

Biosintesis Nanopartikel Zink Oksida menggunakan Bioreduktor Daun Sirsak (*Annona muricata* L.) sebagai Antimikroba

Biosynthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using Annona Muricata L. Leaf as Antimicrobial

Husna Humaira¹, Nur Aira Juwita^{2*}, Muhammad Fauzan Lubis³

¹Undergraduate Program, Faculty of Pharmacy, Universitas Sumatera Utara, 20155, Medan, Sumatera Utara, Indonesia

^{2,3}Department of Pharmaceutical Biology, Faculty of Pharmacy, Universitas Sumatera Utara, 20155, Medan, Sumatera Utara, Indonesia,
nurairajuwita@usu.ac.id

Abstrak

Nanoteknologi memungkinkan pengembangan material pada skala nanometer (1–100 nm) yang memiliki sifat fisikokimia unik yang relevan untuk aplikasi farmasi. Nanopartikel seng oksida (ZnO NPs) telah menarik perhatian besar karena sifat semikonduktornya, aktivitas katalitik yang tinggi, serta potensi antimikroba spektrum luas. Namun, metode sintesis kimia dan fisika konvensional sering kali membutuhkan energi yang tinggi dan melibatkan pereaksi berbahaya, sehingga diperlukan alternatif yang lebih ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis ZnO NPs melalui pendekatan biosintesis hijau menggunakan ekstrak daun sirsak (*Annona muricata* L.) sebagai agen pereduksi dan penstabil alami, serta mengevaluasi karakteristik fisikokimia dan aktivitas antimikrobanya. ZnO NPs yang disintesis kemudian dikarakterisasi menggunakan spektroskopi UV–Vis, spektroskopi *Fourier Transform Infrared* (FTIR), difraksi sinar-X (XRD), *scanning electron microscopy–energy dispersive X-ray* (SEM–EDX), *particle size analysis* (PSA), analisis potensial zeta (ZPA), *differential scanning calorimetry* (DSC). Hasil penelitian mengonfirmasi keberhasilan pembentukan ZnO NPs dengan struktur kristal heksagonal wurtzite dan ukuran kristalit rata-rata sebesar 26,43 nm. Diameter hidrodinamik rata-rata yang diperoleh adalah 489,3 nm, dan nilai potensial zeta sebesar –18,1 mV menunjukkan stabilitas koloid yang sedang. Analisis DSC menunjukkan puncak endotermik pada 162,40 °C dan 275,38 °C, yang berkaitan dengan penghilangan senyawa organik sisa dari ekstrak tanaman. Evaluasi aktivitas antimikroba menggunakan metode difusi cakram menunjukkan adanya aktivitas penghambatan yang bergantung pada konsentrasi terhadap *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus epidermidis*, dan *Candida albicans*, dengan daya hambat tertinggi diamati pada konsentrasi 25 µg/mL. Secara keseluruhan, temuan ini menunjukkan bahwa ZnO NPs yang dibiosintesis menggunakan ekstrak daun *Annona muricata* L. memiliki potensi yang menjanjikan sebagai agen antimikroba ramah lingkungan untuk aplikasi farmasi.

Kata kunci: Biosintesis; Nanopartikel Seng Oksida; *Annona muricata* L.; Antimikroba.

Abstract

Nanotechnology enables the development of materials at the nanometer scale (1–100 nm) with unique physicochemical properties relevant to pharmaceutical applications. Zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) have attracted significant interest due to their semiconductor properties, high catalytic activity, and broad-spectrum antimicrobial potential. However, conventional chemical and physical synthesis methods are often energy-intensive and involve hazardous reagents, necessitating environmentally friendly alternatives. This study aimed to synthesize ZnO NPs via a green biosynthesis approach using *Annona muricata* L. leaf extract as a natural reducing and stabilizing agent, and to evaluate their physicochemical characteristics and antimicrobial activity. The synthesized ZnO NPs were characterized using UV–Vis spectroscopy, Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy, X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy–energy dispersive X-ray (SEM–EDX), particle size analysis (PSA), zeta potential analysis, and differential scanning calorimetry (DSC). The results confirmed the successful formation of ZnO NPs with a hexagonal wurtzite crystal structure and an average crystallite size of 26.43 nm. The average hydrodynamic diameter was 489.3 nm, and a zeta potential value of –18.1 mV indicated moderate colloidal stability. DSC analysis revealed endothermic peaks at 162.40 °C and 275.38 °C, corresponding to the removal of residual organic compounds from the plant extract. Antimicrobial evaluation using the disk

*Corresponding author: Nur Aira Juwita, Department of Pharmaceutical Biology, Faculty of Pharmacy, Universitas Sumatera Utara, Indonesia.

E-mail : nurairajuwita@usu.ac.id

Doi : 10.35451/661y2r29

Received : March 18, 2026, Accepted: March 31, 2026, Published: April 30, 2026

Copyright: © 2026 Nur Aira Juwita (s). Creative Commons License This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

diffusion method demonstrated concentration-dependent inhibitory activity against Staphylococcus aureus, Staphylococcus epidermidis, and Candida albicans, with the highest inhibition observed at 25 µg/mL. Overall, these findings indicate that ZnO NPs biosynthesized using A. muricata leaf extract possess promising potential as eco-friendly antimicrobial agents for pharmaceutical applications.

Keywords: Biosynthesis, Zinc Oxide Nanoparticles, Annona muricata L., Antimicrobial.

1. PENDAHULUAN

Infeksi bakteri masih menjadi salah satu permasalahan kesehatan global yang signifikan dan terus menimbulkan ancaman serius terhadap kesehatan manusia. Penyakit infeksi yang disebabkan oleh bakteri berkontribusi besar terhadap angka morbiditas dan mortalitas di berbagai negara. Selama beberapa dekade terakhir, antibiotik telah menjadi strategi terapi utama dalam pengendalian infeksi bakteri. Namun demikian, penggunaan antibiotik yang luas dan sering kali tidak rasional dan telah mempercepat munculnya resistensi antimikroba. Fenomena resistensi ini menyebabkan berkurangnya efektivitas berbagai antibiotik konvensional, sehingga menimbulkan tantangan besar dalam penanganan penyakit infeksi. Kondisi tersebut menyoroti perlunya pengembangan pendekatan antimikroba alternatif yang lebih efektif, inovatif, dan berkelanjutan [1].

Dalam beberapa tahun terakhir, perkembangan nanoteknologi telah membuka peluang baru dalam pengembangan agen antimikroba. Material berbasis nanoteknologi, khususnya nanopartikel logam, mulai banyak dieksplorasi karena memiliki aktivitas biologis yang signifikan. Nanopartikel logam (NPs) memiliki ukuran yang sangat kecil, luas permukaan yang besar, serta karakteristik fisikokimia yang unik. Kombinasi sifat tersebut memungkinkan nanopartikel berinteraksi secara lebih efektif dengan struktur sel mikroorganisme, sehingga mampu menghambat pertumbuhan bakteri melalui berbagai mekanisme biologis dan kimiawi. Selain itu, karena struktur membran sel bakteri relatif konservatif dan tidak mudah mengalami perubahan genetik secara cepat, potensi terjadinya resistensi terhadap nanopartikel diperkirakan lebih rendah dibandingkan dengan antibiotik konvensional yang biasanya menargetkan jalur metabolisme spesifik [2].

