

SINTESIS DAN KARAKTERISASI KOMPOSIT BIOCHAR/ZnO/Fe₃O₄ DARI LIMBAH BAGLOG

R.M. Husni^{1*}, M. Manurung¹, I.A.G. Widihati¹, dan S.P. Wijayanti²

¹*Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Udayana, Jimbaran, Bali, Indonesia*

²*Pusat Riset Sistem Produksi Berkelanjutan dan Penilaian Daur Hidup, Badan Riset dan Inovasi Nasional, KST B.J. Habibie, Jl. Raya Serpong, Muncul, Kecamatan Setu Tangerang Selatan, Banten, Indonesia*

*e-mail: ranggamuhus@gmail.com

Article Received on: 26th January 2026

Revised on: 18th July 2026

Accepted on: 30th July 2026

ABSTRAK

Limbah baglog jamur tiram merupakan biomassa lignoselulosa yang potensial untuk dikonversi menjadi biochar. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi komposit biochar/ZnO/Fe₃O₄ (ZMB) dari limbah baglog yang dimodifikasi melalui impregnasi ZnCl₂ dan FeCl₃ serta pirolisis pada suhu 600°C. Modifikasi ini dilakukan untuk meningkatkan luas permukaan spesifik dan memberikan sifat magnetik pada adsorben untuk memudahkan pemisahan pasca-adsorpsi. Karakterisasi material dilakukan menggunakan FTIR, XRD, SEM-EDX, dan SAA-BET. Hasil analisis FTIR menunjukkan terbentuknya ikatan Fe-O dan Zn-O pada struktur komposit. Pola difraksi XRD mengonfirmasi keberadaan fasa kristal ZnO dan Fe₃O₄ pada matriks biochar. Analisis SEM memperlihatkan morfologi permukaan yang lebih kasar dan heterogen, sementara EDX mendeteksi keberadaan unsur Fe dan Zn. Analisis BET menunjukkan bahwa komposit ZMB memiliki luas permukaan spesifik sebesar 362,809 m²/g dengan volume pori total 0,2554 cm³/g, yang lebih tinggi dibandingkan biochar tanpa modifikasi. Selain itu, komposit yang dihasilkan memiliki sifat magnetik yang memungkinkan pemisahan dari larutan menggunakan magnet eksternal.

Kata kunci: adsorpsi, baglog, komposit, metilen biru, biochar.

ABSTRACT

Spent mushroom substrate (SMS) from oyster mushroom cultivation is a lignocellulosic biomass with high potential for conversion into biochar. This study aims to synthesize and characterize biochar/ZnO/Fe₃O₄ composite (ZMB) from spent mushroom substrate modified via ZnCl₂ and FeCl₃ impregnation followed by pyrolysis at 600°C. This modification was intended to enhance the specific surface area and impart magnetic properties to the adsorbent for easier post-adsorption separation. Material characterization was conducted using FTIR, XRD, SEM-EDX, and SAA-BET. FTIR analysis indicated the formation of Fe-O and Zn-O bonds within the composite structure. XRD patterns confirmed the presence of ZnO and Fe₃O₄ crystal phases in the biochar matrix. SEM analysis revealed a rougher and more heterogeneous surface morphology, while EDX detected the presence of Fe and Zn elements. BET analysis showed that the ZMB composite possessed a specific surface area of 362.809 m²/g with a total pore volume of 0.2554 cm³/g, which is superior to unmodified biochar. Furthermore, the resulting composite exhibited magnetic properties, allowing for separation from solution using an external magnet.

Keywords: adsorption, spent mushroom substrate, composite, methylene blue, biochar.

PENDAHULUAN

Metilen biru merupakan pewarna sintetik yang banyak digunakan dalam industri tekstil karena memberikan warna cerah dan stabil. Namun, pewarna ini sulit terurai oleh mikroorganisme sehingga dapat mencemari lingkungan dan berdampak buruk bagi kesehatan (Khan *et al.*, 2022). Diperkirakan sekitar 700.000 ton pewarna tekstil diproduksi setiap tahunnya, dengan 12-15%

dilepaskan ke lingkungan sebagai limbah. Metode adsorpsi merupakan teknik yang paling sederhana untuk meminimalisir dampak negatif limbah cair dibanding dengan metode lain seperti fotodegradasi, elektrokoagulasi, presipitasi kimia, filtrasi membran, pertukaran ion dan adsorpsi (Saravanan *et al.*, 2021).

