



Homepage Journal: <https://jurnal.unismuhpalu.ac.id/index.php/JKS>

Optimalisasi Kinerja Fotokatalitik Komposit ZnO/rGO Berbasis Limbah Cangkang Sawit untuk Degradasi Methylene Blue

Optimization of Photocatalytic Performance of ZnO/rGO Composite Based on Palm Kernel Shell Waste for Methylene Blue Degradation

Poppy Anggara Kasih¹, Riski Ramadani², Munasir³

^{1,2,3} Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia

*Corresponding Author: munasir@unesa.ac.id

Artikel Penelitian

Article History:

Received: 26 Sep, 2025

Revised: 30 Nov, 2025

Accepted: 10 Nov, 2025

Kata Kunci:

Komposit ZnO/rGO;

Fotokatalisis;

Degradasi metilena biru;

Pengolahan air limbah.

Keywords:

ZnO/rGO Composite;

Photocatalysis;

Methylene Blue Degradation;

Wastewater Treatment.

DOI: [10.56338/jks.v8i12.9403](https://doi.org/10.56338/jks.v8i12.9403)

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan kinerja fotokatalitik ZnO dengan menggabungkan graphene oxide tereduksi (rGO) untuk degradasi metilen biru (MB), pewarna persisten yang umum ditemukan dalam air limbah tekstil. Penelitian ini meliputi sintesis komposit ZnO/rGO, karakterisasi sifat struktural dan optiknya, dan evaluasi efisiensi fotokatalitiknya. Material dikarakterisasi menggunakan XRD, FTIR, spektroskopi Raman, SEM-EDX, dan analisis UV-Vis untuk mengonfirmasi pembentukan komposit dan memeriksa perubahan energi celah pita. Aktivitas fotokatalitik dinilai melalui degradasi MB di bawah iradiasi UV pada dua konsentrasi. Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan rGO meningkatkan penyerapan cahaya, meningkatkan transfer elektron, dan mengurangi rekombinasi elektron-lubang dibandingkan dengan ZnO murni. Komposit ZnO/rGO yang mengandung 10% rGO mencapai efisiensi degradasi tertinggi, mencapai 99,1% pada 30 ppm dan 98,9% pada 60 ppm. Temuan ini menunjukkan bahwa rGO secara signifikan meningkatkan sifat struktural dan fotokatalitik ZnO, menjadikan komposit ZnO/Rgo, terutama pada 10% rGO, sebagai material yang menjanjikan dan ramah lingkungan untuk pengolahan air limbah yang terkontaminasi pewarna.

ABSTRACT

This study aims to optimize the photocatalytic performance of ZnO by incorporating reduced graphene oxide (rGO) for the degradation of methylene blue (MB), a persistent dye commonly found in textile wastewater. The research includes the synthesis of ZnO/rGO composites, characterization of their structural and optical properties, and evaluation of their photocatalytic efficiency. The materials were characterized using XRD, FTIR, Raman spectroscopy, SEM-EDX, and UV-Vis analysis to confirm composite formation and examine changes in band gap energy. The photocatalytic activity was assessed through the degradation of MB under UV irradiation at two concentrations. The results show that the addition

of rGO enhances light absorption, improves electron transfer, and reduces electron–hole recombination compared to pure ZnO. The ZnO/rGO composite containing 10% rGO achieved the highest degradation efficiency, reaching 99.1% at 30 ppm and 98.9% at 60 ppm. These findings demonstrate that rGO significantly improves the structural and photocatalytic properties of ZnO, making the ZnO/rGO composite, particularly at 10% rGO, a promising and environmentally friendly material for the treatment of dye-contaminated wastewater.