Salah satu nanomaterial oksida logam yang banyak dipelajari dalam bidang biomedis adalah nanopartikel seng oksida (ZnO NPs). ZnO NPs telah menarik perhatian luas karena stabilitas kimianya yang baik, toksisitas yang relatif rendah, serta aktivitas antimikroba yang kuat. Dalam bidang farmasi, ZnO NPs banyak dimanfaatkan dalam berbagai formulasi, terutama pada sediaan topikal yang memiliki fungsi antibakteri dan proteksi kulit. Beberapa penelitian melaporkan bahwa ZnO NPs mampu menghambat pertumbuhan berbagai bakteri patogen bahkan pada konsentrasi yang relatif rendah. Aktivitas antibakteri tersebut dapat bersifat bakteristatik maupun bakterisidal, yang umumnya berkaitan dengan kerusakan membran sel mikroorganisme serta induksi stres oksidatif melalui pembentukan spesies oksigen reaktif *Reactive Oxygen Species* (ROS). Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Zare dkk (2022) menunjukkan bahwa ZnO NPs juga berpotensi digunakan untuk mencegah kontaminasi bakteri pada bahan kemasan makanan, sehingga memperluas aplikasinya tidak hanya dalam bidang medis tetapi juga dalam industri pangan [3].

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mensintesis ZnO NPs, seperti metode presipitasi, sol-gel, hidrotermal, dan sonokimia. Meskipun metode-metode tersebut mampu menghasilkan nanopartikel dengan ukuran dan morfologi yang relatif terkontrol, proses sintesisnya sering melibatkan penggunaan reagen kimia beracun, termasuk surfaktan, prekursor logam, maupun agen penstabil sintetis yang berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Keterbatasan tersebut mendorong berkembangnya pendekatan sintesis yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Salah satu pendekatan yang semakin banyak mendapat perhatian adalah sintesis hijau (*green synthesis*) yang memanfaatkan ekstrak tumbuhan sebagai sumber biomolekul aktif [4].

Metode sintesis hijau dinilai lebih ekonomis, sederhana, serta lebih aman bagi lingkungan dibandingkan metode sintesis konvensional. Selain itu, nanopartikel yang dihasilkan melalui pendekatan biosintesis sering menunjukkan stabilitas yang baik serta biokompatibilitas yang lebih tinggi. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa senyawa fitokimia yang terdapat dalam ekstrak tumbuhan, seperti flavonoid, polifenol, alkaloid, dan terpenoid, dapat berperan sebagai agen pereduksi sekaligus penstabil selama proses pembentukan ZnO NPs [5]. Sebagai contoh, Ekkenia dkk 2021 melaporkan sintesis ZnO NPs menggunakan ekstrak daun *Alchornea laxiflora* yang menghasilkan nanopartikel dengan ukuran rata-rata sekitar 38 nm serta menunjukkan aktivitas anti-tirosinase yang menjanjikan. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa metabolit sekunder dari ekstrak daun

Melia azedarach dapat dimanfaatkan dalam sintesis ZnO NPs yang memiliki aktivitas antioksidan kuat terhadap berbagai radikal bebas, termasuk radikal DPPH, radikal hidroksil, dan anion superoksida [6-7].

Annona muricata L., yang dikenal secara luas sebagai daun sirsak, merupakan tanaman tropis yang banyak ditemukan di Asia Tenggara dan berbagai wilayah tropis lainnya. Dalam pengobatan tradisional, daun tanaman ini telah lama dimanfaatkan untuk mengatasi berbagai gangguan kesehatan, seperti diare, demam, tukak lambung, serta luka [8]. Penelitian yang dilakukan oleh Hasmila dkk (2019) menunjukkan bahwa ekstrak daun *A. muricata* mengandung berbagai metabolit sekunder penting, termasuk steroid, alkaloid, flavonoid, senyawa fenolik, dan saponin [9]. Senyawa-senyawa tersebut diketahui memiliki berbagai aktivitas biologis, seperti antioksidan, antimikroba, dan antiinflamasi. Selain itu, keberadaan metabolit sekunder tersebut juga berpotensi berperan sebagai agen pereduksi dan penstabil dalam proses biosintesis nanomaterial, sehingga memungkinkan pembentukan nanopartikel yang lebih stabil dan fungsional.

2. METODE

Bahan

Bahan-bahan yang digunakan adalah akuades, air deionisasi (*Waterone*), alkohol 70%, simplisia daun sirsak (*Annona muricata* L.), biakan bakteri *S.aureus*, biakan bakteri *S.epidermidis*, biakan jamur *C.albicans*, ciprofloxacilin 500 mg, DMSO, etanol 96%, media *Nutrient Agar*, media *Nutrient Broth*, media *Mueller Hinton Agar*, media *Potato Dextrose Agar*, media *Potato Dextrose Broth*, NaOH, kertas cakram, tablet ketoconazole, zink nitrat.

Alat

Alat-alat yang digunakan adalah alat-alat gelas *Iwaki Pyrex*, *aluminium foil*, autoklaf, bunsen, cawan penguap, cawan petri, corong, *hot plate*, inkubator bakteri, inkubator jamur, jangka sorong, *Laminar Air Flow Cabinet*, mikropipet, neraca analitik, sentrifugasi, seperangkat alat DSC, seperangkat alat FTIR, PSA, SEM, spektrofotometer, XRD, ZPA.

Prosesur Kerja

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Fitokimia, Fakultas Farmasi, Universitas Sumatera Utara, Indonesia, pada bulan Agustus 2025. Daun sirsak (*A.muricata* L.) yang segar dan sehat dikumpulkan dari daerah Perumnas Mandala, Medan Denai, Sumatera Utara, Indonesia. Identifikasi botani terhadap tanaman dilakukan oleh ahli botani di Herbarium Medanese, Universitas Sumatera Utara. Keaslian spesimen tanaman tersebut kemudian dikonfirmasi dan didokumentasikan dengan nomor voucher spesimen 1187/MEDA/2025.

Daun yang telah dikumpulkan dicuci dengan air mengalir untuk menghilangkan kotoran yang menempel, kemudian dikeringkan pada suhu ruang. Setelah kering, daun digiling menggunakan blender konvensional hingga diperoleh serbuk yang homogen. Serbuk daun kemudian diayak untuk memperoleh ukuran partikel yang lebih seragam dan selanjutnya dikeringkan kembali menggunakan oven pengering. Serbuk kering daun *A. muricata* L. kemudian disimpan dalam wadah kedap udara hingga digunakan dalam proses biosintesis nanopartikel.

Preparasi Ekstrak Tanaman

Ekstrak daun sirsak diperoleh menggunakan metode infusa. Sebanyak ± 10 g serbuk daun kering direbus dalam 100 mL air deionisasi ganda pada suhu 90 °C selama 15 menit. Setelah proses ekstraksi selesai, larutan didinginkan hingga mencapai suhu ruang, kemudian disaring menggunakan filtrasi vakum untuk memisahkan residu padatan [10–11]. Filtrat berwarna cokelat muda yang diperoleh selanjutnya dikumpulkan dan segera digunakan sebagai larutan ekstrak dalam proses sintesis ZnO NPs.

Biosintesis ZnO NPs

Sintesis ZnO NPs dilakukan dengan melarutkan seng nitrat 0,5 M dalam 200 mL air deionisasi. Larutan kemudian dipanaskan hingga mencapai suhu stabil 70 °C menggunakan magnetic hotplate stirrer. Setelah suhu stabil, sebanyak 20 mL ekstrak daun sirsak ditambahkan ke dalam larutan prekursor dengan rasio prekursor terhadap ekstrak sebesar 1:10.

Selanjutnya, larutan NaOH 2 M ditambahkan secara perlahan tetes demi tetes sambil diaduk secara kontinu hingga pH larutan mencapai 8, yang menunjukkan terjadinya pembentukan ZnO NPs. Selama proses reaksi berlangsung, terjadi perubahan warna secara bertahap dari coklat menjadi kuning pucat dan akhirnya putih, yang digunakan sebagai indikator visual terbentuknya ZnO NPs. Campuran reaksi kemudian dipertahankan pada suhu 70 °C dengan pengadukan konstan selama 30 menit.