Aplikasi komposit biochar untuk mengadsorpsi zat warna termasuk metilen biru terus berkembang satu dekade terakhir. Foroutan *et al.* (2019)

membuat biochar komposit magnetik Fe_3O_4 dari alga laut (*Sargassum oligocystum*) untuk mengadsorpsi metilen biru dengan kapasitas adsorpsi sebesar 60,60 mg/g (98%). Cheng *et al.* (2017) membuat biochar komposit ZnO dan Fe_3O_4 dari crofton weed memiliki kapasitas adsorpsi 267,79 mg/g. Zhi *et al.* (2020) membuat biochar magnetik dari cangkang inti sawit untuk mengadsorpsi metilen biru, kapasitas adsorpsinya sebesar 84,7 mg/g. Wei *et al.* (2020) membuat komposit nanopartikel CuO/BC untuk menyerap zat warna reactive red 120 dengan kapasitas adsorpsi sebesar 1399 mg/g.

Pada penelitian ini biochar komposit dibuat dari limbah baglog, yaitu media bekas budidaya jamur tiram yang kaya selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Pemanfaatan limbah baglog sebagai bahan baku pembuatan komposit dapat meningkatkan nilai ekonomi, sekaligus mengurangi limbah yang dibuang ke lingkungan, hal ini sesuai dengan kaidah green chemistry.

Sintesis komposit dilakukan dengan metode impregnasi ZnCl_2 dan FeCl_3 , ke dalam sejumlah tertentu limbah baglog kemudian dipanaskan pada 600°C hingga dihasilkan komposit biochar/ZnO/ Fe_3O_4 atau ZnO Magnetic Biochar (ZMB) yang bersifat magnetik. Metode ini lebih unggul dibandingkan adsorpsi biochar biasa karena memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi dan kemudahan filtrasi dan penggunaan ulang (Foroutan *et al.*, 2022). Keberadaan Fe_3O_4 dari proses pirolisis FeCl_3 mampu mengatasi masalah filtrasi sebab biochar magnetik dapat ditarik menggunakan magnet eksternal (Nguyen *et al.*, 2023). Meskipun FeCl_3 merupakan aktivator yang lemah, FeCl_3 menunjukkan karakteristik yang mirip dengan ZnCl_2 dalam larutan (Lee dan Zaini, 2020). Penggunaan ZnCl_2 pada suhu tinggi dapat mempercepat proses dehidrasi untuk memecah rantai polimer biomassa seperti lignoselulosa dan juga ZnO yang terbentuk tertanam secara stabil dalam struktur karbon (Lee dan Zaini, 2020). Karakterisasi komposit yang disintesis dilakukan dengan berbagai teknik spektroskopi untuk mengetahui gugus fungsi dengan Fourier Transform Infrared (FTIR), ukuran partikel dan fasa kristal dengan X-ray Diffraction (XRD), morfologi dan komposisi kimia dengan Scanning Electron Microscope dan Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX), serta luas permukaan spesifik, volume pori total, dan rata-rata ukuran pori dengan Surface Area Analyzer Brunauer-Emmett-Teller (SAA-BET) dari komposit yang dihasilkan. Agar kapasitas adsorpsi komposit optimum, maka dilakukan optimasi parameter adsorpsi seperti waktu kontak, massa adsorben, pH, suhu dan konsentrasi larutan. Untuk mengetahui pengaruh modifikasi material

terhadap kinerja adsorpsi, penelitian ini diawali dengan perbandingan kemampuan adsorpsi metilen biru oleh limbah baglog, biochar, dan komposit biochar/ZnO/ Fe_3O_4 . Perbandingan ini dilakukan sebagai dasar pemilihan adsorben terbaik sebelum dilakukan pengujian parameter adsorpsi optimum.

