memiliki luas permukaan dan volume pori yang cukup tinggi, mendukung kapasitas adsorpsi yang baik dan transfer target dari larutan ke permukaan fotokatalis. Hasil fotodegradasi MB menunjukkan bahwa ZnO/KA (3:1) memiliki efisiensi tertinggi dalam mendegradasi MB dengan persentase degradasi berkisar 99% pada pH 6 – 8.

INFORMASI PENDUKUNG

Gambar S1 dan Tabel S1 – S4 tersedia dalam Informasi Tambahan (*Supplementary Information*) yang dapat dilihat pada tautan <https://jurnal.uns.ac.id/alchemy/article/view/92355/supp.info>.

KONFLIK KEPENTINGAN

Tidak ada konflik kepentingan dalam artikel ini.

KONTRIBUSI PENULIS

ATP: Konseptualisasi, Analisis Data, Visualisasi, Penulisan Draf Manuskrip; TAL: Metodologi, Analisis Data, Penulisan Draf Manuskrip; RF: Pengumpulan Data, Penulisan Draf Manuskrip; NW: Supervisi, Telaah, dan Penyuntingan Manuskrip.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Negeri Semarang (UNNES) yang telah memberikan dukungan dana pembinaan. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Jurusan Kimia UNNES yang telah memfasilitasi pelaksanaan penelitian ini, mulai dari penyediaan sarana dan prasarana hingga dukungan teknis yang sangat membantu.

PERNYATAAN PENGGUNAAN AI

Dalam penyusunan artikel ini, penulis menggunakan ChatGPT-5 untuk menyempurnakan bahasa. Setelah menggunakan *tool* ini, penulis tetap meninjau dan mengedit isinya sesuai kebutuhan serta bertanggung jawab penuh atas isi artikel yang diterbitkan.

DAFTAR PUSTAKA

- An, G.W., Mahadik, M.A., Chae, W.-S., Kim, H.G., Cho, M., and Jang, J.S., 2018. Enhanced Solar Photoelectrochemical Conversion Efficiency of the Hydrothermally-Deposited TiO₂ Nanorod Arrays: Effects of the Light Trapping and Optimum Charge Transfer. *Applied Surface Science*, 440, 688–699. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.194>.
- Ayu, G., Saraswati, A., Diantariani, N.P., and Suarya, D.P., 2015. Fotodegradasi Zat Warna Tekstil *Congo Red* dengan Fotokatalisis ZnO-Arang Aktif dan Sinar Ultraviolet (UV). *Jurnal Kimia*, 9.
- Naghani, M.E., Neghabi, M., Zadsar, M., and Abbastabar Ahangar, H., 2023. Synthesis and Characterization of Linear/Nonlinear Optical Properties of Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide-Based Zinc Oxide Nanocomposite. *Scientific Reports*, 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28307-7>.
- Elina, R., Cintya Rori, D., Ardi, and Khair, M., 2023. Karakterisasi FTIR Pada Karbon Aktif Terimpregnasi ZnO. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 7.
- Fanani, N., and Ulfendrayani, I.F., 2019. Synthesis of Activated Carbon (AC) from Bamboo Waste as A Support of Zinc Oxide (ZnO) Catalyst. *Konversi*, 8, 108–112. <https://doi.org/10.20527/k.v8i2.7183>.
- Fard, N.E., Fazaeli, R., and Ghiasi, R., 2016. Band Gap Energies and Photocatalytic Properties of CdS and Ag/CdS Nanoparticles for Azo Dye Degradation. *Chemical Engineering and Technology*, 39. <https://doi.org/10.1002/ceat.201500116>.
- Fathy, N., Fathy, S., Ali, F., and Mousa, S., 2024. Effective Sunlight Photodegradation of Methylene Blue Dye Using Zinc Oxide Doped with Mono- and Bi-Metals of Ag and Ce. *Desalination and Water Treatment*, 320, 100595. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100595>.
- Garmini, R., and Zairinayati, Z., 2022. Penurunan Kadar Fosfat Limbah Cair Usaha Laundry dengan Karbon Aktif Sekam Padi. *Jurnal Delima Harapan*, 9, 71–76. <https://doi.org/10.31935/delima.v9i1.152>.
- Geng, Z., Chen, X., Yang, W., Guo, Q., Xu, C., Dai, D., and Yang, X., 2016. Highly Efficient Water Dissociation on Anatase TiO₂ (101). *The Journal of Physical Chemistry C*, 120, 26807–26813. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b07774>.