Endapan yang terbentuk dipisahkan melalui proses dekantasi, kemudian dimurnikan dengan sentrifugasi pada kecepatan 8000 rpm selama 15 menit pada suhu 5 °C. Endapan yang diperoleh dicuci sebanyak tiga kali menggunakan air deionisasi untuk menghilangkan sisa ion yang masih terikat. Produk akhir kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 70 °C selama 24 jam. Pelet kering yang dihasilkan selanjutnya digerus menggunakan mortar dan pestle hingga menjadi serbuk halus, kemudian disimpan dalam wadah kedap udara pada suhu ruang untuk keperluan karakterisasi lebih lanjut [12–13].

Karakterisasi ZnO NPs

ZnO NPs yang diperoleh selanjutnya dikarakterisasi menggunakan beberapa teknik analisis untuk mengevaluasi sifat fisikokimia dan strukturnya. Puncak serapan optik dianalisis menggunakan spektrofotometri UV–Vis. Distribusi ukuran partikel ditentukan menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA), sedangkan gugus fungsi yang terdapat pada permukaan nanopartikel dianalisis menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR). Morfologi permukaan nanopartikel diamati menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM), sementara struktur kristal dan sifat kristalinitas dianalisis menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD). Selain itu, perilaku termal nanopartikel dievaluasi menggunakan *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) [14].

Uji Aktivitas Antibakteri

Pengujian aktivitas antibakteri ZnO NPs hasil biosintesis dilakukan terhadap *Staphylococcus aureus* dan *Staphylococcus epidermidis* menggunakan metode difusi cakram agar mengacu pada pedoman CLSI. Suspensi bakteri yang telah distandarisasi dicampurkan dengan medium *Mueller Hinton Agar* cair dalam cawan petri steril, kemudian dihomogenkan dan dibiarkan memadat. Cakram kertas yang mengandung nanopartikel ZnO dengan variasi konsentrasi ditempatkan pada permukaan media, dengan cakram antibiotik standar sebagai kontrol positif dan cakram berisi pelarut sebagai kontrol negatif. Seluruh sampel diinkubasi pada suhu 37 °C selama 24 jam, selanjutnya diameter zona hambat diukur menggunakan jangka sorong digital. Setiap perlakuan dilakukan dalam tiga kali ulangan untuk memperoleh data yang representatif [15].

Uji Aktivitas Antijamur

Pengujian aktivitas antijamur ZnO NPs hasil biosintesis dilakukan terhadap *Candida albicans* menggunakan metode difusi cakram agar. Suspensi jamur yang telah distandarisasi dicampurkan dengan medium *Potato Dextrose Agar* cair dalam cawan petri steril, dihomogenkan, dan dibiarkan memadat. Cakram kertas yang mengandung nanopartikel ZnO dengan variasi konsentrasi diletakkan pada permukaan media, disertai cakram kontrol positif dan kontrol negatif sebagai pembanding. Seluruh sampel diinkubasi pada suhu 25 °C selama 48 jam, kemudian diameter zona hambat diukur menggunakan jangka sorong digital. Setiap perlakuan dilakukan dalam tiga kali ulangan untuk menjamin keakuratan data [16].

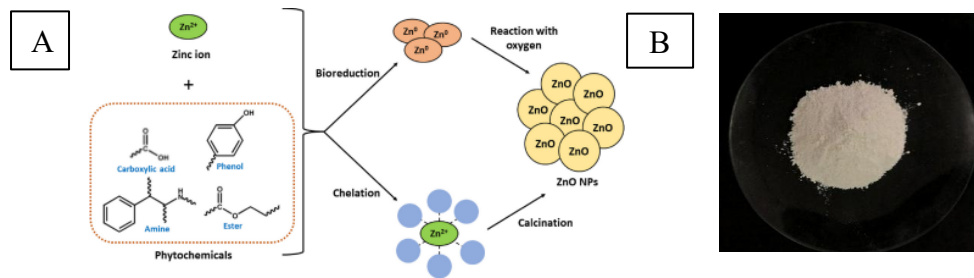
3. HASIL

Mekanisme Reaksi yang Diusulkan dan Penampakan Visual ZnO NPs yang Disintesis

Gambar 1A mengilustrasikan mekanisme reaksi yang diajukan, di mana gugus hidroksil aromatik dari senyawa fitokimia dan polifenol berinteraksi dengan ion Zn^{2+} yang berasal dari prekursor $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$. Interaksi tersebut menghasilkan kompleks logam–fitokimia dengan tingkat kestabilan relatif tinggi.

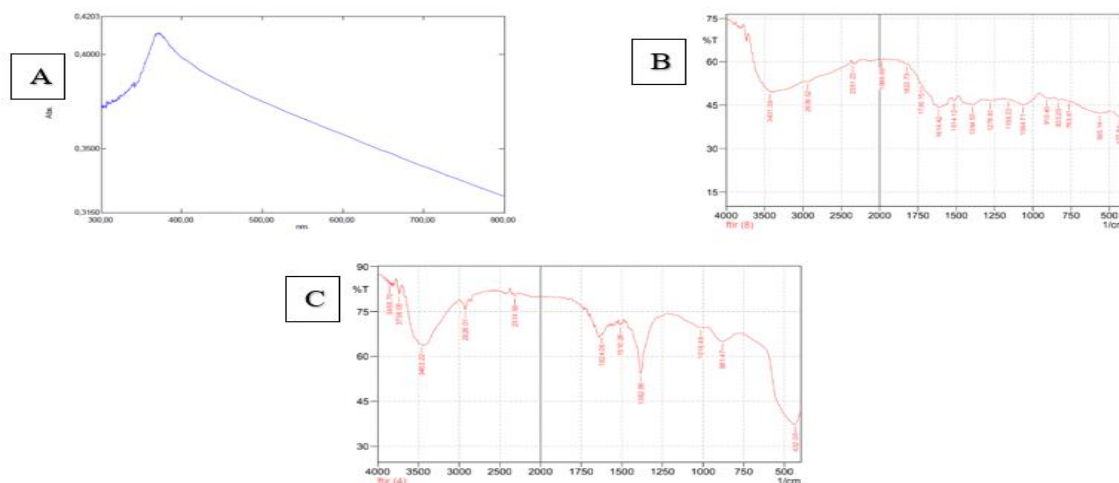
Melalui pendekatan biosintesis menggunakan ekstrak daun sirsak (*Annona muricata* L.), pembentukan nanopartikel ZnO berhasil dilakukan dengan rendemen sebesar 34,01%. Karakteristik organoleptik

menunjukkan bahwa produk yang dihasilkan berupa serbuk amorf berwarna putih kekuningan dan tidak berbau, seperti disajikan pada Gambar 1B.



Gambar 1. (A) Mekanisme reaksi yang diusulkan dalam sintesis ZnO NPs menggunakan ekstrak *Annona muricata* L. (B) Penampakan serbuk ZnO NPs hasil sintesis.

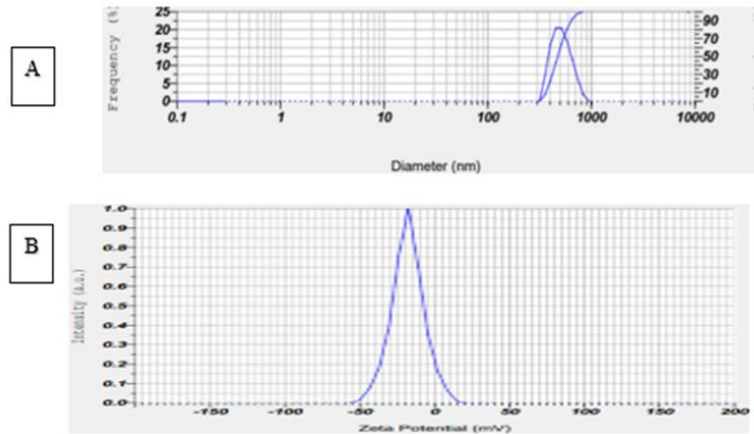
Hasil analisis spektrofotometri UV-Vis mengonfirmasi keberhasilan sintesis ZnO NPs melalui munculnya puncak serapan khas pada panjang gelombang 372 nm, seperti ditampilkan pada Gambar 2A. Spektrum FTIR ekstrak daun sirsak Gambar 2B memperlihatkan pita serapan pada bilangan gelombang 3431,36 cm⁻¹; 2939,52 cm⁻¹; 1614,42 cm⁻¹; 1394,53 cm⁻¹; 1278,81 cm⁻¹; dan 1064,71 cm⁻¹, yang mengindikasikan keberadaan gugus fungsi dari senyawa fitokimia. Setelah sintesis, pada Gambar 2C dibawah spektrum FTIR ZnO NPs menunjukkan pita serapan pada 3462,22 cm⁻¹, 2926,01 cm⁻¹, 2314,58 cm⁻¹, 1624,06 cm⁻¹, 1510,26 cm⁻¹, dan 1382,96 cm⁻¹. Kemunculan puncak kuat pada 432,05 cm⁻¹ yang merupakan karakteristik getaran regangan Zn–O menegaskan terbentuknya struktur seng oksida.



