

NANOPARTIKEL SINTESIS HIJAU BERBASIS SENYAWA ALAMI SEBAGAI PLATFORM INOVATIF DALAM TERAPI INFEKSI BAKTERI: *LITERATURE REVIEW*

Nur Afni^{1*}, Andi Eka Kartika¹

¹Jurusan Kimia FMIPA Universitas Negeri Makassar, Makassar, Indonesia

ARTICLE INFORMATION

Received: 17, September, 2025
Accepted: 21, Oktober, 2025
Published: 31, Oktober, 2025

KEYWORD

Sintesis hijau; nanopartikel; senyawa alami; aktivitas antibakteri; resistensi antimikroba

Green synthesis; nanoparticles; natural phytochemicals; antibacterial activity; antimicrobial resistance

CORRESPONDING AUTHOR

Nama : Nur Afni
Address: Jurusan Kimia FMIPA UNM
E-mail : nur.afni@unm.ac.id

ABSTRACT

Nanopartikel hasil sintesis hijau dari senyawa alami menjadi pendekatan prospektif dalam pengembangan terapi infeksi bakteri, terutama di tengah meningkatnya resistensi antibiotik. Berbeda dengan metode sintesis konvensional yang menggunakan bahan kimia toksik, pendekatan ini memanfaatkan ekstrak tumbuhan sebagai agen pereduksi dan penstabil sehingga menghasilkan nanopartikel yang lebih aman, stabil, dan ramah lingkungan. Studi ini merupakan kajian literatur yang bertujuan merangkum perkembangan terbaru sintesis hijau nanopartikel, karakteristik fisikokimianya, serta mekanisme aksi antibakteri yang telah dibuktikan secara eksperimental. Artikel diperoleh melalui penelusuran ScienceDirect, PubMed, dan Google Scholar dengan kriteria seleksi penelitian orisinal terbitan 2015–2025. Hasil telaah menunjukkan bahwa nanopartikel berbasis perak, emas, dan ZnO umumnya terbentuk dalam ukuran nano (<100 nm) dan menunjukkan aktivitas antibakteri kuat melalui mekanisme multipel, termasuk kerusakan membran, induksi stres oksidatif, dan penghambatan biofilm, termasuk terhadap bakteri multiresisten. Secara keseluruhan, pendekatan ini berpotensi menjadi platform terapi alternatif yang efektif dan berkelanjutan, meskipun validasi toksikologi dan standarisasi protokol masih diperlukan untuk penerapan klinis.

Green synthesis of nanoparticles derived from natural compounds has emerged as a promising strategy to address increasing bacterial infections and antibiotic resistance. Unlike conventional methods that rely on toxic chemicals and high energy processes, this eco-friendly approach uses plant extracts as reducing and stabilizing agents, producing safer and more biocompatible nanoparticles. This narrative review summarizes recent findings on biosynthetic approaches, physicochemical characteristics, and antibacterial mechanisms demonstrated in experimental studies. Relevant articles published between 2015 and 2025 were retrieved from ScienceDirect, PubMed, and Google Scholar using defined eligibility criteria. The synthesis commonly produces silver, gold, or zinc oxide nanoparticles with nanoscale size (<100 nm) and high colloidal stability. These nanoparticles exhibit potent antibacterial activity through multimodal pathways, including membrane disruption, oxidative stress induction, and biofilm inhibition, including against multidrug-resistant pathogens. Overall, green-synthesized nanoparticles represent a promising and sustainable platform for antibacterial therapy; however, further standardization, toxicity evaluation, and preclinical validation are required before translation to clinical applications.

PENDAHULUAN

Infeksi bakteri telah menjadi salah satu ancaman terbesar bagi kesehatan global, ditandai dengan peningkatan kasus morbiditas dan mortalitas yang signifikan di seluruh dunia. Masalah utama yang memperburuk situasi ini adalah munculnya resistensi antimikroba (*Antimicrobial Resistance*, AMR) yang progresif pada berbagai jenis patogen, termasuk bakteri Gram-positif dan Gram-negatif). (Murray et al., 2022; WHO, 2023). Fenomena ini menyebabkan kegagalan pengobatan dengan antimikroba konvensional dan menimbulkan kebutuhan mendesak akan penemuan dan pengembangan agen antimikroba baru (Ahmed et al., 2024). Oleh karena itu, penelitian terkimi cenderung berfokus pada pendekatan inovatif dan berkelanjutan untuk mengatasi krisis kesehatan global yang serius ini.

