



BIOSINTESIS NANOPARTIKEL ZINK OKSIDA MENGGUNAKAN EKSTRAK BIJI PEPAYA (*Carica papaya* L.) SEBAGAI AGEN ANTIMIKROBA

Submitted: 6 Maret 2026

Edited: 7 Mei 2026

Accepted: 22 Mei 2026

Tasya Solinia M.S¹, Nur Aira Juwita^{2*}, Muhammad Fauzan Lubis³

¹Jurusan Farmasi, Fakultas Farmasi, Universitas Sumatera Utara, Medan, Indonesia

^{2,3}Departemen Biologi Farmasi, Fakultas Farmasi, Universitas Sumatera Utara, Medan, Indonesia

Email: nurairajuwita@usu.ac.id

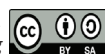
ABSTRAK

Sintesis hijau nanopartikel menggunakan ekstrak tanaman berkembang sebagai metode ramah lingkungan untuk menghasilkan material antimikroba. Pemanfaatan ekstrak air biji pepaya (*Carica papaya* L.) sebagai pereduksi dan penstabil nanopartikel zink oksida (ZnO) masih terbatas. Penelitian ini mensintesis nanopartikel ZnO menggunakan ekstrak air biji pepaya dan mengevaluasi struktur, sifat optik, stabilitas koloid, sifat termal, dan aktivitas antimikrobanya. Sintesis dilakukan menggunakan zink nitrat sebagai prekursor pada pH 8 dengan pemanasan terkendali, kemudian dimurnikan dan dikeringkan. Karakterisasi menunjukkan puncak serapan pada 367 nm dengan energi celah pita 3,38 eV. Analisis difraksi mengonfirmasi struktur kristal heksagonal tipe *wurtzite* dengan ukuran kristalit rata-rata 45 nm. Morfologi partikel hampir sferis dengan ukuran 20-80 nm. Nilai potensial zeta -23,46 mV menunjukkan stabilitas koloid tingkat sedang. Analisis termal menunjukkan adanya residu senyawa fitokimia yang teradsorpsi pada permukaan partikel ZnO. Uji antimikroba menunjukkan peningkatan diameter zona hambat seiring peningkatan konsentrasi. Pada konsentrasi 25 mg/mL, diameter zona hambat terhadap *S. aureus*, *S. epidermidis*, dan *C. albicans* masing-masing sebesar 13,76 ± 0,88 mm; 12,25 ± 0,85 mm; dan 14,88 ± 0,18 mm. Nilai ini menurun pada konsentrasi yang lebih rendah, dengan aktivitas terendah pada konsentrasi 0,375 mg/mL. Hasil ini menunjukkan bahwa ekstrak air biji pepaya berpotensi sebagai bioreduktor alami dalam sintesis nanopartikel ZnO untuk aplikasi antimikroba berbasis nanoteknologi ramah lingkungan.

Kata Kunci : biosintesis, nanopartikel zink oksida, ekstrak air biji pepaya, aktivitas antimikroba

ABSTRACT

*Green synthesis of nanoparticles using plant extracts has emerged as an environmentally friendly method for producing antimicrobial materials. The utilization of papaya seed extract (*Carica papaya* L.) as a reducing and stabilizing agent in the synthesis of zinc oxide (ZnO) nanoparticles remains limited. This study aimed to synthesize ZnO nanoparticles using papaya seed extract and to evaluate their structural properties, optical characteristics, colloidal stability, thermal behavior, and antimicrobial activity. The synthesis was carried out using zinc nitrate as a precursor at pH 8 under controlled heating, followed by purification and drying. Characterization results showed an absorption peak at 367 nm with a band gap energy of 3.38 eV. X-ray diffraction analysis confirmed a hexagonal wurtzite crystal structure with an average crystallite size of 45 nm. The particles exhibited a nearly spherical morphology with sizes ranging from 20-80 nm. A zeta potential value of -23.46 mV indicated moderate colloidal stability. Thermal analysis revealed the presence of residual phytochemical compounds adsorbed on the surface of the ZnO nanoparticles. Antimicrobial activity testing showed an increase in the inhibition zone diameter with increasing nanoparticle concentration. At a concentration of 25 mg/mL, the inhibition zone diameters against *S. aureus*, *S. epidermidis*, and *C. albicans* were 13.76 ± 0.88 mm, 12.25 ± 0.85*



mm, and 14.88 ± 0.18 mm, respectively. These values decreased at lower concentrations, with the lowest activity observed at 0.375 mg/mL. These findings indicate that papaya seed extract has potential as a natural bioreducing agent in the green synthesis of ZnO nanoparticles for environmentally friendly antimicrobial nanotechnology applications.

Keywords : biosynthesis, zinc oxide nanoparticles, papaya seed extract, antimicrobial activity

PENDAHULUAN

Nanoteknologi merupakan cabang ilmu yang mempelajari perancangan, sintesis, serta manipulasi material pada skala nanometer, yaitu sekitar 1-100 nm⁽¹⁾. Pada ukuran tersebut material menunjukkan sifat fisikokimia yang berbeda dibandingkan bentuk *bulk*. Perubahan ini dipengaruhi oleh meningkatnya rasio luas permukaan terhadap volume sehingga memunculkan karakteristik optik, elektronik, dan katalitik yang khas.⁽²⁾ Sifat tersebut menjadikan nanomaterial penting dalam berbagai pengembangan teknologi, termasuk perangkat elektronik, sistem penghantaran obat, teknologi energi, dan pengolahan pencemar lingkungan⁽³⁾.