MATERI DAN METODE

Bahan

Bahan utama yang digunakan adalah limbah baglog jamur tiram yang diperoleh dari PT Miko Bahtera Nusantara, Kota Bandung, Jawa Barat. Bahan kimia yang digunakan meliputi Seng klorida (ZnCl_2) dan Besi(III) klorida heksahidrat ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) sebagai agen pengaktif, natrium hidroksida (NaOH), asam klorida (HCl), dan akuades. Semua bahan kimia yang digunakan berderajat pro analysi (p.a).

Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi neraca analitik, ayakan 200 mesh, kaca arloji, cawan porselin, oven, desikator, mortar, sieve shaker, magnetic stirrer, magnet neodymium, pH meter, grinder, peralatan gelas laboratorium, centrifuge, tabung centrifuge, shaker Wincom HY-4C cycling vibrator, statif, klem, stopwatch, dan furnace. Karakterisasi material dilakukan menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Scanning Electron Microscope (SEM Thermo Scientific Quanta 650) yang dilengkapi dengan Energy Dispersive X-ray (EDX Oxford Instruments Bruker), X-ray Diffraction (XRD SmartLab Rigaku), Surface Area Analyzer (SAA) BET serta spektrofotometer UV-Vis (Shimadzu UV-1800).

Sintesis biochar/ZnO/ Fe_3O_4

Sintesis ZMB mengacu pada metode Nguyen *et al.* (2023) dengan modifikasi. Limbah baglog jamur tiram dicuci menggunakan akuades, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 100°C selama 3 jam hingga massa konstan. Sampel kering selanjutnya digerus hingga diperoleh serbuk homogen. Sebanyak 10 g serbuk limbah baglog dicampurkan dengan 2 g ZnCl_2 dan 2 g FeCl_3 , kemudian ditambahkan 250 mL akuades. Campuran diaduk menggunakan magnetic stirrer.

Suspensi hasil impregnasi dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 24 jam. Sampel kering kemudian dipirolisis dan dipirolisis dalam furnace pada suhu 600°C selama 2 jam. Setelah pirolisis, komposit dicuci menggunakan akuades hingga pH mendekati netral untuk menghilangkan sisa aktivator dan pengotor, kemudian dikeringkan

kembali pada suhu 100 °C selama 3 jam. Komposit biochar/ZnO/Fe₃O₄ yang diperoleh digerus dan diayak menggunakan ayakan 200 mesh. Fraksi yang lolos ayakan digunakan untuk tahap karakterisasi. Biochar tanpa modifikasi (BC) disintesis melalui prosedur yang sama tanpa penambahan ZnCl₂ dan FeCl₃ sebagai pembanding. Karakterisasi gugus fungsi dilakukan dengan FTIR, fasa kristal dengan XRD, morfologi dan komposisi unsur dengan SEM-EDX, serta luas permukaan spesifik dan karakteristik pori menggunakan metode BET.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis Komposit Biochar/ZnO/Fe₃O₄

Sintesis komposit biochar/ZnO/Fe₃O₄ (ZMB) dari limbah baglog berhasil dilakukan melalui metode impregnasi kimia yang diikuti dengan proses pirolisis dan pirolisis pada suhu 600°C. Proses ini menghasilkan material berwarna hitam keabu-abuan dengan tekstur lebih halus dibandingkan biochar tanpa modifikasi (BC). Perbedaan visual ini mengindikasikan terjadinya perubahan struktur dan komposisi material akibat penambahan aktivator ZnCl₂ dan FeCl₃.

Tabel 1. Massa dan Rendemen Hasil Sintesis BC dan ZMB

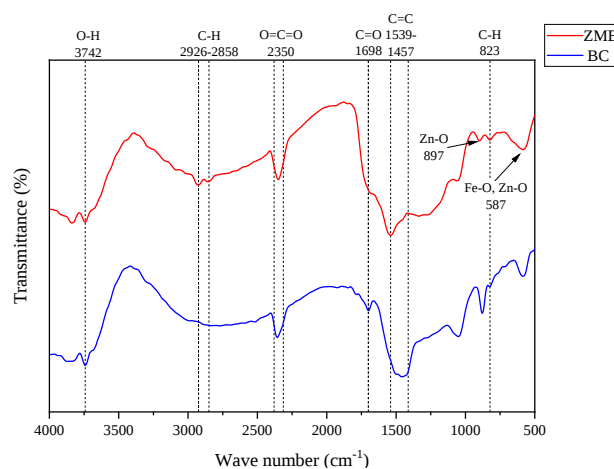
Sampel	Massa (g)	Rendemen (%)
BC	2,48	25,50
ZMB 2	2,58	18,44