PENDAHULUAN

Pencemaran air akibat pembuangan limbah industri tekstil masih menjadi salah satu permasalahan lingkungan yang paling serius di Indonesia (Siregar & Kiswiranti, 2020). Salah satu pewarna sintetis yang paling sering ditemukan dalam limbah tersebut adalah *methylene blue* (MB), yaitu pewarna kationik berstruktur cincin aromatik yang bersifat toksik, persisten, dan sulit terurai secara alami (Elgharbi et al., 2024). Keberadaan MB dalam perairan dapat menurunkan kualitas air, menghambat proses fotosintesis organisme akuatik, serta menimbulkan berbagai dampak kesehatan seperti iritasi kulit, gangguan saluran pernapasan, dan gangguan pencernaan (Krishna Moorthy et al., 2021). Kondisi ini menjadikan pengembangan teknologi efektif untuk menghilangkan MB dari lingkungan sebagai suatu kebutuhan mendesak. Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan untuk mengatasi polutan organik seperti MB adalah teknologi fotokatalisis, yakni proses degradasi senyawa menggunakan energi cahaya dan katalis semikonduktor (Rorissa et al., 2025). Zinc oxide (ZnO) merupakan salah satu material semikonduktor yang banyak digunakan karena harganya murah, stabil secara kimia, tidak beracun, dan memiliki band gap yang sesuai untuk tereksitasi oleh cahaya ultraviolet (Wu et al., 2023). Meskipun demikian, ZnO memiliki keterbatasan, yaitu tingginya laju rekombinasi pasangan elektron–hole yang mengurangi efektivitas pembentukan radikal reaktif selama proses fotodegradasi. Selain itu, aktivitas ZnO murni cenderung terbatas pada daerah UV, sehingga diperlukan modifikasi material untuk meningkatkan kinerja fotokatalitiknya (Murugan et al., 2024).

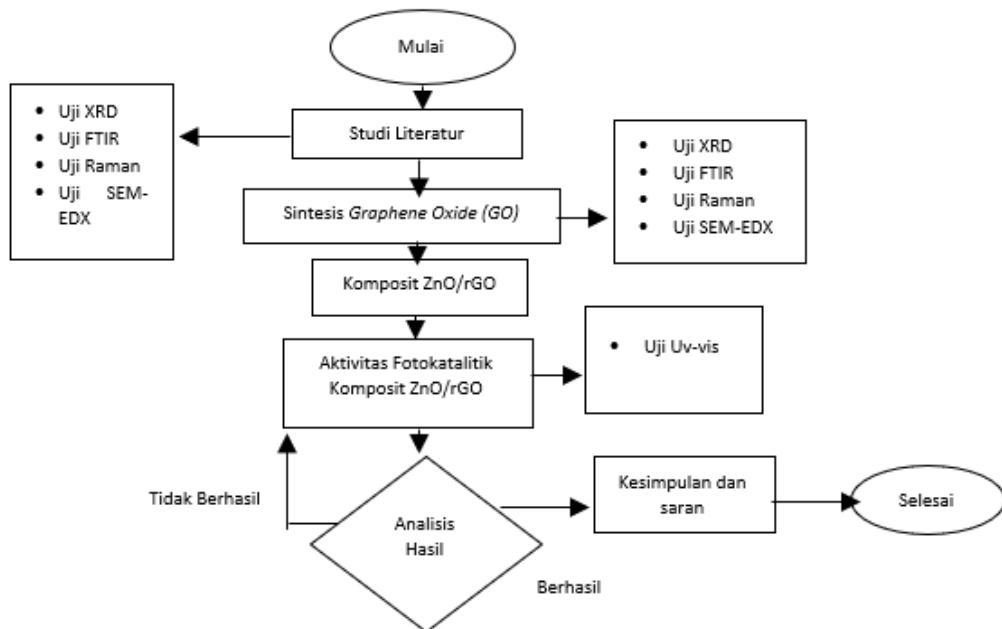
Salah satu strategi yang terbukti efektif untuk memperbaiki kinerja ZnO adalah dengan mengombinasikannya dengan *reduced graphene oxide* (rGO) (Han et al., 2022). rGO memiliki luas permukaan yang sangat besar, konduktivitas elektron tinggi, serta mampu berperan sebagai akseptor elektron sehingga menekan laju rekombinasi elektron–hole pada ZnO (Thuy et al., 2024). Pembentukan komposit ZnO/rGO dapat meningkatkan jumlah situs aktif, memperluas kontak antara katalis dengan molekul MB, serta mempercepat transfer muatan selama proses fotokatalisis. Penambahan rGO juga terbukti menurunkan energi band gap komposit menjadi sekitar 2,94–2,81 eV, sehingga meningkatkan kemampuan material dalam menyerap cahaya dan memperkuat aktivitas fotokatalitik (Madi et al., 2024). Dalam penelitian ini, rGO disintesis menggunakan limbah cangkang kelapa sawit yang memiliki kandungan karbon tinggi dan tersedia melimpah di Indonesia. Pemanfaatan limbah biomassa sebagai sumber karbon tidak hanya menurunkan biaya produksi, tetapi juga mendukung prinsip green synthesis serta memberikan nilai tambah pada limbah pertanian yang sebelumnya kurang dimanfaatkan. Hasil karakterisasi dan uji performa menunjukkan bahwa komposit ZnO/rGO memberikan peningkatan signifikan terhadap efisiensi fotodegradasi MB dibandingkan ZnO murni (Dai et al., 2021). Pada konsentrasi MB 30 ppm, ZnO/rGO 10% mencapai degradasi hingga 99,1%, lebih tinggi dibandingkan ZnO/rGO 5% (98,8%) maupun ZnO murni (98,5%). Tren serupa juga terlihat pada konsentrasi 60 ppm, di mana ZnO/rGO 10% tetap menunjukkan nilai degradasi tertinggi, yaitu 98,9%. Peningkatan fraksi rGO terbukti berperan penting dalam memperbaiki proses transfer elektron, menurunkan energi band gap, serta meningkatkan efisiensi degradasi MB selama proses fotokatalisis.