Sintesis nanopartikel umumnya dilakukan melalui metode kimia dan fisika. Metode tersebut sering memerlukan pereaksi kimia bersifat toksik, energi tinggi, serta berpotensi menghasilkan limbah berbahaya. Kondisi ini menimbulkan permasalahan lingkungan dan meningkatkan biaya proses. Pendekatan sintesis hijau berkembang sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan dengan memanfaatkan ekstrak tanaman atau mikroorganisme sebagai sumber senyawa pereduksi dan penstabil selama pembentukan nanopartikel. Pendekatan ini lebih sederhana, ekonomis, dan berpotensi menghasilkan nanopartikel dengan tingkat biokompatibilitas yang lebih baik.⁽⁴⁾

Salah satu nanomaterial yang banyak diteliti adalah nanopartikel zink oksida (ZnO). Material ini memiliki sifat semikonduktor dengan energi celah pita yang lebar, mobilitas elektron yang tinggi, serta kemampuan penyerapan sinar ultraviolet yang kuat⁽⁵⁾. Karakteristik tersebut memungkinkan nanopartikel ZnO digunakan pada berbagai aplikasi, seperti sensor, proses fotokatalisis, dan material antimikroba. Sejumlah penelitian juga melaporkan bahwa nanopartikel ZnO hasil sintesis hijau menunjukkan bioaktivitas

yang baik dengan tingkat sitotoksitas yang relatif lebih rendah dibandingkan metode sintesis konvensional.⁽⁶⁾

Dalam sintesis hijau, pemilihan ekstrak tanaman menjadi faktor penting karena kandungan senyawa fitokimia di dalamnya dapat berperan dalam proses reduksi ion logam dan stabilisasi nanopartikel. Salah satu sumber alami yang berpotensi dimanfaatkan adalah biji pepaya (*Carica papaya* L.). Tanaman pepaya merupakan komoditas buah tropis yang dibudidayakan secara luas. Biji pepaya sering menjadi hasil samping pengolahan buah dan belum dimanfaatkan secara optimal. Biji ini mengandung berbagai senyawa bioaktif, seperti polifenol, flavonoid, dan enzim⁽⁷⁾. Senyawa tersebut diketahui mampu berperan dalam pembentukan dan stabilisasi nanopartikel⁽⁸⁾.

Beberapa penelitian telah melaporkan sintesis nanopartikel ZnO menggunakan ekstrak tanaman. Namun, kajian yang membahas karakteristik fisikokimia serta aktivitas antimikroba nanopartikel ZnO yang disintesis menggunakan ekstrak air biji pepaya masih terbatas. Informasi mengenai hubungan karakteristik nanopartikel dengan aktivitas biologinya juga masih perlu dikaji lebih lanjut. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mensintesis nanopartikel zink oksida menggunakan ekstrak air biji pepaya melalui pendekatan sintesis hijau serta mengevaluasi karakteristik fisikokimia dan aktivitas antimikrobanya.

METODE PENELITIAN

Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi akuades, air deionisasi, biji pepaya, siprofloksasin, ketokonazol, *Mueller Hinton Agar*, natrium hidroksida, *Nutrient Agar*, *Nutrient Broth*, *Potato Dextrose Agar*, *Potato Dextrose Broth*, serta zink nitrat heksahidrat. Seluruh bahan kimia

yang digunakan memiliki tingkat kemurnian *pro analysis* dan digunakan secara langsung tanpa melalui proses pemurnian lebih lanjut.

Preparasi Ekstrak Tanaman

Biji pepaya (*Carica papaya* L.) dipisahkan dari daging buah, dicuci hingga bersih dan dikeringkan. Biji kering digiling hingga menjadi serbuk halus dan diayak, lalu disimpan dalam wadah tertutup rapat. Ekstraksi dilakukan dengan metode infundasi, yaitu dengan memanaskan 10 g serbuk simplisia dalam 100 mL akuades pada suhu 90°C selama 15 menit. Filtrat yang diperoleh digunakan secara langsung tanpa proses pemekatan atau perlakuan lanjutan sebagai pereduksi alami dan penstabil dalam proses biosintesis nanopartikel⁽⁹⁾.

Biosintesis Nanopartikel ZnO

Larutkan zink nitrat 0,5 M dalam 200 mL air deionisasi, kemudian aduk sambil dipanaskan hingga mencapai suhu 70°C. Tambahkan 20 ml ekstrak air biji pepaya 100%, lalu teteskan larutan NaOH 2 M hingga mencapai pH 8. Campuran diaduk pada suhu 70°C selama 30 menit. Endapan dipisahkan melalui sentrifugasi pada 8000 rpm selama 15 menit pada suhu 5°C, kemudian dicuci dengan air deionisasi. Endapan dikeringkan pada suhu 70°C selama 24 jam, digerus hingga menjadi serbuk halus, dan disimpan dalam wadah tertutup^(10,11).

Karakterisasi Nanopartikel ZnO

Suspensi nanopartikel dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis *double beam* pada rentang panjang gelombang 200-800 nm. Gugus fungsi diidentifikasi menggunakan spektroskopi *Fourier Transform Infrared* (FTIR) *Shimadzu* pada rentang bilangan gelombang 4000-400 cm^{-1} ⁽¹¹⁾. Struktur kristal dianalisis menggunakan *X-ray Diffraction* (XRD) dengan radiasi $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$) pada rentang sudut 2θ sebesar 10-80°. Morfologi permukaan dan komposisi unsur dianalisis menggunakan *Scanning Electron Microscopy* yang dilengkapi *Energy Dispersive X-ray* (SEM-EDX)⁽¹²⁾. Distribusi ukuran partikel dianalisis menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) *Horiba* melalui metode *dynamic light scattering*. Stabilitas koloid

ditentukan melalui pengukuran potensi zeta. Sifat termal dianalisis menggunakan *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) *Mettler* pada rentang suhu 50-600°C dengan laju pemanasan 10 °C/menit⁽¹³⁾.

Uji Aktivitas Antimikroba

Aktivitas antimikroba nanopartikel ZnO diuji menggunakan metode difusi cakram. 1 mL suspensi mikroba yang telah distandarisasi dicampurkan dengan 15 mL media agar steril, yaitu *Mueller Hinton Agar* untuk bakteri dan *Potato Dextrose Agar* untuk jamur, kemudian dituangkan ke dalam cawan petri dan dibiarkan memadat. Kertas cakram steril yang telah ditetesi larutan nanopartikel ZnO pada berbagai konsentrasi diletakkan pada permukaan media. Cawan diinkubasi pada suhu 37°C selama 24 jam untuk bakteri dan 25°C selama 48 jam untuk jamur. Diameter zona hambat diukur dalam milimeter menggunakan jangka sorong digital. Setiap perlakuan dilakukan dalam tiga kali pengulangan⁽¹⁴⁾.