Rendemen hasil sintesis BC dan ZMB disajikan pada Tabel 1. Penurunan rendemen pada komposit ZMB dibandingkan BC menunjukkan bahwa keberadaan aktivator kimia mempercepat proses dekomposisi lignoselulosa serta pelepasan komponen volatil selama pirolisis. Aktivasi kimia oleh ZnCl₂ diketahui mampu memfasilitasi proses dehidrasi dan pemutusan rantai polimer biomassa, sehingga menghasilkan struktur karbon yang lebih berpori.

Karakterisasi Komposit Biochar/ZnO/Fe₃O₄ Analisis Gugus Fungsi (FTIR)

Analisis Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsional pada permukaan biochar (BC) dan komposit biochar/ZnO/Fe₃O₄ (ZMB). Prinsip kerja FTIR didasarkan pada penyerapan radiasi inframerah oleh molekul pada frekuensi tertentu yang sesuai dengan getaran ikatan atom dalam molekul tersebut. Secara umum, wilayah utama yang dianalisis adalah wilayah gugus fungsi (4000–1300 cm⁻¹), yang menunjukkan

regangan gugus fungsi seperti –OH, C–H, dan C=O, serta fingerprint region (900–650 cm⁻¹) yang khas untuk tiap senyawanya (Silverstein *et al.*, 2005).