Secara klinis, kegagalan terapi infeksi bakteri sering kali disebabkan oleh penurunan sensitivitas patogen terhadap antibiotik yang telah lama digunakan, kemampuan bakteri membentuk biofilm, serta keterbatasan farmakokinetik obat seperti penetrasi jaringan dan bioavailabilitas yang rendah (Salam et al., 2023; Tang et al., 2023). Sementara itu, pengembangan agen antimikroba baru dan sistem penghantaran obat berbasis material anorganik kerap mengandalkan metode sintesis fisika-kimia yang menggunakan pelarut organik toksik, suhu tinggi, dan bahan kimia berbahaya, sehingga menimbulkan persoalan toksisitas dan dampak lingkungan (Jadoun et al., 2021; Lahariya et al., 2024). Kondisi ini mendorong pergeseran paradigma penelitian menuju metode yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan, yakni *Green Synthesis*. Pendekatan ini memanfaatkan biomassa alami sebagai reagen pereduksi dan penstabil, sehingga meminimalkan toksisitas dan biaya produksi.

Nanoteknologi, khususnya nanopartikel berbahan dasar logam seperti perak (AgNP) dan emas (AuNP), menawarkan platform inovatif sebagai agen terapi infeksi bakteri. Nanopartikel menunjukkan keunggulan yang signifikan dibandingkan molekul obat kecil, terutama karena rasio luas permukaan terhadap volume yang sangat tinggi. Keunggulan ini memungkinkan nanopartikel berinteraksi lebih efektif dengan membran sel bakteri dan menghasilkan spesies oksigen reaktif (*Reactive Oxygen Species*, ROS) yang merusak, sehingga memicu kematian sel (Girma et al., 2024; Samuel et al., 2022; Vanlalveni et al., 2021). Selain itu, nanopartikel juga menunjukkan potensi besar untuk menghambat pembentukan biofilm, suatu mekanisme pertahanan utama bakteri terhadap antibiotik. Namun, sintesis nanopartikel dengan metode konvensional sering kali berlawanan dengan konsep teknologi bersih akibat penggunaan reagen berbahaya dan konsumsi energi yang tinggi.

Dalam konteks *Green Synthesis*, senyawa alami dari ekstrak tumbuhan berperan krusial sebagai agen bioreduktor yang efisien dan stabil. Senyawa fitokimia, seperti polifenol, flavonoid, dan terpenoid yang berlimpah di flora Indonesia, mengandung gugus fungsi hidroksil yang mampu mereduksi ion prekursor logam menjadi nanopartikel pada kondisi yang relatif ringan (Jadoun et al., 2021; Susanti et al., 2021). Kehadiran senyawa bioaktif yang tersisa di permukaan nanopartikel pasca-sintesis juga memberikan efek *capping* dan sinergis yang memperkuat aktivitas antibakteri secara keseluruhan (Ullah et al., 2023).

Berbagai penelitian telah membuktikan keberhasilan nanopartikel yang disintesis secara hijau berbasis bahan alam, yang menunjukkan potensi kekayaan alam sebagai sumber antibakteri yang kuat, baik terhadap bakteri Gram positif maupun Gram negatif, termasuk *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, dan patogen penyebab infeksi lainnya (Chopra et al., 2022; Girma et al., 2024; Zafar et al., 2025). Di Indonesia sendiri, beberapa studi telah melaporkan keberhasilan sintesis hijau nanopartikel perak menggunakan ekstrak daun tumbuhan lokal seperti sembung (*Blumea balsamifera*) dan kluwih (*Artocarpus camansi*), yang menunjukkan zona hambat signifikan terhadap *E. coli* dan *S. aureus* (Aryasa & Artini, 2023; Siregar et al., 2024). Hasil temuan ini konsisten menunjukkan bahwa platform nanopartikel sintesis hijau mampu meningkatkan efektivitas antimikroba sekaligus mengurangi ketergantungan pada proses sintesis yang tidak ramah lingkungan.