Analisis Statistik

Data diameter zona hambat disajikan sebagai rerata \pm standar deviasi. Uji normalitas dilakukan menggunakan uji Shapiro-Wilk dan homogenitas varians menggunakan uji Levene. Data yang memenuhi asumsi normalitas dan homogenitas dianalisis menggunakan *One-Way ANOVA* pada tingkat signifikansi $p < 0,05$, sedangkan data yang tidak memenuhi asumsi normalitas dianalisis menggunakan uji nonparametrik Kruskal-Wallis menggunakan perangkat lunak IBM SPSS *Statistics* versi 22^(15,16).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Biosintesis Nanopartikel ZnO

Biosintesis nanopartikel ZnO dari ekstrak air biji pepaya menghasilkan 32,39% serbuk putih nanopartikel (Gambar 1). Proses pembentukan nanopartikel ini dipengaruhi oleh kandungan senyawa aktif dalam ekstrak yang berperan sebagai agen pereduksi dan penstabil. Hasil skrining fitokimia menunjukkan bahwa ekstrak air biji pepaya mengandung metabolit sekunder berupa alkaloid, flavonoid, saponin, tanin, steroid/triterpenoid, dan glikosida. Senyawa-

senyawa tersebut berperan dalam proses pembentukan nanopartikel ZnO melalui reaksi reduksi ion Zn^{2+} . Polifenol, flavonoid, dan protein berperan dalam mereduksi ion logam dan menstabilkan partikel yang terbentuk melalui interaksi permukaan nanopartikel. Interaksi tersebut memfasilitasi tahapan nukleasi dan pertumbuhan kristal ZnO sehingga menghasilkan partikel pada skala nanometer⁽¹⁷⁾. Kondisi basa pada pH 8 meningkatkan derajat deprotonasi gugus hidroksil dan gugus fungsional lain pada senyawa fitokimia sehingga kemampuan reduksi terhadap ion Zn^{2+} menjadi lebih efektif⁽¹⁸⁾. Pada kondisi ini terbentuk senyawa antara berupa zink hidroksida ($Zn(OH)_2$) yang selanjutnya mengalami dehidrasi termal dan menghasilkan ZnO kristalin. Lingkungan reaksi yang bersifat basa juga berperan dalam menekan terbentuknya produk samping serta mengurangi kecenderungan aglomerasi partikel selama proses pertumbuhan kristal⁽⁸⁾. Proses sintesis terjadi perubahan warna larutan dari coklat menjadi kuning pucat setelah penambahan basa, kemudian membentuk suspensi putih susu yang stabil yang merupakan proses pembentukan inti partikel (*nucleation*) dan nanopartikel ZnO⁽¹⁹⁾.



Gambar 1. Serbuk nanopartikel ZnO setelah proses pengeringan.

Karakterisasi Nanopartikel ZnO

Pembentukan dan karakteristik optik nanopartikel ZnO dianalisis menggunakan spektroskopi UV-Vis. Spektrum serapan menunjukkan adanya puncak absorbansi pada panjang gelombang 367 nm, yang merupakan karakteristik serapan nanopartikel

ZnO dan menandakan terbentuknya partikel ZnO⁽²⁰⁾. Puncak serapan yang relatif tajam menunjukkan distribusi ukuran partikel yang cukup seragam. Hal ini berkaitan dengan peran senyawa fitokimia dalam ekstrak air biji pepaya yang bertindak sebagai penstabil (*capping agent*) selama proses sintesis sehingga mampu mengendalikan proses nukleasi dan pertumbuhan partikel serta menekan terjadinya aglomerasi⁽²¹⁾.

Energi celah pita optik (*band gap energy*, E_g) nanopartikel ZnO dihitung menggunakan metode plot Tauc untuk semikonduktor dengan transisi langsung. Hasil perhitungan menunjukkan nilai E_g sebesar 3,38 eV yang sesuai dengan karakteristik semikonduktor ZnO dan sejalan dengan laporan pada nanopartikel ZnO hasil sintesis ramah lingkungan⁽²²⁾. Nilai tersebut sedikit lebih tinggi dibandingkan band gap ZnO dalam bentuk bulk yang umumnya sekitar 3,37 eV. Peningkatan ini berkaitan dengan efek *quantum confinement* pada partikel berukuran nano serta kemungkinan adanya cacat permukaan atau residu senyawa organik dari ekstrak tanaman yang teradsorpsi pada permukaan nanopartikel⁽²³⁾.

Spektroskopi *Fourier Transform Infrared* (FTIR) digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang berperan dalam proses sintesis dan stabilisasi nanopartikel ZnO. Spektrum FTIR ekstrak air biji pepaya menunjukkan beberapa pita serapan karakteristik pada bilangan gelombang $3734,19\text{ cm}^{-1}$ yang berkaitan dengan regangan O-H bebas, $3468,01\text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan regangan O-H berikatan hidrogen dari senyawa fenol dan alkohol, serta pita pada $2924,09\text{ cm}^{-1}$ dan $2852,72\text{ cm}^{-1}$ yang merepresentasikan regangan C-H asimetris dan simetris dari rantai alifatik. Pita serapan pada $1647,21\text{ cm}^{-1}$ berkaitan dengan regangan gugus karbonil (C=O). Pola spektrum ini menunjukkan keberadaan senyawa fitokimia, seperti senyawa fenolik, senyawa alifatik, dan senyawa yang mengandung gugus karbonil dalam ekstrak tanaman⁽²⁴⁾. Setelah sintesis, spektrum FTIR nanopartikel ZnO menunjukkan pergeseran pita O-H menjadi $3437,15\text{ cm}^{-1}$ dengan intensitas yang menurun, yang menunjukkan