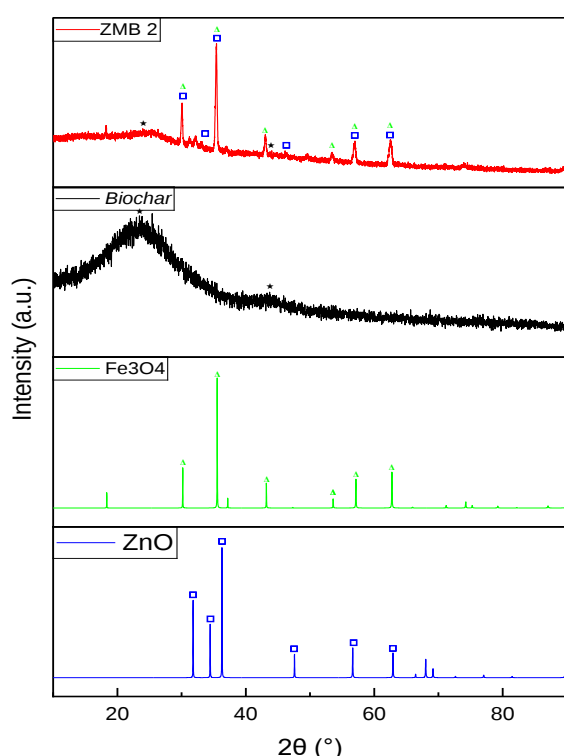
Gambar 1. Spektrum FTIR dari BC dan ZMB

Spektrum FTIR pada Gambar 1 menunjukkan perbedaan BC dengan ZMB. Spektrum BC menunjukkan keberadaan vibrasi O–H stretching dari gugus –OH pada 3871–3843 cm⁻¹ (Morgan Jr. *et al.*, 2025) dan keberadaan vibrasi C–H stretching dari C–H alifatik pada 2926–2858 cm⁻¹ (Silverstein *et al.*, 2005). Pita serapan pada sekitar 2350 cm⁻¹ merupakan vibrasi stretching asimetris O=C=O dari gas CO₂ atmosfer yang terperangkap pada permukaan BC (Nguyen *et al.*, 2023). Vibrasi C=O stretching dari karbonil dan karboksil tampak pada 1698 cm⁻¹ (Silverstein *et al.*, 2005). Keberadaan vibrasi C=C stretching dari gugus aromatik diduga pada pita pada 1457 cm⁻¹ dan vibrasi C–H stretching pada 878–825 cm⁻¹ (Silverstein *et al.*, 2005). Hal ini menunjukkan bahwa proses pirolisis pada 600°C terindikasi membentuk kandungan struktur aromatik biochar. Spektrum ZMB memperlihatkan pola yang serupa BC dengan perbedaan terdapatnya pita pada 587 cm⁻¹. Pita ini menunjukkan gabungan antara pita gugus Fe–O dan Zn–O. Menurut Foroutan *et al.* (2022), pita pada daerah 600–530 cm⁻¹ menunjukkan keberadaan ikatan Fe–O sedangkan pita pada daerah 558 dan 897 cm⁻¹ menunjukkan keberadaan ikatan Zn–O pada sampel.

Analisis Struktur Kristal (XRD)

Hasil analisis XRD pada Gambar 2 menunjukkan difraktogram sampel ZMB (warna merah) dibandingkan dengan difraktogram biochar, Fe₃O₄ (warna hijau) (Sasaki, 1997) dan ZnO (warna biru) (Sowa dan Ahsbahs, 2005). Keberadaan karbon dan grafit pada ZMB bisa diindikasikan dengan keberadaan puncak yang tersebar luas pada 23,95° dan 43,72°, yang merupakan karakteristik

struktur karbon dan grafit (Foroutan *et al.*, 2019). Pada difraktogram ZMB juga terlihat adanya puncak-puncak difraksi yang sesuai dengan puncak karakteristik Fe_3O_4 pada 2θ sekitar $30,18^\circ$, $35,55^\circ$, $43,21^\circ$, $53,41^\circ$, $57,14^\circ$, dan $62,76^\circ$ (JCPDS 19-0629), yang mengindikasikan keberadaan magnetit (Fe_3O_4) dalam ZMB. Selain itu, terdapat pula kesesuaian dengan puncak ZnO pada 2θ sekitar $31,80^\circ$, $34,46^\circ$, $36,29^\circ$, $47,59^\circ$, dan $56,66^\circ$ (JCPDS 36-1451), yang menunjukkan bahwa ZnO berhasil terbentuk pada struktur ZMB. Dengan demikian, hasil XRD mengonfirmasi bahwa komposit ZMB mengandung biochar, Fe_3O_4 dan ZnO sesuai dengan penelitian Nguyen *et al.* (2023) dan Lee dan Zaini (2020).



Gambar 2. Pola XRD ZMB, Biochar, Fe_3O_4 , dan ZnO

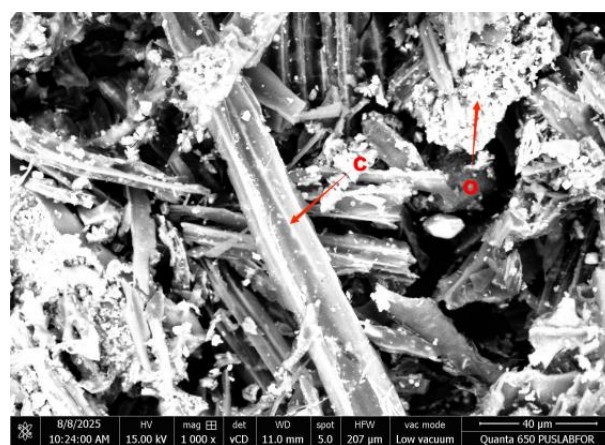
Ukuran kristalit masing-masing fasa pada komposit ZMB dihitung menggunakan Perhitungan ukuran domain kristalin efektif komposit ZMB dilakukan menggunakan persamaan Scherrer berdasarkan puncak difraksi dominan pada $2\theta \approx 35,388^\circ$, yang diperoleh dari hasil peak fitting difraktogram XRD. Hasil menunjukkan bahwa ukuran domain kristalin efektif komposit ZMB adalah 42.1709 nm.