Gambar 2. (A) Spektrum UV-Vis ZnO NPs menggunakan ekstrak daun sirsak; (B) Spektrum FTIR ekstrak daun sirsak; (C) Spektrum FTIR ZnO NPs

Karakterisasi ukuran partikel ZnO NPs hasil biosintesis dilakukan menggunakan *Particle Size Analyzer* seperti disajikan pada Gambar 3. Berdasarkan analisis distribusi ukuran Gambar 3A, diperoleh nilai *Z-average* sebesar 795,3 nm dengan ukuran rata-rata berbasis intensitas 489,3 nm. Indeks polidispersitas (PDI) terukur sebesar 0,583, mengindikasikan sebaran ukuran partikel yang cukup lebar.

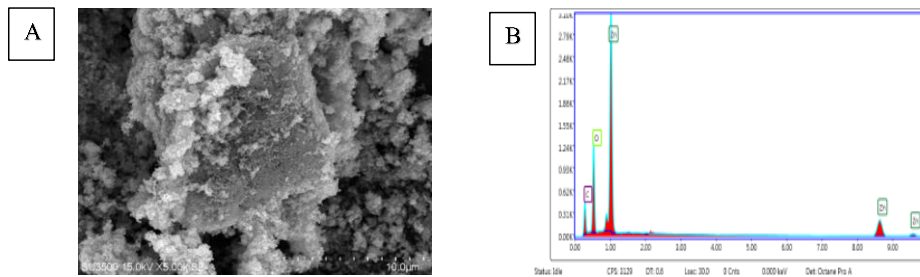
Evaluasi stabilitas koloid melalui pengukuran potensial zeta Gambar 3B menunjukkan bahwa ZnO NPs memiliki muatan permukaan negatif dengan nilai rata-rata -18,1 mV. Nilai ini berkorespondensi dengan mobilitas elektroforetik sebesar -0,00140 cm²/V·s, merefleksikan karakteristik muatan permukaan partikel hasil sintesis.



Gambar 3. (A) Distribusi ukuran partikel dan PDI ZnO NPs hasil biosintesis; (B) Potensial zeta ZnO NPs.

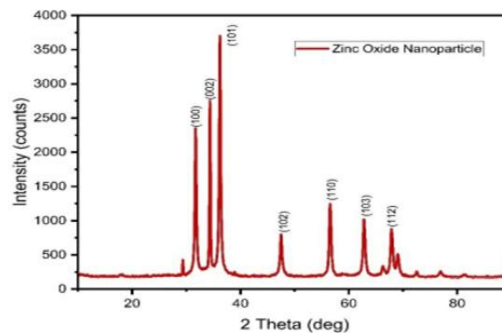
Analisis morfologi ZnO NPs hasil biosintesis menggunakan SEM disajikan pada Gambar 4A. Mikrograf SEM memperlihatkan partikel dengan morfologi tidak beraturan dan ukuran primer berada dalam rentang nanometer (<100 nm). Permukaan material tampak kasar dan berpori, dengan partikel-partikel yang cenderung beragregasi membentuk struktur menyerupai spons.

Komposisi unsur nanopartikel dianalisis menggunakan EDX sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4B. Hasil analisis mengonfirmasi keberadaan unsur utama penyusun ZnO, yaitu seng (Zn) sebesar 65,63% dan oksigen (O) sebesar 15,47%. Terdeteksi pula unsur karbon (C) sebesar 18,90% yang berasal dari residu senyawa organik ekstrak daun sirsak, berperan sebagai agen penstabil selama proses biosintesis.



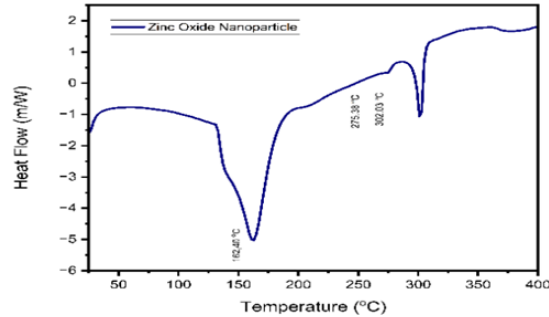
Gambar 4. (A) Mikrograf SEM dari ZnO NPs hasil biosintesis melalui metode sintesis hijau menggunakan ekstrak daun sirsak, yang menunjukkan partikel teraglomerasi dengan morfologi tidak beraturan. (B) Spektrum EDX yang mengonfirmasi komposisi unsur dari ZnO NPs hasil biosintesis.

Karakterisasi struktur kristal ZnO NPs hasil biosintesis dilakukan menggunakan difraksi XRD seperti disajikan pada Gambar 5. Pola difraksi memperlihatkan puncak-puncak khas pada sudut 2θ : $29,37^\circ$, $31,70^\circ$, $34,37^\circ$, $36,21^\circ$, $47,49^\circ$, $56,55^\circ$, $62,78^\circ$, dan $67,87^\circ$. Puncak-puncak tersebut berkorespondensi dengan bidang kristal (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201), (004), dan (202) yang merupakan ciri khas struktur kristalin ZnO. Intensitas puncak yang tajam mengindikasikan tingkat kristalinitas yang tinggi dari nanopartikel yang dihasilkan. Berdasarkan persamaan *Debye-Scherrer*, diperoleh ukuran kristalit rata-rata sebesar 26,43 nm.



Gambar 5. Pola difraksi sinar-X (XRD) ZnO NPs hasil biosintesis.