Dengan mempertimbangkan tingginya kebutuhan teknologi pengolahan limbah pewarna, potensi besar ZnO yang dimodifikasi rGO sebagai fotokatalis, serta ketersediaan limbah biomassa lokal sebagai sumber karbon, maka penelitian mengenai optimalisasi kinerja fotokatalitik komposit ZnO/rGO

menjadi sangat relevan untuk dilakukan. Perbandingan kinerja antara ZnO, ZnO/rGO 5%, dan ZnO/rGO 10% memberikan gambaran mendalam mengenai pengaruh variasi rGO terhadap efisiensi degradasi MB, spektrum UV-Vis, energi band gap, dan laju fotodegradasi. Hasil ini dapat menjadi dasar pengembangan material fotokatalis yang lebih efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan di masa mendatang.

METODE

Penelitian ini diawali dengan studi literatur yang difokuskan pada teknik sintesis *graphene oxide* (GO), pembentukan komposit ZnO/rGO, serta prinsip dasar fotokatalisis dan metode karakterisasi material, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1. Sintesis GO dilakukan menggunakan metode Hummers termodifikasi dengan memanfaatkan bahan prekursor karbon, yang selanjutnya dikeringkan dan digunakan sebagai material dasar dalam pembuatan komposit (Kusrini et al., 2019). Komposit ZnO/rGO disintesis melalui proses pencampuran GO dengan ZnO diikuti tahap reduksi dan pemanasan untuk memperoleh material dengan variasi fraksi rGO, yaitu 5% dan 10%. Material GO, ZnO, dan komposit ZnO/rGO yang dihasilkan kemudian dikarakterisasi menggunakan berbagai instrumen, termasuk *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengidentifikasi struktur kristal dan ukuran kristalit, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk menentukan gugus fungsi yang terbentuk, *Raman Spectroscopy* untuk mengonfirmasi struktur grafen serta interaksinya dengan ZnO, dan *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX) untuk mengamati morfologi permukaan dan komposisi unsur dari sampel.



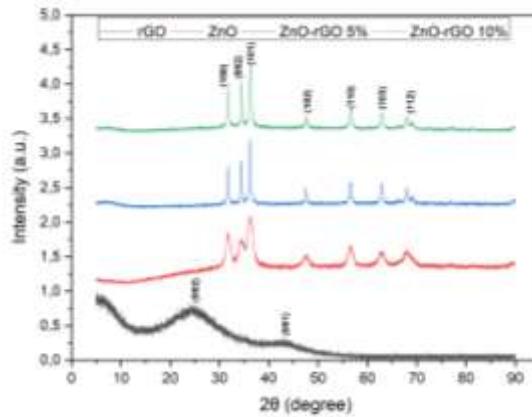
Gambar 1. Diagram alir tahapan penelitian sintesis komposit ZnO/rGO dan pengujian aktivitas fotokatalitik terhadap degradasi metilena biru

Dari Gambar 1, setelah karakterisasi dilakukan, material komposit ZnO/rGO diuji aktivitas fotokatalitiknya terhadap degradasi larutan metilena biru (MB). Proses fotodegradasi dilakukan dengan menyiapkan larutan MB yang telah dicampur dengan fotokatalis menggunakan cahaya UV, kemudian penurunan konsentrasi MB dianalisis melalui pengukuran absorbansi menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada interval waktu tertentu. Data absorbansi yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menghitung persentase degradasi dan menyusun grafik laju fotodegradasi. Hasil karakterisasi dan

pengujian fotokatalitik kemudian dianalisis untuk mengevaluasi efek penambahan rGO terhadap kinerja ZnO dalam mendegradasi MB, termasuk pengaruhnya terhadap band gap, morfologi partikel, dan efisiensi reaksi fotokatalitik.