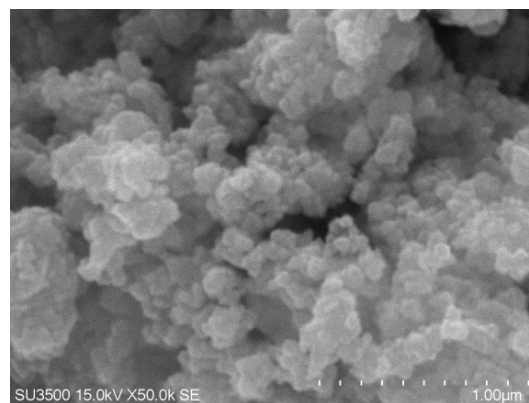
keterlibatan gugus hidroksil dalam koordinasi dengan ion Zn^{2+} selama proses reduksi. Munculnya pita regangan Zn-O pada $441,70\text{ cm}^{-1}$ mengonfirmasi terbentuknya struktur ZnO⁽²⁵⁾. Pita pada $1382,96\text{ cm}^{-1}$ dan $995,27\text{ cm}^{-1}$ masing-masing berkaitan dengan regangan C-N dan vibrasi C-O yang menunjukkan keberadaan residu flavonoid dan polifenol yang berperan sebagai penstabil (*capping agent*). Keberadaan regangan C-H alifatik pada 2924 cm^{-1} serta pita lemah pada $1544,98\text{ cm}^{-1}$ yang berkaitan dengan pembengkokan N-H menunjukkan kemungkinan kontribusi protein atau turunan asam amino dari ekstrak dalam proses stabilisasi permukaan nanopartikel⁽²⁶⁾. Secara keseluruhan, spektrum FTIR mengonfirmasi bahwa senyawa fitokimia dalam ekstrak air biji pepaya berperan sebagai agen pereduksi sekaligus penstabil dalam biosintesis nanopartikel ZnO.

Analisis XRD mengonfirmasi struktur kristalin nanopartikel ZnO hasil biosintesis. Puncak difraksi pada $2\theta = 31,858^\circ, 34,522^\circ, 36,367^\circ, 47,703^\circ, 56,810^\circ, 63,122^\circ, 66,680^\circ, 68,244^\circ, 69,402^\circ, 72,891^\circ, 77,279^\circ,$ dan $81,906^\circ$ diindeks masing-masing pada bidang kristalografi (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201), (004), (202), dan (203)¹. Pola tersebut sesuai dengan struktur kristal heksagonal tipe wurtzite ZnO berdasarkan standar JCPDS No. 36-1451⁽²⁷⁾. Puncak difraksi yang tajam menunjukkan kristalinitas tinggi, sedangkan tidak ditemukannya puncak lain menandakan kemurnian fase yang baik.

Ukuran kristalit dihitung menggunakan persamaan Debye-Scherrer dari nilai *full width at half maximum* (FWHM) puncak bidang (101) pada $2\theta = 36,36^\circ$, menghasilkan ukuran kristalit rata-rata sekitar 45 nm. Ukuran tersebut menunjukkan terbentuknya domain kristal pada skala nanometer dengan struktur yang berkembang baik, yang berpotensi meningkatkan stabilitas dan aktivitas fotokatalitik material⁽²⁸⁾. Hasil ini menunjukkan bahwa proses nukleasi dan pertumbuhan nanopartikel berlangsung terkontrol selama sintesis hijau yang dimediasi senyawa fitokimia dalam ekstrak air biji pepaya.

Hasil ini sejalan dengan laporan sintesis ZnO berbasis tanaman menggunakan ekstrak *Myristica fragrans* ($41,23\text{ nm}$)⁽²⁹⁾, *Salvia rosmarinus* ($46,14\text{ nm}$)⁽³⁰⁾, dan *Hibiscus sabdariffa* ($38,63\text{ nm}$)⁽³¹⁾. Kesamaan struktur *wurtzite* dan ukuran pada skala nanometer menunjukkan bahwa metode sintesis hijau mampu menghasilkan nanopartikel ZnO dengan kristalinitas yang baik serta berpotensi untuk aplikasi fotokatalisis dan aktivitas antimikroba.

Morfologi nanopartikel ZnO diamati menggunakan SEM. Mikrograf SEM (Gambar 2) menunjukkan partikel berbentuk hampir sferis (*quasi-spherical*) dengan kecenderungan aglomerasi. Ukuran partikel primer berkisar 20-80 nm. Aglomerasi ini umum terjadi pada nanopartikel hasil sintesis hijau, dipengaruhi oleh residu senyawa organik ekstrak tanaman yang berperan sebagai *capping agent* serta proses pengeringan selama preparasi sampel sebelum pengamatan SEM⁽³²⁾.



Gambar 2. Morfologi permukaan berdasarkan analisis SEM.

Analisis EDX digunakan untuk menentukan komposisi unsur nanopartikel ZnO hasil biosintesis. Spektrum EDX menunjukkan puncak utama unsur zink (Zn) dan oksigen (O) dengan persentase berat masing-masing 86,91% dan 13,09%. Tidak terdeteksinya unsur lain menunjukkan kemurnian material yang tinggi dan sejalan dengan laporan sintesis ZnO berbasis tanaman lainnya⁽³³⁾. Dominasi unsur zink juga umum ditemukan pada nanopartikel ZnO hasil sintesis hijau, yang sering menunjukkan komposisi non-stoikiometrik. Beberapa

penelitian melaporkan komposisi ZnO dari ekstrak *Cayratia pedata* sebesar 78,32% Zn dan 12,78% O⁽³⁴⁾, dari *Cynodon dactylon* sebesar 74,44% Zn dan 20,08% O⁽³⁵⁾, serta dari *Garcinia cowa* sebesar 55,41% Zn dan 44,59% O⁽³⁶⁾. Kesamaan pola tersebut menunjukkan bahwa sintesis berbasis ekstrak tanaman secara konsisten menghasilkan nanopartikel ZnO dengan komposisi unsur yang didominasi zink.

Sifat koloid nanopartikel ZnO dianalisis menggunakan PSA dengan metode *Dynamic Light Scattering* (DLS). Diameter hidrodinamik tercatat sebesar $403,86 \pm 35,48$ nm dengan nilai *polydispersity index* (PDI) $0,71 \pm 0,17$. Nilai tersebut menunjukkan agregasi moderat dan distribusi ukuran partikel yang cukup luas. Fenomena ini umum pada nanopartikel hasil sintesis berbasis tumbuhan, akibat keberadaan senyawa fitokimia yang bertindak sebagai penstabil organik dan mendorong pembentukan kluster koloid⁽³⁷⁾. Penelitian lain juga melaporkan diameter hidrodinamik yang lebih besar dibanding ukuran partikel primer, misalnya 337,3 nm dengan PDI 0,400⁽³⁸⁾, 652,5 nm dengan PDI 0,471 pada ZnO dari ekstrak *rosemary*⁽³⁹⁾, serta sekitar 187 nm dengan PDI 0,298 pada ZnO dari ekstrak kulit *Punica granatum*⁽⁴⁰⁾. Pola tersebut menunjukkan bahwa senyawa organik dari ekstrak tanaman memengaruhi perilaku koloid dan distribusi ukuran nanopartikel ZnO hasil biosintesis.