Analisis dengan SEM-EDX

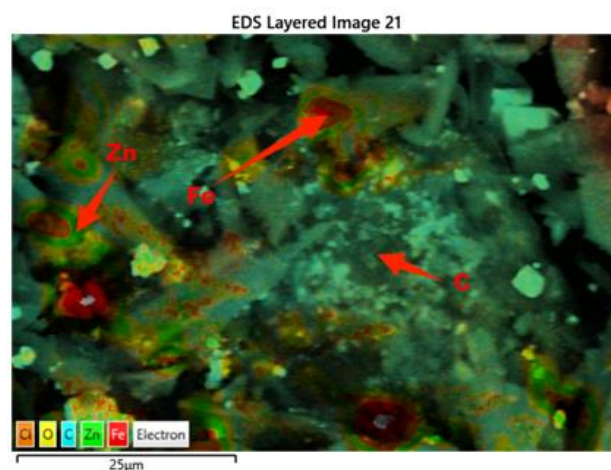
Analisis morfologi permukaan dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) untuk mengamati perbedaan struktur biochar sebelum dan sesudah impregnasi dengan ZnO dan

Fe_3O_4 . Gambar 3 memperlihatkan morfologi biochar tanpa modifikasi pada perbesaran $1000\times$ dan $3000\times$ yang dimana permukaan biochar didominasi oleh unsur C, tampak lebih halus, dan didominasi struktur berbentuk batang memanjang.

Gambar 4 menunjukkan morfologi komposit biochar/ZnO/ Fe_3O_4 (ZMB) pada perbesaran $3000\times$ dan $5000\times$. Terlihat bahwa permukaan biochar terdapat partikel berukuran kecil yang tidak tersebar merata. Partikel berwarna terang pada biochar diduga merupakan kluster ZnO dan Fe_3O_4 pada matriks biochar. Hal ini sesuai dengan hasil analisis Nguyen *et al.* (2023) dimana Fe dan Zn sedikit terdispersi secara merata pada permukaan karbon. Permukaan komposit juga menunjukkan adanya partikel halus yang menempel pada matriks karbon.



Gambar 3. Analisis SEM-EDX biochar pada Perbesaran $1000\times$



Gambar 4. Analisis SEM-EDX Komposit biochar/ZnO/ Fe_3O_4 pada Perbesaran $3000\times$

Hasil analisis EDX pada BC pada Tabel 2 menunjukkan bahwa BC didominasi oleh unsur karbon (C) sebesar 78,7% dan oksigen (O) sebesar 20,4%. Kandungan karbon yang tinggi berasal dari biochar dari proses pirolisis lignoselulosa limbah

baglog. Unsur lain yang terdeteksi dalam jumlah kecil yaitu silikon (Si) (0,6%) merupakan residu hasil pirolisis limbah baglog.

Tabel 2. Spektroskopi EDX BC

Material	Massa (%)
C	78,7
O	20,4
Si	0,6
Fe	0,2
Cl	0,1
Zn	0,1

Hasil analisis EDX sampel ZMB pada Tabel 3 menunjukkan bahwa komposit didominasi oleh unsur C sebesar 72,8% dan O sebesar 13,9%. Kandungan unsur C yang tinggi berasal dari biochar sebagai matriks utama, sedangkan O berkontribusi dari gugus oksida ZnO dan Fe₃O₄. Selain itu, terdeteksi pula unsur besi (Fe) sebesar 8,7% dan seng (Zn) sebesar 2,7% yang menunjukkan keberhasilan proses impregnasi ZnCl₂ dan FeCl₃ ke dalam struktur biochar. Hasil tersebut mendekati hasil penelitian Nguyen dkk. (2023) dengan persen massa masing-masing unturnya yaitu 84,71% pada unsur C, 8,19% pada unsur O, 5,78% pada unsur Fe, 0,29% pada unsur Zn, 0,59% pada unsur Cl, dan 0,45% pada Si.

Tabel 3. Spektroskopi EDX ZMB

Material	Massa (%)
C	72,8
O	13,9
Fe	8,7
Zn	2,7
Cl	1,7
Si	0,2

Analisis dengan Surface Area Analyzer Brunauer-Emmett-Teller (SAA-BET)

Karakterisasi permukaan ZMB dilakukan menggunakan Surface Area Analyzer (SAA) dengan metode Brunauer-Emmett-Teller (BET). Metode ini dilakukan untuk menentukan luas permukaan spesifik (SBET), volume pori total (V_{total}), rata-rata ukuran pori (d_{average}). Hasil analisis ini dipaparkan pada Tabel 4.