Meski demikian, pemahaman yang komprehensif mengenai hubungan antara jenis senyawa alami yang digunakan, parameter sintesis hijau, karakteristik fisikokimia nanopartikel yang dihasilkan, dan implikasinya terhadap mekanisme antibakteri serta potensi penerapan klinis masih terbatas. Beberapa tinjauan terdahulu cenderung berfokus pada aspek metode sintesis atau hanya pada jenis nanopartikel tertentu, sehingga belum banyak yang secara sistematis mengintegrasikan perspektif kimia hijau, sumber bahan alam, dan aplikasi terapeutik dalam konteks infeksi bakteri (Bharathi & Lee, 2025; Eker et al., 2025; Fahim et al., 2024). Selain itu, kurangnya standarisasi proses sintesis karena variasi komposisi ekstrak tumbuhan, yang memengaruhi reproduksibilitas ukuran dan stabilitas nanopartikel (Vanlalveni et al., 2021).

Oleh karena itu, kajian literatur ini bertujuan untuk mengulas secara komprehensif perkembangan terkini terkait *green synthesis* nanopartikel berbasis senyawa alami sebagai platform inovatif dalam terapi infeksi bakteri, merangkum temuan-temuan utama dari penelitian eksperimental maupun kajian komprehensif, serta mengidentifikasi kesenjangan riset yang dapat menjadi dasar pengembangan studi lanjutan di bidang kimia farmasi dan nanoteknologi medis.

METODE

Kajian literatur ini disusun menggunakan pendekatan *narrative review* berbasis penelusuran artikel pada berbagai *database*. Penelusuran artikel dilakukan pada basis data, ScienceDirect, PubMed, dan Google Scholar menggunakan kata kunci: "*green synthesis nanoparticles*", "*plant extract*",

“biogenic nanoparticles”, “antibacterial activity”, dan “phyto-mediated synthesis”. Artikel yang dimasukkan adalah penelitian asli (original research) periode 2015–2025, yang melaporkan proses sintesis hijau nanopartikel berbasis biomassa alami, teknik karakterisasi fisikokimia, serta hasil uji aktivitas antibakteri in vitro. Artikel review, editorial, dan publikasi yang tidak melaporkan data eksperimen dikeluarkan. Data yang diekstraksi meliputi jenis biomassa, parameter sintesis, ukuran dan morfologi nanopartikel, komposisi senyawa bioaktif, serta mekanisme antibakteri yang dilaporkan.

HASIL & PEMBAHASAN

Tren Terkini Nanopartikel Sintesis Hijau Berbasis Senyawa Alami

Dalam satu dekade terakhir, tren riset sintesis hijau nanopartikel berbasis senyawa alami didominasi oleh pemanfaatan ekstrak tumbuhan sebagai reduktor sekaligus agen penstabil, khususnya pada nanopartikel perak dan nanopartikel emas. Ekstrak tumbuhan merupakan agen bioreduktor dan penstabil yang paling banyak diteliti karena kaya akan senyawa fitokimia. Studi eksperimental menunjukkan bahwa ekstrak bahan alam yang kaya akan polifenol, flavonoid, dan terpenoid mampu mereduksi ion Ag^+ hanya dalam hitungan menit pada suhu ruang tanpa bantuan katalis tambahan. Seperti yang dilakukan oleh Ullah et al. (2023) yang mensintesis AgNP bermuatan fitokimia menggunakan ekstrak buah zaitun dan iradiasi sinar matahari selama 20 detik, menghasilkan partikel berukuran 10–30 nm dengan aktivitas antibakteri dan antioksidan tinggi.