- Goudjil, M.B., Dali, H., Zighmi, S., Mahcene, Z., and Bencheikh, S.E., 2024. Photocatalytic Degradation of Methylene Blue Dye with Biosynthesized Hematite $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ Nanoparticles under UV-Irradiation. *Desalination and Water Treatment*, 317, 100079. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100079>.
- Han, J., and Liu, Z., 2021. Optimization and Modulation Strategies of Zinc Oxide-Based Photoanodes for Highly Efficient Photoelectrochemical Water Splitting. *ACS Applied Energy Materials*, 4, 1004–1013. <https://doi.org/10.1021/acsaem.0c02985>.
- Kamaraj, M., Srinivasan, N.R., Assefa, G., Adugna, A.T., and Kebede, M., 2020. Facile Development of Sunlit ZnO Nanoparticles-Activated Carbon Hybrid from Pernicious Weed as an Operative Nano-Adsorbent for Removal of Methylene Blue and Chromium from Aqueous Solution: Extended Application in Tannery Industrial Wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, 17, 100540. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100540>.
- Kavan, L., 2024. Electrochemistry and Band Structure of Semiconductors (TiO_2 , SnO_2 , ZnO): Avoiding Pitfalls and Textbook Errors. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 28, 829–845. <https://doi.org/10.1007/s10008-023-05770-w>.
- Khan, Idrees, Saeed, K., Zekker, I., Zhang, B., Hendi, A.H., Ahmad, A., Ahmad, S., Zada, N., Ahmad, H., Shah, L.A., Shah, T., and Khan, Ibrahim, 2022. Review on Methylene Blue: Its Properties, Uses, Toxicity and Photodegradation. *Water (Switzerland)*, 14, 242. <https://doi.org/10.3390/w14020242>.
- Licona-Aguilar, A.I., Torres-Huerta, A.M., Domínguez-Crespo, M.A., Negrete-Rodríguez, M.L.X., Conde-Barajas, E., Brachetti-Sibaja, S.B., and Rodríguez-Salazar, A.E., 2024. Valorization of Agroindustrial Orange Peel Waste during the Optimization of Activated Carbon–Multiwalled Carbon Nanotubes–Zinc Oxide Composites Used in the Removal of Methylene Blue in Wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 492, 152102. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152102>.
- Loke, J.Y., Mohd Zaki, R.S., and Setiabudi, H.D., 2022. Photocatalytic Degradation of Methylene Blue Using ZnO Supported on Wood Waste-Derived Activated Carbon (ZnO/AC). *Materials Today: Proceedings*, 57. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.535>.
- Machrouhi, A., Khiar, H., Elhalil, A., Sadiq, M., Abdennouri, M., and Barka, N., 2023. Synthesis, Characterization, and Photocatalytic Degradation of Anionic Dyes Using a Novel ZnO/Activated Carbon Composite. *Watershed Ecology and the Environment*, 5, 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.wsee.2022.12.001>.
- Maharani, D.K., and Nurisnaini, R., 2024. Nanopartikel TiO_2 dari Ekstrak Daun Kemangi (*Ocimum sanctum*) untuk Degradasi Metilen Biru. *Algoritma: Jurnal Matematika, Ilmu pengetahuan Alam, Kebumihan dan Angkasa*, 2, 57–66. <https://doi.org/10.62383/algoritma.v2i3.59>.
- Mallick, S., Barik, D., and Pradhan, N., 2024. *Commelina erecta*, L. Biomass-silver Nanoparticle Composite as a Heterogeneous Catalyst for Methylene Blue Degradation. *Applied Catalysis O: Open*, 192, 206939. <https://doi.org/10.1016/j.apcato.2024.206939>.
- Mohamad, I.S., Ismail, S.S., Norizan, M.N., Murad, S.A.Z., and Abdullah, M.M.A., 2017. ZnO Photoanode Effect on the Efficiency Performance of Organic Based Dye Sensitized Solar Cell. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 209, 012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/209/1/012028>.
- Nasrollahzadeh, M.S., Hadavifar, M., Ghasemi, S.S., and Arab Chamjangali, M., 2018. Synthesis of ZnO Nanostructure Using Activated Carbon for Photocatalytic Degradation of Methyl Orange from Aqueous Solutions. *Applied Water Science*, 8, 104. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0750-6>.
- Nida, V., Saraswat, V., Nissa, R.C., Endah, E.S., Ratnaningrum, D., Risdian, C., and Setiyanto, H., 2023. Antibacterial Potential of Zinc Oxide Nanoparticles Derived from Pineapple Peel Aqueous Extract. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1201, 012086. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1201/1/012086>.
- Noorimotlagh, Z., Darvishi Cheshmeh Soltani, R., Shams Khorramabadi, Gh., Godini, H., and Almasian, M., 2016. Performance of Wastewater Sludge Modified with Zinc Oxide Nanoparticles in the Removal of Methylene Blue from Aqueous Solutions. *Desalination and Water Treatment*, 57, 1684–1692. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.977954>.
- Nurullita, N., and Zainul, R., 2022. Pengaruh Pengadukan pada Degradasi Methylene Blue Menggunakan Katalis ZnO Terdoping Cu. *Jurnal Periodic Jurusan Kimia UNP*, 11. <https://doi.org/10.24036/p.v11i3.115089>.
- Ong, C.B., Ng, L.Y., and Mohammad, A.W., 2018. A Review of ZnO Nanoparticles as Solar Photocatalysts: Synthesis, Mechanisms and Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 536–551. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.020>.
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 16 Tentang Baku Mutu Air Limbah, 2019. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Jakarta.