Nilai zeta potensial yang diperoleh sebesar $-23,46 \pm 0,51$ mV, yang menunjukkan stabilitas koloid pada tingkat moderat. Muatan negatif tersebut kemungkinan berasal dari senyawa fitokimia bermuatan anionik, seperti senyawa fenolik, gugus karboksilat, dan flavonoid yang teradsorpsi pada permukaan nanopartikel dari ekstrak air biji pepaya. Senyawa tersebut berperan sebagai penstabil permukaan. Nilai ini sejalan dengan beberapa laporan sebelumnya pada nanopartikel ZnO berbasis ekstrak tanaman, misalnya *Acalypha indica* (-27 mV)⁽⁴¹⁾, *Moringa oleifera* (-21,9 mV)⁽⁴²⁾, dan *Allium sativum* (-24,62 mV)⁽⁴³⁾. Kesamaan rentang nilai tersebut menunjukkan bahwa senyawa fitokimia berperan dalam menentukan muatan permukaan nanopartikel. Muatan

ini menghasilkan gaya tolak elektrostatis antarpartikel yang dapat menekan agregasi dan meningkatkan stabilitas dispersi dalam medium berair. Nilai zeta potensial dengan magnitudo di atas $|-20|$ mV umumnya menunjukkan gaya tolak elektrostatis yang cukup untuk mempertahankan kestabilan dispersi pada kondisi statis⁽⁴¹⁾.

Perilaku termal nanopartikel ZnO dianalisis menggunakan DSC. Termogram menunjukkan satu puncak endotermik pada suhu 186,92°C yang berkaitan dengan pelepasan air teradsorpsi serta senyawa organik volatil. Dua puncak eksotermik muncul pada suhu 303,08°C dan 332,00°C yang berkaitan dengan dekomposisi oksidatif senyawa organik dari ekstrak air biji pepaya yang menutupi permukaan nanopartikel⁽⁴⁴⁾. Keberadaan beberapa puncak eksotermik menunjukkan bahwa lapisan organik pada permukaan nanopartikel terdiri atas berbagai biomolekul, seperti polifenol, flavonoid, dan protein, yang terdegradasi pada rentang suhu berbeda. Pola dekomposisi bertahap ini juga dilaporkan pada nanopartikel ZnO hasil sintesis berbasis tumbuhan lainnya. Hasil penelitian *Matinise et al*, nanopartikel ZnO dari ekstrak *Moringa oleifera* menunjukkan transisi endotermik dan eksotermik yang berkaitan dengan pelepasan kelembapan dan degradasi senyawa organik⁽⁴⁵⁾. Pembentukan ZnO hasil sintesis hijau juga menunjukkan pola stabilitas termal yang serupa⁽⁴⁶⁾. Puncak transformasi fase tambahan yang tidak ada pada rentang suhu pengujian menunjukkan bahwa inti kristalin ZnO tetap stabil secara struktural, sedangkan senyawa organik dari ekstrak tanaman berperan dalam menstabilkan permukaan nanopartikel.

Aktivitas Antimikroba

Aktivitas antimikroba nanopartikel ZnO hasil biosintesis diuji terhadap bakteri Gram-positif *Staphylococcus aureus* dan *Staphylococcus epidermidis*, serta jamur patogen *Candida albicans*. Pengujian dilakukan pada konsentrasi nanopartikel 25 - 0,375 mg/mL menggunakan metode difusi cakram. Kontrol positif yang digunakan adalah siprofloksasin 1% untuk bakteri dan ketokonazol 1% untuk jamur. Aktivitas

antimikroba ditentukan melalui pengukuran diameter zona hambat yang terbentuk di sekitar cakram kertas yang mengandung nanopartikel ZnO. Besarnya zona

hambat menunjukkan tingkat sensitivitas mikroorganisme terhadap nanopartikel serta mencerminkan potensi aktivitas antimikroba yang dihasilkan.

Tabel 1. Aktivitas antimikroba nanopartikel ZnO pada berbagai konsentrasi.

Konsentrasi nanopartikel ZnO (mg/mL)	Rata-rata diameter zona hambat (mm ± SD)		
	<i>S. aureus</i>	<i>S. epidermidis</i>	<i>C. albicans</i>
25	13,76 ± 0,88	12,25 ± 0,85	14,88 ± 0,18
12,5	11,08 ± 0,56	11,86 ± 0,63	12,98 ± 0,57
6,25	9,96 ± 0,80	10,63 ± 0,58	8,30 ± 0,32
3,125	8,95 ± 0,75	7,91 ± 1,50	7,73 ± 1,31
1,5	7,41 ± 1,23	7,68 ± 0,88	-
0,75	6,46 ± 0,80	7,01 ± 0,92	-
0,375	-	-	-
Ekstrak air biji pepaya 100%	7,89 ± 0,52	7,13 ± 0,55	6,65 ± 0,89
ZnO tanpa ekstrak	10,27 ± 0,33	9,23 ± 0,23	8,43 ± 0,56
Kontrol positif (siprofloksasin 1%)	22,50 ± 1,80	22,45 ± 0,72	-
Kontrol positif (ketokonazol 1%)	-	-	38,58 ± 0,61
Kontrol negatif	-	-	-

Hasil diameter zona hambat ZnO meningkat seiring kenaikan konsentrasi nanopartikel terhadap *S. aureus*, *S. epidermidis*, dan *C. albicans* (Tabel 1). Pada *S. aureus*, zona hambat menurun dari 13,76 ± 0,88 mm pada konsentrasi 25 mg/mL menjadi 6,46 ± 0,80 mm pada konsentrasi 0,75 mg/mL. Pola serupa terlihat pada *S. epidermidis*, dengan penurunan dari 12,25 ± 0,85 mm menjadi 7,01 ± 0,92 mm pada rentang konsentrasi yang sama. *C. albicans* menunjukkan sensitivitas tertinggi pada 25 mg/mL dengan zona hambat sebesar 14,88 ± 0,18 mm, namun tidak menunjukkan aktivitas penghambatan pada konsentrasi ≤ 1,5 mg/mL. Kontrol positif menghasilkan zona hambat lebih besar, sedangkan kontrol negatif tidak menunjukkan aktivitas penghambatan⁽¹⁰⁾. Hasil ini menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO hasil biosintesis memiliki aktivitas antimikroba terhadap mikroorganisme uji.