Tren lain yang menonjol adalah eksplorasi tanaman lokal dan optimasi metode energi rendah untuk meningkatkan efisiensi proses. Beberapa penelitian di Indonesia menunjukkan bahwa senyawa fitokimia seperti polifenol dan flavonoid seperti yang terdapat dalam ekstrak daun sembung (*Blumea balsamifera*) dan kluwih (*Artocarpus camansi*), telah terbukti mereduksi ion Ag^+ menjadi AgNPs dengan efisiensi tinggi, yang ditandai dengan perubahan warna larutan menjadi coklat kekuningan dan dikonfirmasi melalui puncak serapan plasmon permukaan pada ~420–450 nm dalam analisis UV-Vis. Kedua penelitian ini berhasil membuktikan bahwa sintesis hijau AgNP dengan ukuran partikel umumnya <30 nm memberikan daya hambat yang signifikan terhadap *Staphylococcus aureus* dan *Escherichia coli* (Aryasa & Artini, 2023; Siregar et al., 2024). Selain itu, temuan oleh Muniyappan & Nagarajan (2014) menunjukkan bahwa minyak atsiri *Curcuma pseudomontana* mampu mereduksi ion Au^{3+} menjadi AuNPs stabil berukuran sekitar 20 nm pada suhu ruang tanpa bahan kimia tambahan. Fitokonstituen minyak atsiri bertindak sebagai agen pereduksi sekaligus penstabil, menghasilkan AuNPs homogen dengan aktivitas antibakteri, antioksidan, dan anti-inflamasi yang lebih kuat dibanding minyak atsiri mentah. Temuan ini menegaskan bahwa senyawa volatil dan terpenoid dari genus *Curcuma* efektif sebagai platform green synthesis AuNPs.

Pendekatan ini semakin berkembang dengan adanya metode *microwave-assisted green synthesis*, yang mempercepat nukleasi dan menghasilkan partikel lebih kecil serta lebih seragam. Metode ini terbukti meningkatkan aktivitas antibakteri dan kemampuan penghambatan biofilm dibandingkan sintesis konvensional berbasis pemanasan biasa (Devasvaran et al., 2023). Secara global, sejumlah kajian komprehensif menegaskan bahwa tren sintesis hijau bergerak menuju desain proses yang lebih terkontrol dan dapat diskalakan, dengan penekanan pada hubungan antara komposisi fitokimia, kondisi reaksi (pH, suhu, rasio ekstrak:ion logam), dan sifat fisikokimia nanopartikel (ukuran, morfologi, stabilitas, dan muatan permukaan) (Eker et al., 2025; Fahim et al., 2024). Penelitian terkini juga mengarah pada pengembangan sistem hibrida (misalnya AgNP dalam nanoemulsi minyak *Blumea balsamifera* atau dalam matriks polimer alam) untuk meningkatkan biokompatibilitas dan kinerja antibakteri, sekaligus mendekatkan teknologi ini ke potensi aplikasi klinis sebagai alternatif atau pelengkap terapi infeksi bakteri berbasis antibiotik konvensional (Ma et al., 2024).

Karakteristik Fisikokimia Nanopartikel Sintesis Hijau

Secara umum, karakteristik fisikokimia nanopartikel hasil sintesis hijau ditentukan melalui kombinasi analisis spektroskopi, morfologi, dan kristalinitas. Berbagai studi menunjukkan bahwa nanopartikel perak, emas, maupun ZnO yang disintesis dengan ekstrak tumbuhan menampilkan pita serapan khas pada UV-Vis yang merefleksikan surface plasmon resonance (SPR) logam atau serapan tepi pita semikonduktor (ZnO) di wilayah 300–450 nm, menandakan terbentuknya partikel berukuran nano yang terdispersi baik. Misalnya, AgNP yang disintesis menggunakan ekstrak daun *Eriobotrya japonica* menunjukkan puncak SPR kuat di sekitar 467 nm, sementara TEM dan FESEM mengonfirmasi morfologi utama sferis dengan ukuran rata-rata di kisaran 10–20 nm (Yu et al., 2019). Demikian pula, AuNP berbasis ekstrak daun *Pimenta dioica* dan ZnO-NP yang disintesis menggunakan ekstrak daun

Cayratia pedata menunjukkan pola difraksi XRD yang tajam dengan indeks bidang sesuai struktur fcc (logam) atau wurtzit heksagonal (ZnO), menegaskan sifat kristalin yang baik dari nanopartikel hasil sintesis hijau (Fadaka et al., 2021; Jayachandran et al., 2021).