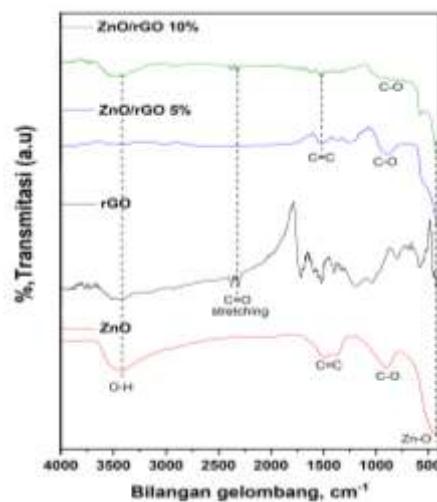
HASIL

Hasil karakterisasi menggunakan X-Ray Diffraction (XRD) menunjukkan pola difraksi khas struktur kristal wurtzite hexagonal pada ZnO. Pada komposit ZnO/rGO, pola difraksi masih mempertahankan karakteristik ZnO dengan sedikit pergeseran intensitas yang menandakan keberhasilan pembentukan komposit. Puncak khas GO tidak terlihat jelas pada komposit karena jumlahnya relatif kecil dan tertutupi oleh sinyal ZnO.



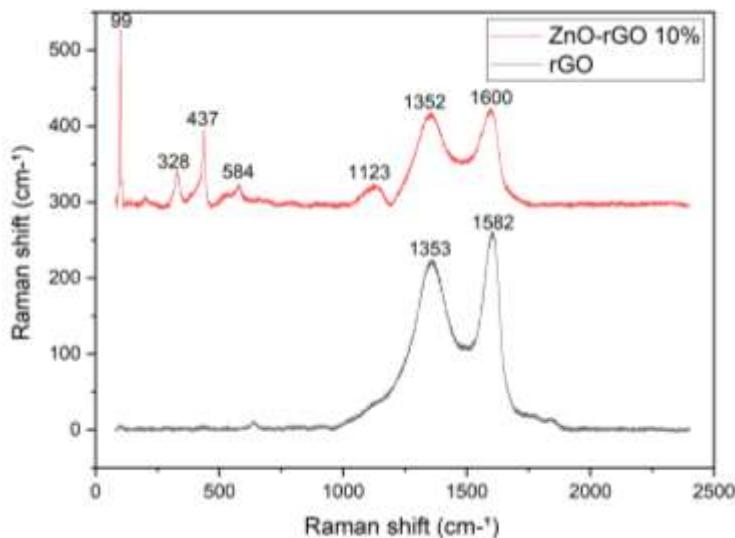
Gambar 2. Pola difraksi XRD ZnO, GO, dan komposit ZnO/rGO.

Spektrum FTIR memperlihatkan keberadaan gugus O–H, C=O, dan C–O pada GO, serta pita serapan pada daerah 400–500 cm⁻¹ yang mengindikasikan vibrasi Zn–O. Pada komposit ZnO/rGO, gugus fungsi dari kedua material muncul secara bersamaan, menunjukkan interaksi antara ZnO dan rGO dalam struktur komposit.



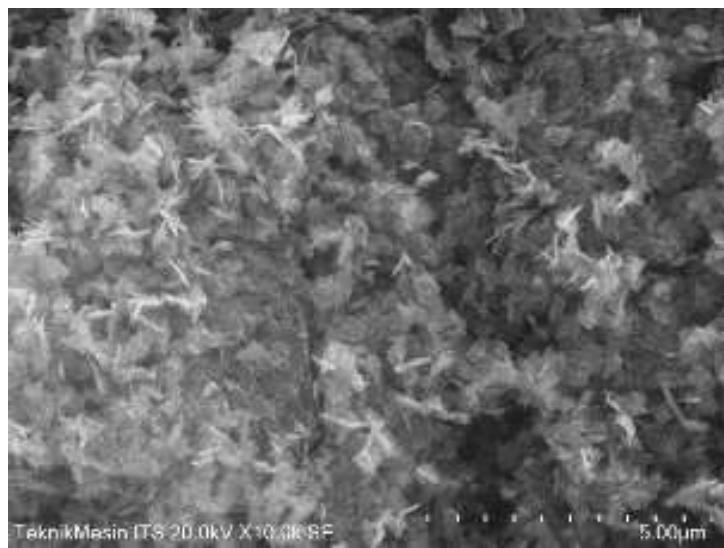
Gambar 3. Spektrum FTIR ZnO, GO, dan komposit ZnO/rGO.