Luas permukaan spesifik ZMB diperoleh adalah 362,809 m²/g, volume pori total 0,2554 cm³/g, radius rata-rata ukuran pori 1,4078 nm, dan diameter rata-rata ukuran pori 2,8156 nm. Jika

dibandingkan dengan hasil BET biochar limbah baglog dari Morgan Jr. *et al.* (2025) dengan luas permukaan spesifik 289.44 m²/g, volume pori total 0.221 cm³/g dan diameter ukuran pori 4.83 nm, modifikasi ini menunjukkan bahwa luas permukaan spesifik dan volume pori total meningkat sedangkan diameter rata-rata ukuran porinya menurun. Menurut Lee dan Zaini (2020), keberadaan ZnCl₂ diketahui dapat mencegah pembentukan tar sambil meningkatkan pemecahan zat volatil dan menciptakan lebih banyak saluran pori, sehingga meningkatkan kecenderungan pengendapan partikel magnetik yang terpapar. Selain itu Uap ZnCl₂ yang berdifusi ke dalam karbon berperan sebagai agen aktivasi, memperbesar pori, dan juga meningkatkan luas permukaan komposit biochar (Nguyen *et al.*, 2023). Karakterisasi ini menunjukkan bahwa keberadaan ZnO dan Fe₃O₄ diduga berperan dalam meningkatkan porositas biochar ZMB. Diameter pori rata-rata sebesar 2,8156 nm menunjukkan bahwa material ZMB tergolong mesopori. Hal ini diperkuat oleh isoterm adsorpsi-desorpsi nitrogen pada Gambar 4 yang memperlihatkan adanya loop histeresis pada rentang tekanan relatif (P/P₀) menengah hingga tinggi. Selain itu, kurva adsorpsi tidak menunjukkan plateau sempurna pada P/P₀ mendekati 1, yang mengindikasikan terjadinya adsorpsi multilayer dan kondensasi kapiler di dalam pori material.

Tabel 4. Luas Permukaan Spesifik (SBET), Volume Pori Total (V_{total}), dan Rata-rata Ukuran Pori (d_{average}) ZMB

Material	S _{BET} (m ² /g)	V _{total} (cm ³ /g)	d _{average} (nm)
ZMB	362.809	0,2554	2.8156

Berdasarkan hasil BET yang diperoleh, ZMB menunjukkan ciri isotherm adsorpsi tipe IV(b). Menurut Irwansyah dkk. (2024), isotherm tipe IV(b) ditandai dengan proses adsorpsi monolayer hingga multilayer pada dinding mesopori, diikuti oleh kondensasi pori pada tekanan yang lebih rendah dari tekanan jenuh cairan bulk. Isotherm tipe ini umumnya menunjukkan plateau kejenuhan pada tahap akhir, yang panjangnya dapat bervariasi dan dalam beberapa kasus hanya tampak sebagai titik belok.

SIMPULAN

Karakteristik fisikokimia komposit biochar/ZnO/Fe₂O₄ dari limbah baglog diidentifikasi ikatan Fe–O dan Zn–O pada hasil analisis FTIR, puncak difraksi khas biochar, Fe₂O₄ dan ZnO pada hasil XRD, penyebaran unsur Fe dan Zn yang

merata pada hasil SEM-EDX, memiliki sifat magnetik yang baik menggunakan magnet neodmium, dan titik nol muatan (pHPZC) berada pada pH 6,95. Luas permukaan spesifik ZMB diperoleh adalah 362,809 m²/g, volume pori total 0,2554 cm³/g, radius rata-rata ukuran pori 1,4078 nm, dan diameter rata-rata ukuran pori 2,8156 nm menggunakan SAA-BET.