- Rabell, G.O., Alfaro Cruz, M.R., and Juárez-Ramírez, I., 2022. Photoelectrochemical (PEC) Analysis of ZnO/Al Photoelectrodes and Its Photocatalytic Activity for Hydrogen Production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 7770–7782. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.107>.
- Rezky, A.N., and Fathonah, I.W., 2019. Optimasi Suhu Kalsinasi terhadap Sintesis Nanostruktur ZnO sebagai Fotokatalis dengan Memanfaatkan Buah Nanas Sebagai Pengkelat, in: *E-Proceeding of Engineering*. pp. 5152–5159.
- Rhamdiyah, F.K., and Maharani, D.K., 2022. Biosynthesis of ZnO Nanoparticles from Aqueous Extract of *Moringa oleifera* L.: Its Application as Antibacterial and Photocatalyst. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 11. <https://doi.org/10.15294/ijcs.v11i2.52498>.
- Rungsawang, T., Krobthong, S., Paengpan, K., Kaewtrakulchai, N., Manatura, K., Eiad-Ua, A., Boonruang, C., and Wongrerkdee, S., 2024. Synergy of Functionalized Activated Carbon and ZnO Nanoparticles for Enhancing Photocatalytic Degradation of Methylene Blue and Carbaryl. *Radiation Physics and Chemistry*, 223, 111924. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111924>.
- Saini, J., Garg, V.K., Gupta, R.K., and Kataria, N., 2017. Removal of Orange G and Rhodamine B Dyes from Aqueous System Using Hydrothermally Synthesized Zinc Oxide Loaded Activated Carbon (ZnO-AC). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5, 884–892. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.01.012>.
- Selvaraj, S., Patrick D, S., Vangari, G.A., Mohan, M.K., S, P., and C, M., 2022. Facile Synthesis of Sm Doped ZnO Nanoflowers by Coprecipitation Method for Enhanced Photocatalytic Degradation of MB Dye under Sunlight Irradiation. *Ceramics International*, 48, 29049–29058. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.04.299>.
- Tiwana, P., Docampo, P., Johnston, M.B., Snaith, H.J., and Herz, L.M., 2011. Electron Mobility and Injection Dynamics in Mesoporous ZnO, SnO₂, and TiO₂ Films Used in Dye-Sensitized Solar Cells. *ACS Nano*, 5, 5158–5166. <https://doi.org/10.1021/nn201243y>.
- Zhang, Y., Li, J., Tan, J., Li, W., Singh, B.P., Yang, X., Bolan, N., Chen, X., Xu, S., Bao, Y., Lv, D., Peng, A., Zhou, Y., and Wang, H., 2023. An Overview of the Direct and Indirect Effects of Acid Rain on Plants: Relationships among Acid Rain, Soil, Microorganisms, and Plants. *Science of the Total Environment*, 873, 162388. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162388>.