Hasil karakterisasi Raman menampilkan pita D dan G khas material berbasis grafena pada GO dan rGO, serta puncak karakteristik vibrasi ZnO. Komposit ZnO/rGO menunjukkan kedua jenis puncak secara bersamaan, menandakan keberadaan rGO dalam struktur ZnO.



Gambar 4. Spektrum Raman ZnO, GO, dan komposit ZnO/rGO.

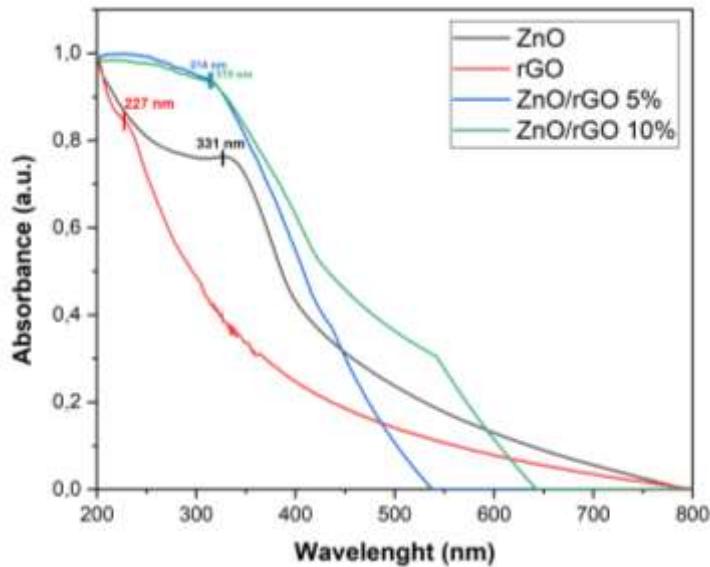
Citra SEM memperlihatkan morfologi ZnO yang berbentuk partikel menyerupai “spiky star”. GO tampak sebagai lembaran tipis berlapis, sedangkan komposit ZnO/rGO menunjukkan distribusi partikel ZnO yang menempel pada permukaan lembaran rGO. Hasil EDX mengonfirmasi keberadaan unsur Zn, O, dan C, sesuai dengan komposisi material.



Gambar 5. Citra SEM dan spektrum EDX ZnO, GO, dan komposit ZnO/rGO.

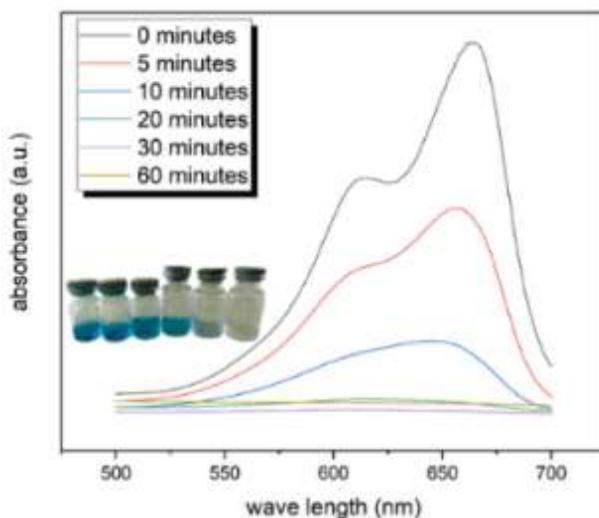
Pengukuran spektrum UV-Vis menunjukkan bahwa ZnO memiliki absorbansi pada daerah UV, sedangkan komposit ZnO/rGO mengalami sedikit pergeseran absorbansi. Berdasarkan kurva Tauc plot,

nilai energi band gap yang diperoleh adalah sekitar 2,88 eV untuk ZnO, kemudian menurun pada komposit ZnO/rGO menjadi 2,94 eV untuk rGO 5% dan 2,81 eV untuk rGO 10%.