DAFTAR PUSTAKA

- Cheng, S., Chen, Q., Xia, H., Zhang, L., Peng, J., Lin, G., Liao, X., Jiang, X., dan Zhang, Q. 2017. Microwave one-pot production of ZnO/Fe₃O₄/activated carbon composite for organic dye removal and the pyrolysis exhaust recycle. *Journal of Cleaner Production*, 188: 900–910.
- Foroutan, R., Mohammadi, R., Raezeghi, J., dan Ramavandi, B. 2019. Performance of algal activated carbon/Fe₃O₄ magnetic composite for cationic dyes removal from aqueous solutions. *Algal Research*, 40: 101509.
- Foroutan, R., Mohammadi, R., Ahmadi, A., Bikhbar, G., Babaei, F., dan Ramavandi, B. 2022. Impact of ZnO and Fe₃O₄ magnetic nanoscale on the methyl violet 2B removal efficiency of the activated carbon oak wood. *Chemosphere*, 286: 131632.
- Irwansyah, F.S., Amal, A.I., Diyanthi, E.W., Hadisantoso, E.P., Noviyanti, A.R., Eddy, D.R., dan Risdiana. 2024. How to read and determine the specific surface area of inorganic materials using the Brunauer–Emmett–Teller (BET) method. *ASEAN Journal of Science and Engineering*, 4(1): 61–70.
- Khan, I., Saeed, K., Zekker, I., Zhang, B., Hendi, A.H., Ahmad, A., Ahmad, S., Zada, N., Ahmad, H., Shah, L.A., Shah, T., dan Khan, I. 2022. Review on methylene blue: Its properties, uses, toxicity and photodegradation. *Water*, 14(242): 1–30.
- Lee, L.Z. dan Zaini, M.A.A. 2020. One-step ZnCl₂/FeCl₃ composites preparation of magnetic activated carbon for effective adsorption of rhodamine B dye. *Toxin Reviews*, 41(1): 64-81.
- DOI: 10.1080/15569543.2020.1837172.
- Morgan Jr., H.M., Jiang, T.-J., Tsai, W.-T., dan Yen, T.-B. 2025. Initial physiochemical characterization of Djulis (*Chenopodium formosanum*) spent mushroom substrate biochar and its application for methylene blue dye adsorption, isotherm, kinetics, and parameters. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15: 19947–19961.
- Nguyen, D.V., Nguyen, H.M., Bui, Q.L.N., Do, T.V.T., Lam, H.H., Thuy, T.-M.T., dan Nguyen, L.Q. 2023. Magnetic activated carbon from ZnCl₂ and FeCl₃ coactivation of lotus seedpod: One-pot preparation, characterization, and catalytic activity towards robust degradation of acid orange 10. *Bioinorganic Chemistry and Applications*. 2023(1): 3848456. DOI: 10.1080/15569543.2020.1837172.
- Saravanan, A., Kumar, P.S., Jeevanantham, S., Karishma, S., Tajsabreen, B., Yaashikaa, P.R., dan Reshma, B. 2021. Effective water/wastewater treatment methodologies for toxic pollutants removal: Processes and applications towards sustainable development. *Chemosphere*, 280: 130595.
- Sasaki, S. 1997. Radial distribution of electron density in magnetite, Fe₃O₄. *Acta Crystallographica*, B53: 762–766.
- Silverstein, R.M., Webster, F.X., Kiemle, D.J., dan Bryce, D.L. 2005. *Spectrometric Identification of Organic Compounds*. Seventh Edition. John Wiley & Sons. New York.
- Sowa, H. dan Ahsbahs, H. 2005. High-pressure X-ray investigation of zincite ZnO single crystals using diamond anvils with an improved shape. *Journal of Applied Crystallography*, 39(1): 169–175.
- Wei, X., Wang, X., Gao, B., Zou, W., dan Dong, L. 2020. Facile ball-milling synthesis of CuO/biochar nanocomposites for efficient removal of reactive red 120. *ACS Omega*, 5: 5748–5755.
- Zhi, L.L. dan Zaini, M.A.A. 2020. One-step synthesis of magnetic activated carbons for methylene blue dye removal: Activation conditions and adsorption studies. *Desalination and Water Treatment*, 198: 434–444.