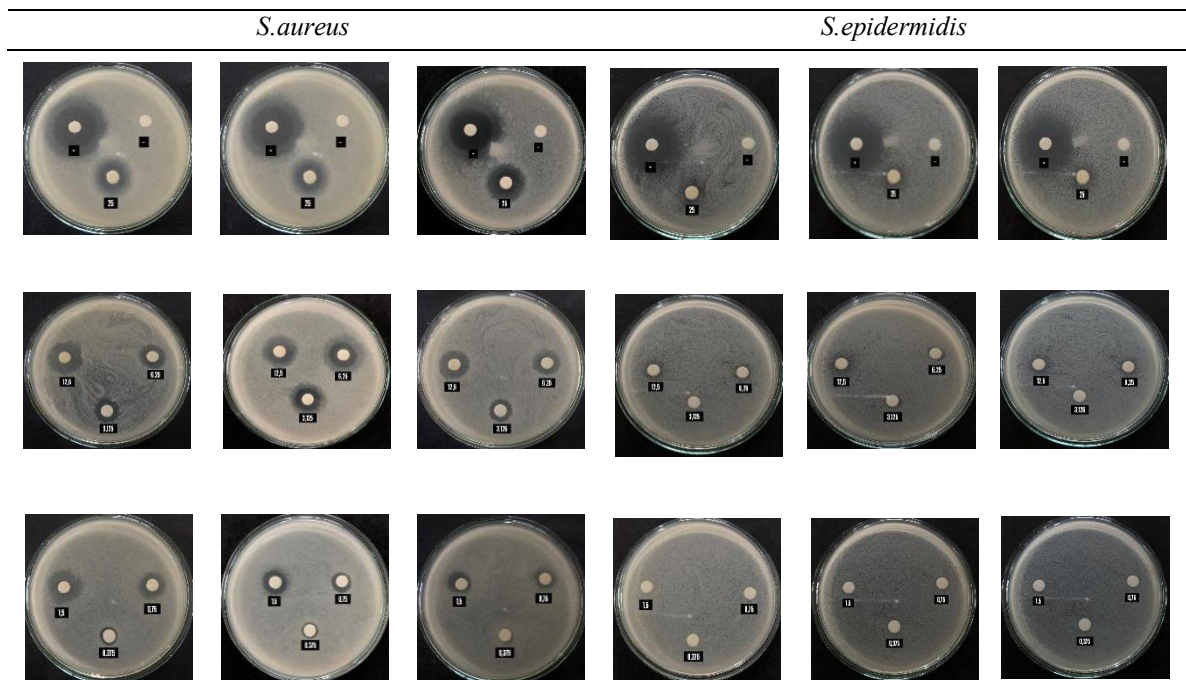
Karakteristik termal ZnO NPs hasil biosintesis dianalisis menggunakan DSC (Gambar 6), yang memperlihatkan dua puncak endotermik pada suhu 162,40 °C dan 275,38 °C. Peristiwa endotermik pertama diinterpretasikan sebagai pelepasan molekul air yang teradsorpsi serta kemungkinan degradasi awal residu organik dari ekstrak daun sirsak yang masih terikat pada permukaan nanopartikel. Sementara itu, puncak kedua pada suhu yang lebih tinggi mengindikasikan terjadinya perubahan struktural atau peningkatan stabilitas termal dari ZnO NPs yang terbentuk.



Gambar 6. Termogram DSC dari ZnO NPs yang menunjukkan puncak endotermik pada 162,40 °C dan 275,38 °C.

Aktivitas antimikroba ZnO NPs

Penyajian data visual dalam bentuk gambar dan tabel pada bagian ini dimaksudkan untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai hasil pengujian aktivitas antimikroba ZnO NPs. Evaluasi dilakukan terhadap bakteri *S.aureus* dan *S.epidermidis* dengan variasi konsentrasi perlakuan guna mengidentifikasi perbedaan efektivitas daya hambat yang dihasilkan. Representasi visual ini diharapkan dapat memperjelas pola respon masing-masing mikroorganisme terhadap perlakuan yang diberikan, khususnya melalui pengamatan zona hambat yang terbentuk pada media uji.



Gambar 7. Zona hambat representatif dari ZnO NPs terhadap *S.aureus* dan *S.epidermidis* pada berbagai konsentrasi.

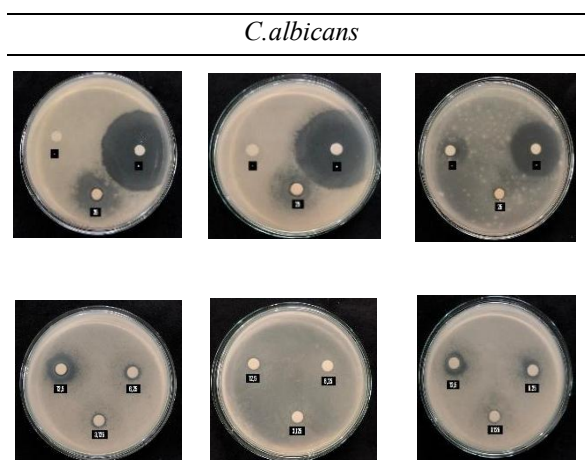
Tabel 1. Rata-rata diameter zona hambat (mm ± SD) ZnO NPs terhadap *S.aureus*, *S.epidermidis*, dan *C.albicans*.

Concentration of ZnO NPs (µg /mL)	Avarage Zone of inhibition in diameter (nm ± SD)		
	<i>S. aureus</i>	<i>S. epidermidis</i>	<i>C. albicans</i>
25	13.73 ± 0.51	12.25 ± 0.82	14.90 ± 0.35
12.5	11.11 ± 0.61	11.96 ± 0.80	12.81 ± 0.68
6.25	10.01 ± 0.59	10.70 ± 0.70	8.31 ± 0.36
3.125	8.95 ± 0.78	7.90 ± 1.41	7.70 ± 1.37
1.5	7.45 ± 1.08	7.66 ± 0.83	-
0.75	6.48 ± 0.75	7.01 ± 0.89	-
0.375	-	-	-
Positive Control	22.88 ± 1.54	22.85 ± 0.82	39.20 ± 0.85
Negative Control	-	-	-

Berdasarkan data pada Tabel 1, ZnO NPs menunjukkan aktivitas antibakteri terhadap *S.aureus* dan *S.epidermidis* pada berbagai konsentrasi uji, yaitu 25, 12,5, 6,25, 3,125, 1,5, 0,75, dan 0,375 µg/mL. Aktivitas penghambatan ditunjukkan oleh terbentuknya zona hambat yang jernih di sekitar cakram uji. Kontrol negatif (DMSO) tidak menunjukkan adanya zona hambat terhadap kedua strain bakteri tersebut (0 mm). Sebaliknya, kontrol positif berupa siprofloksasin menghasilkan diameter zona hambat rata-rata sebesar 22,88 ± 1,54 mm terhadap *S. aureus* dan 22,85 ± 0,82 mm terhadap *S. epidermidis*.

ZnO NPs mampu menghambat pertumbuhan *S. aureus* dengan diameter zona hambat sebesar 13,73 ± 0,51 mm pada konsentrasi 25 µg/mL dan 11,11 ± 0,59 mm pada konsentrasi 12,5 µg/mL. Penurunan konsentrasi nanopartikel menunjukkan kecenderungan penurunan diameter zona hambat. Pada konsentrasi 6,25; 3,125; 1,5; dan 0,75 µg/mL, diameter zona hambat yang dihasilkan masing-masing sebesar 10,01 ± 0,59 mm; 8,95 ± 0,78 mm; 7,45 ± 1,08 mm; dan 6,48 ± 0,75 mm.

Aktivitas antibakteri serupa juga diamati terhadap *S. epidermidis*. Pada konsentrasi 25 dan 12,5 µg/mL, ZnO NPs menghasilkan diameter zona hambat masing-masing sebesar 12,25 ± 0,82 mm dan 11,96 ± 0,80 mm. Sementara itu, pada konsentrasi yang lebih rendah yaitu 6,25; 3,125; 1,5; dan 0,75 µg/mL, diameter zona hambat yang terbentuk berturut-turut sebesar 10,70 ± 0,70 mm; 7,90 ± 1,41 mm; 7,66 ± 0,83 mm; dan 7,01 ± 0,89 mm.





Gambar 8. Zona hambat representatif dari ZnO NPs terhadap *C. albicans* pada berbagai konsentrasi.

Berdasarkan klasifikasi aktivitas antijamur yang dikemukakan oleh Alawiyah et al. (2022), respons penghambatan dikategorikan menjadi empat tingkat, yaitu lemah (≤ 5 mm), sedang (6 - 10 mm), kuat (11 - 20 mm), dan sangat kuat (>20 mm). Hasil pengujian menunjukkan bahwa ZnO NPs memiliki aktivitas antijamur terhadap *C. albicans* pada berbagai konsentrasi uji.