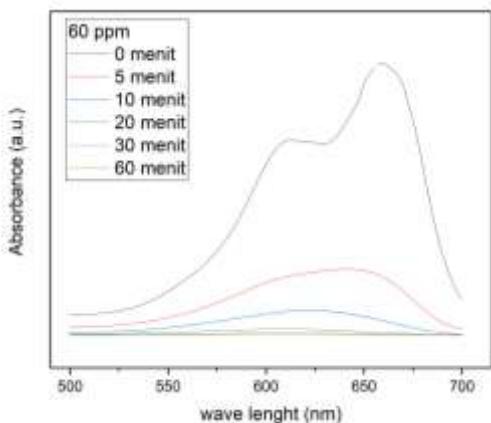


Gambar 6. Spektrum UV-Vis dan kurva Tauc plot untuk penentuan band gap ZnO dan komposit ZnO/rGO.

Hasil uji fotokatalitik terhadap larutan metilena biru (MB) menunjukkan bahwa semua katalis mampu menurunkan konsentrasi MB dengan efektif. Pada konsentrasi 30 ppm, komposit ZnO/rGO 10% menunjukkan nilai degradasi tertinggi yaitu 99,1%, diikuti ZnO/rGO 5% sebesar 98,8% dan ZnO sebesar 98,5%. Pada konsentrasi 60 ppm, komposit ZnO/rGO 10% kembali menunjukkan nilai tertinggi yaitu 98,9%.



Gambar 7. Kurva degradasi MB konsentrasi 30 ppm menggunakan ZnO, ZnO/rGO 5%, dan ZnO/rGO 10%.



Gambar 8. Kurva degradasi MB konsentrasi 60 ppm menggunakan ZnO, ZnO/rGO 5%, dan ZnO/rGO 10%.

Nilai absorbansi larutan MB pada setiap interval waktu dicatat untuk menentukan persentase degradasi. Penurunan absorbansi seiring waktu menunjukkan berlangsungnya proses fotodegradasi yang efektif pada seluruh variasi katalis.

DISKUSI

Hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa seluruh sampel ZnO dan komposit ZnO/rGO memiliki pola difraksi yang sesuai dengan struktur kristal wurtzite hexagonal, menegaskan bahwa proses sintesis tidak mengubah fasa dasar ZnO. Munculnya pola difraksi ZnO yang tetap dominan pada komposit mengindikasikan bahwa rGO tidak mengganggu pembentukan struktur kristal ZnO. Hilangnya puncak khas GO pada komposit kemungkinan disebabkan oleh rendahnya persentase rGO dalam campuran sehingga sinyal grafen tertutupi oleh intensitas difraksi ZnO yang jauh lebih kuat. Fenomena ini juga banyak dilaporkan pada sintesis komposit ZnO/rGO serupa, di mana puncak GO seringkali tidak terdeteksi akibat kontribusinya yang kecil dan sifatnya yang tidak sepenuhnya teratur secara kristalin. Spektrum FTIR memperlihatkan adanya gugus fungsi dari ZnO maupun GO, yang muncul secara bersamaan pada komposit ZnO/rGO. Kehadiran gugus O–H, C=O, dan C–O menandakan bahwa lembaran GO masih mempertahankan sebagian gugus oksigen fungsionalnya, sedangkan pita Zn–O pada daerah $400\text{--}500\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan keberadaan struktur ZnO. Kemunculan gugus fungsi kedua material dalam satu spektrum memperkuat indikasi bahwa interaksi fisik dan kimia antara rGO dan ZnO telah terbentuk. Gugus oksigen pada GO juga dapat meningkatkan afinitas permukaan terhadap partikel ZnO sehingga memperbaiki dispersi ZnO pada permukaan rGO.