Aktivitas antimikroba menunjukkan hubungan yang bergantung pada konsentrasi. Konsentrasi nanopartikel yang lebih tinggi menghasilkan zona hambat lebih besar. Mekanisme ini berkaitan dengan interaksi nanopartikel ZnO dengan membran sel mikroba dan pembentukan *reactive oxygen species* (ROS) yang memicu stres oksidatif dan kerusakan sel⁽⁴⁷⁾. Aktivitas antimikroba ini terutama dipengaruhi oleh sifat intrinsik nanopartikel ZnO murni, yang juga telah dilaporkan efektif pada ZnO tanpa modifikasi ekstrak tanaman. Penggunaan ekstrak dalam proses biosintesis berperan dalam membentuk dan menstabilkan nanopartikel, sekaligus memungkinkan adanya senyawa fitokimia yang teradsorpsi pada permukaan partikel yang dapat memberikan kontribusi tambahan terhadap aktivitas antimikroba. Dengan demikian, aktivitas yang diamati mencerminkan peran utama nanopartikel ZnO dengan dukungan senyawa bioaktif

dari ekstrak⁽⁴⁸⁾. Pada *C. albicans*, aktivitas antijamur terutama terlihat pada konsentrasi tinggi, sedangkan konsentrasi rendah tidak memberikan penghambatan yang jelas. Hasil ini menunjukkan adanya konsentrasi efektif minimum yang kemungkinan dipengaruhi oleh struktur dinding sel khamir yang lebih kompleks. Pola peningkatan aktivitas seiring kenaikan konsentrasi juga dilaporkan pada berbagai nanopartikel ZnO hasil sintesis berbasis ekstrak tumbuhan, yang menunjukkan peran interaksi nanopartikel-sel dan ROS dalam penghambatan mikroorganisme⁽⁴⁹⁾.

Hasil analisis statistik dilakukan terhadap pengaruh konsentrasi dengan diameter zona hambat. Data *S. aureus* dianalisis menggunakan uji Kruskal-Wallis. Hasil uji menunjukkan nilai statistik 25,341 yang lebih besar dari nilai kritis 15,507, menandakan adanya pengaruh signifikan konsentrasi terhadap diameter zona hambat. Data *S. epidermidis* dan *C. albicans* dianalisis menggunakan *one-way ANOVA*. Hasil analisis menunjukkan pengaruh sangat signifikan konsentrasi nanopartikel ZnO terhadap aktivitas antimikroba dengan nilai $p = 0,000$. Secara keseluruhan, konsentrasi nanopartikel ZnO berpengaruh signifikan terhadap aktivitas antimikroba pada seluruh mikroorganisme uji, meskipun respons berbeda antar mikroorganisme.

SIMPULAN

Biosintesis nanopartikel ZnO menggunakan ekstrak air biji pepaya (*Carica papaya* L.) menghasilkan nanopartikel berstruktur kristalin *wurtzite* dengan ukuran pada skala nanometer (45 nm). Karakterisasi menunjukkan bahwa senyawa fitokimia dalam ekstrak berperan sebagai agen pereduksi dan penstabil selama sintesis, yang mempengaruhi sifat struktural, koloid, dan termal nanopartikel. Uji aktivitas antimikroba menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO mampu menghambat pertumbuhan *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus epidermidis*, dan *Candida albicans*, dengan efek yang meningkat seiring kenaikan konsentrasi. Hasil ini menunjukkan bahwa biosintesis berbasis ekstrak air biji pepaya

berpotensi sebagai metode ramah lingkungan untuk menghasilkan nanopartikel ZnO dengan aktivitas antimikroba.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Nanosains dan Nanoteknologi ITB, Institut Teknologi Bandung, Indonesia, atas dukungan fasilitas dan bantuan teknis yang diberikan dalam pelaksanaan karakterisasi nanopartikel ZnO.

DAFTAR PUSTAKA

1. Avila-Quezada GD, Ingle AP, Golińska P, Rai M. Strategic applications of nano-fertilizers for sustainable agriculture: Benefits and bottlenecks. *Nanotechnology Reviews*. 2022 Jan 1;11(1):2123-40.
2. Clarke B, Ghandi K. The Interplay of Growth Mechanism and Properties of ZnO Nanostructures for Different Applications. *Small*. 2023 July;19(44):1.
3. Saeed M, Marwani HM, Shahzad U, Asiri AM, Rahman MM. Recent Advances, Challenges, and Future Perspectives of ZnO Nanostructure Materials Towards Energy Applications. *Chemical Record (New York, NY)* [Internet]. 2023 May 30;e202300106. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37249417/>
4. Madani M, Hosny S, Alshangiti DM, Nady N, Alkhursani SA, Alkhaldi H, *et al*. Green synthesis of nanoparticles for varied applications: Green renewable resources and energy-efficient synthetic routes. *Nanotechnology Reviews*. 2022 Jan 1;11(1):731-59.
5. Balogun SW, Oyeshola HO, Ajani AS, James OO, Awodele MK, Adewumi HK, *et al*. Synthesis, characterization, and optoelectronic properties of zinc oxide nanoparticles: A precursor as electron transport layer. *Heliyon*. 2024 May;10(9):e29452.
6. Dutta G, Santosh kumar Chinnaiyan, Abimanyu Sugumaran, Damodharan Narayanasamy. Sustainable bioactivity enhancement of ZnO–Ag nanoparticles in antimicrobial, antibiofilm, lung cancer, and photocatalytic applications. *RSC Advances*. 2023 Jan 1;13(38):26663-82.