Pada konsentrasi 25 $\mu\text{g/mL}$ dan 12,5 $\mu\text{g/mL}$, nanopartikel ZnO menghasilkan diameter zona hambat masing-masing sebesar $14,90 \pm 0,35$ mm dan $12,81 \pm 0,68$ mm, yang termasuk dalam kategori aktivitas kuat. Sementara itu, pada konsentrasi yang lebih rendah yaitu 6,25 $\mu\text{g/mL}$ dan 3,125 $\mu\text{g/mL}$, diameter zona hambat yang terbentuk masing-masing sebesar $8,31 \pm 0,36$ mm dan $7,70 \pm 1,37$ mm, yang tergolong dalam kategori aktivitas sedang dan sebagai pembanding, kontrol negatif berupa DMSO tidak menunjukkan adanya zona hambat terhadap *C. albicans* (0 mm). Sebaliknya, kontrol positif ketokonazol menghasilkan diameter zona hambat rata-rata sebesar $39,20 \pm 0,85$ mm, yang menunjukkan aktivitas antijamur yang sangat kuat.

4. PEMBAHASAN

Biosintesis dan karakterisasi ZnO NPs

Pembentukan ZnO NPs dengan memanfaatkan ekstrak daun *A. muricata* erat kaitannya dengan kandungan metabolit sekunder dalam ekstrak serta suasana basa yang diterapkan selama sintesis. Hasil skrining fitokimia mengonfirmasi keberadaan steroid, alkaloid, flavonoid, fenolik, dan saponin pada ekstrak daun sirsak. Senyawa-senyawa tersebut memegang peranan esensial dalam proses sintesis hijau nanopartikel melalui fungsinya sebagai reduktor alami yang mengonversi ion Zn^{2+} menjadi ZnO, sekaligus sebagai agen penstabil (*capping agent*) yang berfungsi mengendalikan pertumbuhan partikel dan menghambat agregasi [17].

Pemanfaatan ekstrak daun sirsak sebagai agen biosintesis memberikan keunggulan dari aspek keberlanjutan lingkungan. Pendekatan ini mengeliminasi penggunaan bahan kimia beracun yang lazim dalam metode konvensional, sehingga selaras dengan prinsip kimia hijau yang mengutamakan keselamatan, efisiensi, dan kelestarian lingkungan. Selvanathan dkk. (2022) melaporkan bahwa ZnO NPs hasil biosintesis dengan ekstrak daun sirsak menunjukkan karakteristik fisikokimia yang baik serta reproduktibilitas yang tinggi [18].

Analisis UV-Visible dan FTIR ZnO NPs Hasil Biosintesis

Keberhasilan sintesis ZnO NPs menggunakan ekstrak daun sirsak dikonfirmasi melalui analisis spektrofotometri UV-Vis dengan munculnya puncak serapan khas pada panjang gelombang 372 nm. Puncak tersebut merepresentasikan transisi elektronik pita-ke-pita yang menjadi ciri optik material ZnO berukuran nano, dan berada dalam rentang umum 350–380 nm sebagaimana dilaporkan pada berbagai studi biosintesis. Bentuk puncak yang tajam dan terdefinisi dengan baik mengindikasikan terbentuknya nanopartikel dengan tingkat keseragaman relatif tinggi, yang dipengaruhi oleh ukuran partikel serta interaksi permukaan dengan senyawa fitokimia dari ekstrak tumbuhan [19].

Analisis FTIR memperkuat bukti keberhasilan sintesis sekaligus mengonfirmasi peran metabolit sekunder dalam proses tersebut. Spektrum FTIR ekstrak daun menunjukkan pita serapan yang mengindikasikan gugus hidroksil ($-\text{OH}$), C–H alifatik, C=C aromatik, dan C–O, yang menandakan keberadaan senyawa fenolik, flavonoid, serta polisakarida. Gugus fungsi ini berperan ganda sebagai agen pereduksi dan penstabil selama proses biosintesis.

Profil spektrum yang diperoleh konsisten dengan laporan sebelumnya pada ekstrak *A. muricata*, sehingga memperkuat konsistensi peran fitokimia dalam sintesis ZnO NPs.

Perubahan signifikan tampak pada spektrum FTIR ZnO NPs hasil sintesis dibandingkan dengan ekstrak daun, menandakan terbentuknya struktur anorganik ZnO. Kemunculan pita serapan kuat pada bilangan gelombang sekitar 432 cm^{-1} merupakan indikator getaran regangan Zn–O yang menjadi penanda terbentuknya kristal ZnO. Keberadaan pita serapan gugus –OH dan C–O yang masih terdeteksi mengonfirmasi bahwa senyawa organik dari ekstrak tetap teradsorpsi pada permukaan nanopartikel dan berfungsi sebagai agen penstabil. Karakteristik ini selaras dengan temuan pada berbagai studi biosintesis ZnO NPs menggunakan ekstrak tumbuhan [20].

Analisis Ukuran Partikel dan Potensial Zeta ZnO NPs

Karakterisasi distribusi ukuran menunjukkan bahwa ZnO NPs hasil biosintesis memiliki diameter hidrodinamik tergolong besar dengan nilai *Z-average* dalam rentang submikron dan sebaran ukuran yang cukup luas. Temuan ini umum dijumpai pada sintesis berbasis ekstrak tanaman, di mana dimensi terukur tidak hanya merepresentasikan inti anorganik ZnO tetapi juga lapisan biomolekul dari senyawa fitokimia yang teradsorpsi pada permukaan partikel serta berpotensi menginduksi agregasi parsial. Indeks polidispersitas yang relatif tinggi mengindikasikan distribusi ukuran heterogen, karakteristik khas pendekatan sintesis hijau akibat interaksi kompleks berbagai biomolekul yang berperan simultan sebagai agen pereduksi dan penstabil, sehingga variasi ukuran partikel masih dianggap wajar dalam sistem *green synthesis* [21].

Analisis potensial zeta mengungkapkan bahwa ZnO NPs hasil biosintesis memiliki muatan permukaan negatif, yang berasal dari gugus fungsi terionisasi seperti hidroksil, karboksil, dan fenolik dalam ekstrak daun sirsak. Nilai potensial zeta yang diperoleh mencerminkan tingkat stabilitas koloid pada kategori sedang, di mana gaya tolak-menolak elektrostatis berperan mempertahankan dispersi partikel namun tetap memungkinkan interaksi terbatas antar partikel. Tingkat stabilitas demikian sering didokumentasikan pada sistem ZnO NPs berbasis tanaman dan menggambarkan keseimbangan antara gaya elektrostatis dengan interaksi biomolekul dalam lingkungan sintesis hijau [18].

Morfologi Permukaan dan Komposisi Unsur ZnO NPs Hasil Biosintesis

Hasil analisis SEM mengungkapkan bahwa ZnO NPs hasil biosintesis dengan ekstrak daun sirsak memiliki morfologi tidak beraturan dengan ukuran primer dalam skala nanometer. Partikel-partikel tersebut membentuk struktur teragregasi, berpori, dan menyerupai spons, morfologi yang lazim ditemui pada metode *green synthesis*. Kondisi ini berkaitan dengan keterlibatan biomolekul dari ekstrak tanaman selama proses nukleasi dan pertumbuhan, di mana senyawa fitokimia yang bertindak sebagai pereduksi dan penstabil dapat memicu pertumbuhan anisotropik serta aglomerasi meskipun ukuran primer tetap berada dalam skala nano. Agregasi yang terjadi secara terkendali justru berpotensi meningkatkan kekasaran permukaan dan porositas material, sehingga memperluas luas permukaan efektif serta jumlah situs aktif. Beberapa penelitian melaporkan bahwa struktur agregat pada ZnO NPs menunjukkan reaktivitas permukaan lebih tinggi dan kinerja biologis lebih baik, terutama untuk aplikasi antimikroba [22].

Analisis *Energy Dispersive X-ray* mengonfirmasi bahwa unsur Zn dan O merupakan komponen dominan, menegaskan keberhasilan pembentukan struktur ZnO. Deteksi unsur karbon mengindikasikan adanya residu senyawa organik dari ekstrak daun sirsak yang teradsorpsi pada permukaan nanopartikel dan berperan sebagai agen penstabil alami. Kandungan karbon yang relatif tinggi juga dapat menandakan bahwa proses pencucian belum optimal dalam menghilangkan residu organik. Efektivitas pencucian memiliki peranan penting dalam menentukan tingkat kemurnian, sifat kimia permukaan, serta kristalinitas ZnO NPs hasil sintesis hijau, khususnya pada proses yang dilakukan pada suhu relatif rendah. Temuan ini selaras dengan hasil PSA yang menunjukkan diameter hidrodinamik lebih besar akibat agregasi partikel dalam kondisi koloid [18].