Karakterisasi Raman semakin mengonfirmasi keberhasilan pembentukan komposit, di mana pita D dan G khas material grafen muncul bersama dengan puncak vibrasi ZnO. Peningkatan rasio intensitas pita D/G umumnya menunjukkan adanya cacat atau ketidakaturan struktural pada rGO, yang justru dapat meningkatkan aktivitas fotokatalitik karena menyediakan lebih banyak situs aktif untuk transfer elektron. Kehadiran kedua set puncak dalam satu spektrum memberikan bukti kuat bahwa ZnO dan rGO telah menyatu dalam satu struktur komposit. Analisis morfologi melalui SEM memperlihatkan bahwa ZnO memiliki struktur partikel menyerupai "spiky star" dengan ukuran nanometer, sedangkan GO tampak sebagai lembaran tipis berlapis. Pada komposit ZnO/rGO, partikel ZnO terlihat terdistribusi secara merata di permukaan lembaran rGO. Distribusi ini sangat penting karena rGO berperan sebagai penangkap elektron yang mampu mengurangi tingkat rekombinasi pasangan elektron-hole. Hasil EDX yang menunjukkan keberadaan unsur Zn, O, dan C memperkuat komposisi material yang diharapkan. Keberadaan karbon dari rGO juga mengindikasikan bahwa rGO berhasil terintegrasi pada struktur komposit.

Hasil UV-Vis dan Tauc plot menunjukkan adanya penurunan energi band gap pada komposit ZnO/rGO dibandingkan ZnO murni. Penurunan band gap dari 2,88 eV pada ZnO menjadi 2,94 eV (rGO 5%) dan 2,81 eV (rGO 10%) menunjukkan bahwa penambahan rGO meningkatkan kemampuan material dalam menyerap cahaya. Perubahan ini berkaitan dengan interaksi antara struktur π -conjugated rGO dengan orbital ZnO, sehingga memperluas respon spektroskopi fotokatalis. Band gap yang lebih kecil memungkinkan eksitasi elektron terjadi lebih mudah sehingga meningkatkan jumlah elektron bebas untuk berpartisipasi dalam proses fotokatalitik. Uji fotokatalitik memperlihatkan bahwa seluruh katalis mampu mendegradasi metilena biru (MB) dengan efektif, namun komposit ZnO/rGO menunjukkan aktivitas tertinggi. Pada konsentrasi MB 30 ppm, komposit ZnO/rGO 10% mencapai degradasi tertinggi yaitu 99,1%. Hasil ini konsisten pada konsentrasi 60 ppm, di mana ZnO/rGO 10% kembali memiliki nilai degradasi tertinggi. Peningkatan efisiensi ini berkaitan dengan kemampuan rGO dalam mempercepat transfer elektron dan mengurangi rekombinasi elektron-hole pada ZnO, yang merupakan masalah utama pada ZnO murni. Lembaran rGO menyediakan jalur konduktif yang memungkinkan elektron tersalurkan secara cepat sehingga lebih banyak radikal reaktif terbentuk untuk mendegradasi MB. Selain itu, distribusi ZnO yang menempel pada permukaan rGO menciptakan area kontak yang lebih besar dengan molekul MB, mempercepat proses adsorpsi dan fotodegradasi.

Penurunan absorbansi MB yang konsisten pada semua variasi katalis menunjukkan bahwa mekanisme fotodegradasi berlangsung dengan baik. Namun, peningkatan fraksi rGO meningkatkan kemampuan katalis dalam memanfaatkan cahaya dan menghasilkan radikal reaktif. Hal ini menjelaskan mengapa komposit dengan kandungan rGO lebih tinggi menunjukkan performa tertinggi dalam menguraikan pewarna metilena biru.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa penambahan reduced graphene oxide (rGO) pada ZnO memberikan peningkatan signifikan terhadap sifat struktural, optik, dan aktivitas fotokatalitik material. Hasil karakterisasi XRD, FTIR, dan Raman mengonfirmasi terbentuknya komposit ZnO/rGO tanpa mengubah fasa dasar ZnO. Citra SEM serta hasil EDX menunjukkan bahwa partikel ZnO terdistribusi merata pada permukaan rGO, yang mendukung peningkatan transfer elektron selama proses fotokatalisis. Analisis optik melalui UV-Vis dan kurva Tauc plot memperlihatkan bahwa keberadaan rGO menyebabkan penurunan energi band gap, sehingga memperbaiki kemampuan material dalam menyerap cahaya. Pengujian fotokatalitik terhadap metilena biru (MB) menunjukkan bahwa komposit ZnO/rGO memiliki performa lebih tinggi dibandingkan ZnO murni. Variasi terbaik diperoleh pada komposit ZnO/rGO 10%, dengan efisiensi degradasi mencapai 99,1% pada konsentrasi MB 30 ppm dan 98,9% pada 60 ppm. Peningkatan ini disebabkan oleh kemampuan rGO dalam menurunkan laju rekombinasi elektron-hole dan memperluas area kontak katalis dengan molekul pewarna. Selain itu, penambahan rGO terbukti efektif dalam mengoptimalkan kinerja ZnO sebagai fotokatalis. Komposit ZnO/rGO, khususnya pada fraksi rGO 10%, berpotensi untuk diterapkan sebagai material fotokatalitik ramah lingkungan dalam pengolahan limbah pewarna organik.