7. Jiao M, Liu C, Prieto MA, Lu X, Wu W, Sun J, *et al.* Biological Functions and Utilization of Different Part of the Papaya: A Review. *Food Reviews International*. 2022 Sep 26;24-1.
8. Patra JK, Shin HS, Yang IJ, Huong T, Das G. Sustainable Utilization of Food Biowaste (Papaya Peel) Extract for Gold Nanoparticle Biosynthesis and Investigation of Its Multi-Functional Potentials. *Antioxidants* [Internet]. 2024 May 9;13(5):581-1. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38790686/>
9. Nuri N, Puspitasari Endah, Triatmoko Bawon, Dianasari Dewi, Muslichah Siti, Nugraha Arisatia. Assessment of Extraction Methods Effects on the Biological Activities (Antioxidant and Antiamylase) and Chemistry (Total Phenolics and Flavonoids) of *Guazuma ulmifolia* Leaves. *Jordan Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2024 Mar 19;17(1):151-62.
10. Naiel B, Fawzy M, Halmy MWA, Mahmoud AED. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using Sea Lavender (*Limonium pruinatum* L. Chaz.) extract: characterization, evaluation of anti-skin cancer, antimicrobial and antioxidant potentials. *Scientific Reports* [Internet]. 2022 Nov 27;12(1):20370. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-24805-2>
11. Mansur H, Suleiman S, Mohammed SE, Momoh H. Green Synthesis of Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticles Using Aqueous Leaves Extract of *Ficus sycomorus* (Sycamore Fig) and its Antimicrobial Evaluation. *Dutse Journal of Pure and Applied Sciences (DUJOPAS)*. 2025;11(1a):3.
12. Pasiczna-Patkowska S, Cichy M, Flieger J. Application of Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy in Characterization of Green Synthesized Nanoparticles. *Molecules*. 2025;30(3):684.
13. Renu Jagdish, Nehra K. *Bryophyllum pinnatum* mediated synthesis of zinc oxide nanoparticles: characterization and application as biocontrol agents for multi-drug-resistant uropathogens. *Heliyon*. 2022 Oct 1;8(10):e11080-0.
14. Ashwini J, Aswathy TR, Rahul AB, Thara GM, Nair AS. Synthesis and Characterization of Zinc Oxide Nanoparticles Using *Acacia caesia* Bark Extract and Its Photocatalytic and Antimicrobial Activities. *Catalysts*. 2021 Dec 10;11(12):1507.
15. Johnson RW. Alternate Forms of The One-way ANOVA F and Kruskal–Wallis Test Statistics. *Journal of Statistics and Data Science Education*. 2022;30(1):85-82.
16. Ajeli Bazkiayi A, Amdjadi P, Yadegari Z, Shahbazi R, Dalaie K, Shahbazi S, *et al.* Antibacterial and physicochemical properties of a zinc oxide nanoparticle-modified orthodontic adhesive. *Journal of Orofacial Orthopedics / Fortschritte der Kieferorthopädie*. 2025 Aug 5.
17. Bouttier-Figueroa DC, Cortez-Valadez M, Flores-Acosta M, Robles-Zepeda RE. Green Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using Plant Extracts and Their Antimicrobial Activity. *BioNanoScience*. 2024 Jun 6;14(3):3385-400.
18. Chand K, Cao D, Eldin Fouad D, Hussain Shah A, Qadeer Dayo A, Zhu K, *et al.* Green synthesis, characterization and photocatalytic application of silver nanoparticles synthesized by various plant extracts. *Arabian Journal of Chemistry*. 2020 Nov;13(11):8248-61.
19. Bala N, Saha S, Chakraborty M, Maiti M, Das S, Basu R, *et al.* Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Hibiscus subdariffa* leaf extract: effect of temperature on synthesis, anti-bacterial activity and anti-diabetic activity. *RSC Advances* [Internet]. 2015;5(7):4993-5003.
20. Noshaba Parven, Khalida Faryal Almani, Bhatti MA, Aneela Tahira, Omm-e-Hany, Shah AA, *et al.* *Moringa oleifera* leaves extract-mediated synthesis of ZnO nanostructures for the enhanced photocatalytic oxidation of erythrosine. *RSC Advances* [Internet]. 2025 Jan 1;15(4):2810-24.