Struktur Kristal dan Kristalinitas ZnO NPs Hasil Biosintesis

Hasil analisis difraksi sinar-X mengonfirmasi bahwa ZnO NPs hasil biosintesis dengan ekstrak daun sirsak memiliki struktur kristal heksagonal tipe wurtzite, yang merupakan fase ZnO paling stabil secara termodinamika. Puncak-puncak difraksi yang tajam dan terdefinisi dengan baik mengindikasikan tingkat kristalinitas tinggi, membuktikan bahwa metode sintesis hijau mampu memfasilitasi pembentukan kisi kristal secara teratur melalui mekanisme nukleasi dan pertumbuhan yang efektif. Pola refleksi yang teramati sesuai dengan karakteristik khas ZnO berstruktur wurtzite dari berbagai penelitian berbasis tanaman, memperkuat validitas metode yang digunakan [23].

Ukuran kristalit rata-rata yang dihitung melalui persamaan *Debye-Scherrer* berada dalam kisaran nanometer, mengonfirmasi terbentuknya material nanokristalin. Perbedaan ukuran dengan hasil analisis SEM dan PSA disebabkan oleh terbentuknya agregat polikristalin, di mana beberapa nanokristalit bergabung membentuk partikel sekunder lebih besar. Fenomena ini merupakan karakteristik umum sintesis hijau akibat peran biomolekul sebagai agen pereduksi dan penstabil yang mempengaruhi nukleasi, pertumbuhan kristal, serta interaksi antarpartikel. Karakteristik kristalinitas dan ukuran kristal berpengaruh signifikan terhadap sifat fisikokimia serta aktivitas biologis ZnO NPs. Kristalit berukuran kecil memberikan rasio luas permukaan terhadap volume tinggi, meningkatkan jumlah situs aktif dan reaktivitas permukaan. Variasi ukuran kristal dan morfologi berkaitan dengan perubahan densitas cacat permukaan, pelepasan ion Zn^{2+} , serta pembentukan spesies oksigen reaktif, yang berperan penting dalam aktivitas antimikroba dan antibakteri [20].

Karakteristik Termal ZnO NPs

DSC ZnO NPs hasil biosintesis menunjukkan adanya puncak endotermik yang mencerminkan perubahan energi dalam sistem material. Puncak pada suhu rendah umumnya berkaitan dengan pelepasan atau degradasi senyawa organik residu yang berasal dari komponen fitokimia ekstrak daun sirsak, seperti flavonoid dan polifenol, yang berperan sebagai agen pereduksi sekaligus penstabil selama proses sintesis. Keberadaan biomolekul ini merupakan karakteristik khas sintesis hijau, karena interaksi antara senyawa organik dan permukaan nanopartikel membentuk lapisan penstabil alami [10].

Puncak endotermik pada suhu yang lebih tinggi mengindikasikan terjadinya proses termal lanjutan, seperti penguraian senyawa organik yang berkaitan lebih kuat atau reorganisasi struktur internal nanopartikel. Pola ini umum dilaporkan pada ZnO berbasis tanaman, di mana transisi suhu rendah berkaitan dengan molekul teradsorpsi, sedangkan suhu tinggi mencerminkan karakteristik termal intrinsik material. Temuan ini menegaskan bahwa meskipun struktur kristalin ZnO telah terbentuk dengan baik, interaksi dengan biomolekul masih berperan dalam memengaruhi stabilitas dan sifat permukaan nanopartikel, sehingga mendukung keberhasilan sintesis hijau.

Aktivitas Antibakteri ZnO NPs

Hasil uji aktivitas antibakteri membuktikan bahwa ZnO NPs hasil biosintesis mampu menghambat pertumbuhan *S.aureus* dan *S.epidermidis* dengan pola respons yang bergantung pada konsentrasi. Peningkatan dosis nanopartikel menghasilkan zona hambat yang lebih luas, mengindikasikan efektivitas antibakteri yang semakin tinggi, sedangkan pada konsentrasi rendah tetap menunjukkan aktivitas penghambatan meskipun dalam skala lebih kecil. Menurut Ngazizah dan Romaidha (2022), aktivitas pada konsentrasi tinggi tergolong daya hambat kuat, sementara pada konsentrasi rendah termasuk kategori sedang. Hal ini menegaskan bahwa ZnO NPs tetap mempertahankan efektivitas biologisnya meskipun digunakan dalam jumlah terbatas, sehingga berpotensi dikembangkan sebagai agen antimikroba alternatif yang efisien [24].

Temuan ini selaras dengan berbagai laporan sebelumnya yang menyatakan bahwa ZnO NPs memiliki aktivitas antibakteri spektrum luas, terutama terhadap bakteri gram positif. Kerentanan *S. aureus* dan *S. epidermidis* terhadap ZnO NPs dapat dijelaskan melalui karakteristik dinding sel gram positif yang relatif lebih sederhana. Struktur peptidoglikan yang tebal tanpa membran luar memungkinkan interaksi lebih mudah antara nanopartikel dengan permukaan sel bakteri. Variasi zona hambat antar penelitian dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti

metode sintesis, ukuran kristalit, morfologi partikel, serta konsentrasi nanopartikel yang digunakan dalam pengujian.

Mekanisme antibakteri ZnO NPs bersifat multitarget dan sinergis, meliputi kerusakan membran sel akibat interaksi langsung, induksi stres oksidatif melalui pembentukan spesies oksigen reaktif, serta penetrasi partikel berskala nano ke dalam sel bakteri. Stres oksidatif yang ditimbulkan dapat merusak protein, lipid membran, dan materi genetik, yang pada akhirnya menyebabkan gangguan metabolik dan kematian sel. Mekanisme multifaktorial ini menjadikan ZnO NPs memiliki potensi besar sebagai agen antimikroba dengan risiko resistensi lebih rendah dibandingkan agen konvensional. Secara keseluruhan, ZnO NPs hasil biosintesis menunjukkan aktivitas antibakteri signifikan terhadap bakteri gram positif dan menjanjikan untuk dikembangkan dalam aplikasi biomedis maupun farmasi [25].

Aktivitas Antijamur ZnO NPs

Hasil pengujian membuktikan bahwa ZnO NPs hasil biosintesis memiliki aktivitas antijamur terhadap *C. albicans* yang bersifat dependen terhadap konsentrasi. Peningkatan dosis nanopartikel menghasilkan zona hambat lebih luas, mengindikasikan efektivitas penghambatan yang semakin tinggi, sedangkan pada konsentrasi rendah tetap menunjukkan aktivitas antifungal meskipun dalam skala lebih kecil. Pola respons ini merupakan karakteristik umum nanopartikel oksida logam, di mana jumlah partikel yang lebih besar meningkatkan frekuensi interaksi dengan sel mikroorganisme sehingga memperkuat efek penghambatan pertumbuhan [26].

Aktivitas antijamur yang teramati sejalan dengan berbagai laporan sebelumnya mengenai efektivitas ZnO NPs terhadap jamur patogen, termasuk *C. albicans*. Efektivitas tersebut dipengaruhi oleh sifat fisikokimia partikel seperti ukuran, morfologi permukaan, tingkat kristalinitas, dan muatan permukaan yang menentukan intensitas interaksi dengan struktur sel jamur. Pendekatan biosintesis dengan ekstrak tanaman bahkan dapat meningkatkan stabilitas serta karakteristik permukaan nanopartikel, yang berkontribusi terhadap peningkatan aktivitas biologisnya.