DAFTAR PUSTAKA

- Dai, X., Zeng, H., Jin, C., Rao, J., Liu, X., Li, K., Zhang, Y., Yu, Y., & Zhang, Y. (2021). 2D–3D graphene-coated diatomite as a support toward growing ZnO for advanced photocatalytic degradation of methylene blue. *RSC Advances*, 11(61), 38505–38514. <https://doi.org/10.1039/D1RA07708B>
- Elgharbi, S., Boubakri, A., Bouguecha, S., Bilel, H., Matalka, S. I., & Hafiane, A. (2024). Membrane Distillation for Methylene Blue Dye Removal from Wastewater: Investigating Process Optimization and Membrane Wettability. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(6), 8131–8145. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-08756-6>

- Han, S., Zhou, X., Xie, H., Wang, X., Yang, L., Wang, H., & Hao, C. (2022). Chitosan-based composite microspheres for treatment of hexavalent chromium and EBBR from aqueous solution. *Chemosphere*, 305, 135486. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135486>
- Krishna Moorthy, A., Govindarajan Rathi, B., Shukla, S. P., Kumar, K., & Shree Bharti, V. (2021). Acute toxicity of textile dye Methylene blue on growth and metabolism of selected freshwater microalgae. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 82, 103552. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2020.103552>
- Kusrini, E., Suhrowati, A. A., Usman, A., Degirmenci, Dr. V., & Khalil, M. (2019). Synthesis and Characterization of Graphite Oxide, Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide from Graphite Waste using Modified Hummers's Method and Zinc as Reducing Agent. *International Journal of Technology*, 10(6), 1093. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v10i6.3639>
- Madi, K., Chebli, D., Ait Youcef, H., Tahraoui, H., Bouguettoucha, A., Kebir, M., Zhang, J., & Amrane, A. (2024). Green Fabrication of ZnO Nanoparticles and ZnO/rGO Nanocomposites from Algerian Date Syrup Extract: Synthesis, Characterization, and Augmented Photocatalytic Efficiency in Methylene Blue Degradation. *Catalysts*, 14(1), 62. <https://doi.org/10.3390/catal14010062>
- Murugan, S., Vignesh, G., & Ashokkumar, M. (2024). Investigating the influence of CuS ratio on sun light – Driven photocatalytic performance of ZnS:CuS nanocomposites and reusability of PVA/ZnS: CuS polymer membrane. *Materials Chemistry and Physics*, 328, 130025. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.130025>
- Rorissa, G. L., Tesema, E. A., D.M., R. P., Hunde, A. R., Beyena, S. Y., Biru, M. A., Mekonnen, D. T., & Adnualem, T. L. (2025). Removal of methylene blue dye from textile industry wastewater using green synthesized Teff straw assisted ZnO nanoparticle. *Scientific Reports*, 15(1), 26230. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11746-9>
- Siregar, S., & Kiswiranti, D. (2020). Analisis Kualitas Air Tanah Akibat Pengaruh Sungai Klampok Yang Tercemar Limbah Industri Di Kecamatan Bergas Semarang Jawa Tengah (Analysis of Groundwater Quality Due to Effect Klampok River that was Contaminated Industrial Waste in Bergas Semarang Central Java). *Jurnal Manusia Dan Lingkungan*, 26(1), 36. <https://doi.org/10.22146/jml.39962>
- Thuy, P. T., Hue, B. T. C., Sang, N. X., Thanh Thuy, L. T., & Lieu, P. L. (2024). Synthesis of zinc oxide-doped reduced graphene oxide (rGO) nanocomposites on visible light-driven photocatalytic and antibacterial activity applications. *Nano Express*, 5(4), 045018. <https://doi.org/10.1088/2632-959X/ad9e0a>
- Wu, Y., Zou, L., Zhu, H., Mei, J., Yang, K., Cui, Y., Qian, K., Han, Y., Fan, M., & Liu, D. (2023). Improved combustion of NH₃/C₂H₄ with Ni modified Fe-based catalyst. *Chemical Engineering Journal*, 472, 145187. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145187>