21. El-Kemary M, El-Sayed S, Abdel-Mottaleb M. Eco-friendly synthesis of ZnO nanoparticles using *Azadirachta indica* leaf extract: Optical properties and photocatalytic performance. *Optical Materials*. 2022;134:113157.
22. Kulkarni S, Jadhav M, Raikar P. Optical band gap tuning in plant-mediated ZnO nanoparticles: Role of extract concentration and pH. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2023;34(5):467.
23. Chen Y, Zhang L, Wang H. Quantum size effect in green synthesized ZnO nanoparticles: Correlation between band gap and particle size. *Chemical Physics Letters*. 2022;806:140036.
24. Agada R, Usman WA, Shehu S, Thagariki D. In vitro and in vivo inhibitory effects of *Carica papaya* seed on α -amylase and α -glucosidase enzymes. *Heliyon*. 2020;6(3).
25. Khuwaja G, Chaudhary AA, Mashlawi AM, Alamri AA, Alfifi F, Anjum K, *et al.* Biosynthesis of Zinc Oxide Nanostructures Using Leaf Extract of *Azadirachta indica*: Characterizations and In Silico and Nematicidal Potentials. *Catalysts*. 2025;15(693):1-27.
26. Kaur H, Kumar S, Bouzid G. Exploring the role of different phytochemicals on the morphological variations of metal and metal oxide nanomaterials for biomedical application. *Interactions*. 2024;245(1):234.
27. Kolahalam LA, Prasad KRS, Murali Krishna P, Supraja N. *Saussurea lappa* plant rhizome extract-based zinc oxide nanoparticles: synthesis, characterization and its antibacterial, antifungal activities and cytotoxic studies against Chinese Hamster Ovary (CHO) cell lines. *Heliyon*. 2021 Jun;7(6):e07265.
28. Tiwari AK, Jha S, Tripathi SK, Shukla R, Awasthi RR, Bhardwaj AK, *et al.* Spectroscopic investigations of green synthesized zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs): antioxidant and antibacterial activity. *Deleted Journal*. 2024 Jul 24;6(8).
29. Faisal S, Jan H, Shah SA, Shah S, Khan A, Akbar MT, *et al.* Green Synthesis of Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticles Using Aqueous Fruit Extracts of *Myristica fragrans*: Their Characterizations and Biological and Environmental Applications. *ACS Omega*. 2021 Mar 30;6(14):9709-22.
30. Khadim NS, Mohammed DS, Albukhaty S, Al-aqbi ZT, Qate F. Green Synthesis and Antibacterial Activity of Zinc Oxide Nanoparticles Using Rosemary (*Salvia rosmarinus*) Extract. *Jundishapur Journal of Natural Pharmaceutical Products*. 2025 Aug 31;20(4).
31. Soto-Robles CA, Luque PA, Gómez-Gutiérrez CM, Nava O, Vilchis-Nestor AR, Lugo-Medina E, *et al.* Study on the effect of the concentration of *Hibiscus sabdariffa* extract on the green synthesis of ZnO nanoparticles. *Results in Physics*. 2019 Dec;15:102807.
32. Huang G, Chen Z, Pan Z, Xu Y, Hu H, Wang Y. Chemical Dissolution-Assisted Ultrafine Grinding for Preparation of Quasi-Spherical Colloids of Zinc Oxide. *Materials*. 2023 Mar 23;16(7):2558.
33. Dallatu YA, Shallangwa GA, Africa SN. Synthesis and growth of spherical ZnO nanoparticles using different amount of plant extract. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*. 2021 Feb 16;24(12):2147-51.
34. Acharya R, Tettey F, Gupta A, Khaga Raj Sharma, Niranjana Parajuli, Bhattarai N. Bioinspired synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles and assessment of their cytotoxicity and antimicrobial efficacy. *Deleted Journal*. 2024 Feb 21;6(3).
35. Jayachandran A, T.R. A, Nair AS. Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using *Cayratia pedata* leaf extract. *Biochemistry and Biophysics Reports [Internet]*. 2021 Apr 8;26.
36. Chowdhury NR, Nourin Pritha, Sajid S, Mesbah MB, Islam ME, Hakim M, *et al.* Plant-mediated green synthesis of ZnO nanoparticles utilizing *Garcinia cowa* leaf extract: Structural, bioactive, and In Silico molecular docking insights. *Next Materials*. 2025 Dec 31;10:101575-5.

37. Muslim AM, Fezaa AH, Naji IS. Green Synthesis of ZnO Nanoparticles Using Diverse Plant Extracts. *Academia Open*. 2025 Jun 28;10(1).
38. Al-Harbi HF, Awad MA, Ortashi KMO, AL-Humaid LA, Ibrahim AA, Al-Huqail AA. Green Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles: Physicochemical Characterization, Photocatalytic Performance, and Evaluation of Their Impact on Seed Germination Parameters in Crops. *Catalysts*. 2025;15(924).
39. Khadim NS, Mohammed DS, Albukhaty S, T. Al-aqbi Z, Qate F. Green Synthesis and Antibacterial Activity of Zinc Oxide Nanoparticles Using Rosemary (*Salvia rosmarinus*) Extract. *Jundishapur Journal of Natural Pharmaceutical Products*. 2025 Aug 31;20(4).
40. Mohammadi A, Hashemi N, Ghassabzadeh M, Sharafi A, Yazdinezhad A, Danafar H. Green synthesis and toxicological evaluation of zinc oxide nanoparticles utilizing *Punica granatum* fruit Peel extract: an eco-friendly approach. *Scientific Reports*. 2025;15(20853).
41. Kamarajan G, Anburaj DB, Porkalai V, Muthuvel A, Nedunchezian G. Green synthesis of ZnO nanoparticles using *Acalypha indica* leaf extract and their photocatalyst degradation and antibacterial activity. *Journal of the Indian Chemical Society*. 2022 Oct;99(10):100695.
42. Alsolmi MM, El-Naggar NEA, Alqurashi MI, Hamouda RA. Biofabrication of zinc oxide nanoparticles using *Moringa oleifera*, characterization and statistical optimization for their application in crystal violet adsorption. *Scientific Reports [Internet]*. 2025 Jan 30 [cited 2025 Apr 23];15(1).
43. Younas MU, Iqbal M, Ahmad N, Iqbal S, Kausar A, Nazir A, *et al.* Biogenic synthesis of zinc oxide nanoparticles using NARC G1 garlic (*Allium sativum*) extract, their photocatalytic activity for dye degradation and antioxidant activity of the extract. *Results in Chemistry*. 2025 Jan;13:102035.
44. Hassan K, Hossain R, Farzana R, Sahajwalla V. Microrecycled zinc oxide nanoparticles (ZnO NP) recovered from spent Zn-C batteries for VOC detection using ZnO sensor. *Analytica Chimica Acta*. 2021;1165(338563).
45. Matinise N, Fuku XG, Kaviyarasu K, Mayedwa N, Maaza M. ZnO nanoparticles via *Moringa oleifera* green synthesis: Physical properties & mechanism of formation. *Applied Surface Science [Internet]*. 2017 Jun 1;406:339-47.
46. Benzarti Z, Neiva J, Faia P, Silva E, Carvalho S, Devesa S. Novel Green Synthesis Route of ZnO Nanoparticles for Dielectric Applications. *Nanomaterials*. 2025 Jun 26;15(13):991.
47. Digisu AW, Yaebyo AB, Kebede WL, Kebede DY, Molla DK. Biogenic Synthesis, Optimization, and characterization of zinc oxide nanoparticles using *Rumex abyssinicus* Jacq root extract for antioxidant and antibacterial activities. *Results in Chemistry*. 2024 Dec;12:101857.
48. Jin, S, Jin, H. Antimicrobial Activity of Zinc Oxide Nano/Microparticles and Their Combinations against Pathogenic Microorganisms for Biomedical Applications: From Physicochemical Characteristics to Pharmacological Aspects. *Nanomaterials*. 2021 Jan 20;11(2):1-29.
49. Akhras N, Çelekli A, Bozkurt H. Enhanced Antimicrobial Activity of Green-Synthesized *Artemisia*-ZnO Nanoparticles: A Comparative Study with Pure ZnO Nanoparticles and Plant Extract. *Foods*. 2025 Jul 11;14(14):2449.