Mekanisme antijamur ZnO NPs bersifat multitarget, meliputi kerusakan dinding sel dan membran akibat interaksi langsung, induksi stres oksidatif melalui pembentukan spesies oksigen reaktif, serta penetrasi partikel berskala nano ke dalam sel. Stres oksidatif yang ditimbulkan dapat merusak protein, lipid, dan materi genetik, yang pada akhirnya mengganggu metabolisme dan menyebabkan kematian sel jamur. Aktivitas yang bergantung pada konsentrasi serta mekanisme multifaktorial ini menunjukkan bahwa ZnO NPs hasil biosintesis berpotensi dikembangkan sebagai alternatif agen antifungal, terutama dalam mengatasi resistensi terhadap obat konvensional [27].

5. KESIMPULAN

1. Biosintesis nanopartikel ZnO (ZnO NPs) berbasis ekstrak daun *Annona muricata* berhasil menghasilkan material dengan struktur kristal heksagonal tipe wurtzit, tingkat kristalinitas yang baik, ukuran kristalit rata-rata sekitar 26,43 nm, serta stabilitas koloid yang memadai (potensial zeta -18,1 mV). Kandungan fitokimia dalam ekstrak berkontribusi sebagai agen pereduksi sekaligus penstabil, sehingga berperan penting dalam proses pembentukan dan pertumbuhan partikel secara terkontrol.
2. Nanopartikel ZnO yang dihasilkan memperlihatkan aktivitas antimikroba yang nyata terhadap *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus epidermidis*, dan *Candida albicans*, dengan kecenderungan peningkatan daya hambat seiring kenaikan konsentrasi. Pendekatan biosintesis yang digunakan tidak hanya menawarkan metode yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan, tetapi juga menghasilkan material dengan potensi aplikatif sebagai agen antimikroba alternatif di bidang biomedis dan farmasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada Pusat Nanosains dan Nanoteknologi, Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia, atas penyediaan fasilitas penelitian serta dukungan teknis yang sangat membantu dalam proses karakterisasi ZnO NPs pada penelitian ini.

DAFTAR PUSAKA

- [1] Murray CJL, Ikuta KS, Sharara F, Swetschinski L, Robles Aguilar G, Gray A, et al. Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: A systematic analysis. *The Lancet*. 2022;399(10325):629–655.
- [2] Wang L, Hu C, Shao L. The antimicrobial activity of nanoparticles: Present situation and prospects for the future. *Int J Nanomedicine*. 2017;12:1227–1249.
- [3] Zare M, Namratha K, Ilyas S, Sultana A, Hezam A, Sunil L, et al. Emerging trends for ZnO nanoparticles and their applications in food packaging. *ACS Food Sci Technol*. 2022;2(5):763–781.
- [4] Singh TA, Sharma A, Tejwan N, Ghosh N, Das J, Sil PC. A state-of-the-art review on the synthesis, antibacterial, antioxidant, antidiabetic and tissue regeneration activities of zinc oxide nanoparticles. *Adv Colloid Interface Sci*. 2021;295:102495.
- [5] Bhattacharjee N, Som I, Saha R, Mondal S. A critical review on novel eco-friendly green approach to synthesize zinc oxide nanoparticles for photocatalytic degradation of water pollutants. *Int J Environ Anal Chem*. 2022;1–28.
- [6] Bandeira M, Giovanela M, Roesch-Ely M, Devine DM, Crespo JS. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles: A review of the synthesis methodology and mechanism of formation. *Sustain Chem Pharm*. 2020;15:100223.
- [7] Ekennia AC, Uduagwu DE, Olowu OO, Nwanji OC, Oje OO, Daniel BE, et al. Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles using leaf extracts of *Alchornea laxiflora* and its tyrosinase inhibition and catalytic studies. *Micron*. 2021;141:102964.
- [8] Agarwal H, Venkat Kumar S, Rajeshkumar S. A review on green synthesis of zinc oxide nanoparticles: An eco-friendly approach. *Resour Efficient Technol*. 2017;3(4):406–413.
- [9] Hasmila I, Natsir H, Soekamto NH. Phytochemical analysis and antioxidant activity of soursop leaf extract (*Annona muricata* Linn.). *J Phys Conf Ser*. 2019;1341(3):032027.
- [10] Naiel BA, Fawzy MA, Halmy MWA, Mahmoud AED. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Limonium pruinatum* extract: Characterization and biological activities. *Sci Rep*. 2022;12(1):2–10.
- [11] Hujjatusnaini N, Indah B, Afitri E, Widyastuti R, Ardiansyah A. *Reference book on extraction*. Palangkaraya: Faculty of Mathematics and Natural Sciences, IAIN Palangkaraya; 2021. p. 1–100.
- [12] Pillai AM, Sivasankarapillai VS, Rahdar A, Joseph J, Sadeghfard F, Anuf AR, et al. Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles with antibacterial and antifungal activity. *J Mol Struct*. 2020;1211:128107.
- [13] Mandal AK, Katuwal S, Tettey F, Gupta A, Bhattacharai S, Jaisi S. Current research on zinc oxide nanoparticles: Synthesis, characterization, and biomedical applications. *Nanomaterials*. 2022;12(17):1–15.
- [14] Bayrami A, Ghorbani E, Pouran SR, Aziz HY, Khataee A, Bayrami M. Enriched zinc oxide nanoparticles using *Nasturtium officinale* extract: Synthesis and biomedical application. *Ultrason Sonochem*. 2019;58:104–112.
- [15] Lestari GAD, Cahyadi KD. Biosynthesis of gold nanoparticles mediated by andaliman fruit extract and its antioxidant activity. *J Kimia Sains Apl*. 2022;25(2):50–68.
- [16] Selvanathan V, Aminuzzaman M, Tan LX, Win YF, Cheah ESG, Heng MH, et al. Synthesis and antibacterial evaluation of ZnO nanoparticles derived from *Annona muricata* leaf extract. *J Mater Res Technol*. 2022;20:2931–2941.
- [17] Mohd Yusof H, Abdul Rahman NA, Mohamad R, Zaidan UH, Samsudin AA. Optimization of biosynthesis of zinc oxide nanoparticles and antioxidant properties. *OpenNano*. 2022;8:100106.
- [18] Jomehzadeh N, Koolivand Z, Dahdouh E, Akbari A, Zahedi A, Chamkouri N. Antimicrobial activity of silver and zinc oxide nanoparticles and nanocomposites. *Mater Today Commun*. 2021;27:102457.
- [19] Le TDH, Trinh KS. Synthesis of zinc oxide nanoparticles and their antibacterial activity. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development*; 2020. p. 110–125.
- [20] Rahman F, Patwary MAM, Siddique AAB, Bashar MS, Haque MA, Akter B. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Cocos nucifera* leaf extract. *RSC Adv*. 2022;12:1–10.
- [21] Chamkouri N, Koolivand Z, Niazvand F, Mojaddami A. Phytochemical analysis and biosynthesis of metal nanoparticles from *Phoenix dactylifera*. *Inorg Chem Commun*. 2023;156:111146.

- [22] Sharma R, Kumar N, Sharma P, Yadav A, Aggarwal NK. Biosynthesis and therapeutic potential of green-derived zinc oxide nanoparticles. *Results Surf Interfaces*. 2025;18:100372.
- [23] Ngazizah FN, Romaidha I. Inhibitory activity of *Uncaria cordata* root infusion against *Staphylococcus aureus*. *J Kesehatan Borneo Cendekia*. 2022;6(1):1–9.
- [24] Al-Shammary MA, Al-Mayaly IK. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles and antibacterial activity. *Iraqi J Sci*. 2024:4281–4290.
- [25] Djearmane S, Xiu LJ, Wong LS, Rajamani R, Bharathi D, Kayarohanam S, et al. Antifungal properties of zinc oxide nanoparticles on *Candida albicans*. *Coatings*. 2022;12(12):1864.
- [26] Lyimo GV, Ajayi RF, Maboza E, Adam RZ. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using plant extracts. *MethodsX*. 2022;9:101892.