Parameter sintesis seperti jenis dan konsentrasi ekstrak, pH, suhu, serta rasio prekursor logam terhadap bioreduktan terbukti sangat memengaruhi ukuran, distribusi, dan stabilitas koloidal nanopartikel hijau. Yu dkk. menunjukkan bahwa peningkatan suhu sintesis AgNP dari 20 °C ke 80 °C menyebabkan kenaikan ukuran rata-rata partikel dari sekitar 9 nm menjadi >17 nm disertai penurunan aktivitas katalitik, menandakan bahwa kondisi lebih “lunak” menghasilkan partikel lebih halus dan aktif (Yu et al., 2019). Penelitian oleh Chand et al. (2020) melaporkan bahwa variasi jenis ekstrak (bawang, tomat, *Acacia catechu*) serta pH memodulasi posisi pita SPR, lebar setengah maksimum, dan ukuran AgNP, di mana kombinasi ekstrak tertentu dan pH netral–basa menghasilkan partikel lebih kecil dan monodisperse. Pada sistem ZnO-NP, perubahan suhu reaksi dan konsentrasi ekstrak *Cayratia pedata* berpengaruh pada diameter kristalit (sekitar puluhan nanometer) dan tingkat aglomerasi yang teramati pada FESEM, sedangkan sintesis ZnO-NP dengan ekstrak *Punica granatum* menghasilkan partikel sferis–heksagonal berukuran nano dengan stabilitas dispersi yang baik dan aktivitas antibakteri yang tinggi (Ifeanyichukwu et al., 2020; Jayachandran et al., 2021).

Aspek penting lain dari karakteristik fisikokimia adalah kimia permukaan dan muatan koloid nanopartikel yang ditentukan oleh fitokimia ekstrak tanaman. Analisis FTIR pada AgNP berbasis *E. japonica* maupun AuNP berbasis *P. dioica* menunjukkan pita serapan –OH fenolik, C=O, dan C–O yang berasal dari flavonoid, fenolat, dan terpenoid ekstrak, yang berperan sebagai agen pereduksi sekaligus capping, sehingga membentuk lapisan organik stabil di permukaan partikel (Fadaka et al., 2021; Yu et al., 2019). Pada ZnO-NP dari ekstrak *Punica granatum*, FTIR dan XRD mengonfirmasi keberadaan gugus polifenol terikat di permukaan dan fasa ZnO kristalin, sedangkan pengukuran zeta potential menunjukkan muatan permukaan negatif yang cukup besar untuk mencegah agregasi dan mendukung stabilitas koloid (Ifeanyichukwu et al., 2020; Shaban et al., 2024). Kombinasi ukuran kecil, kristalinitas tinggi, serta permukaan yang terselubung senyawa bioaktif inilah yang pada banyak studi dikaitkan dengan peningkatan aktivitas antibakteri dan fotokatalitik nanopartikel sintesis hijau dibandingkan rekannya yang disintesis secara kimia konvensional (Ifeanyichukwu et al., 2020; Yu et al., 2019).

Mekanisme Aksi dan Aktivitas Antibakteri Nanopartikel Sintesis Hijau

Pada nanopartikel hasil sintesis hijau, mekanisme aksi antibakteri umumnya melibatkan kombinasi interaksi fisik dengan dinding/membran sel dan efek kimiawi melalui pembentukan *reactive oxygen species* (ROS) serta pelepasan ion logam. Studi oleh Ontong et al. (2019) yang mensintesis AgNP berbasis ekstrak kulit batang *Senna alata* menunjukkan bahwa AgNP berukuran 10–30 nm mampu menghambat berbagai bakteri Gram-positif dan Gram-negatif dengan MIC 31,25–125 µg/mL. Sementara itu, uji kebocoran kalium menunjukkan peningkatan pelepasan K⁺ intraseluler sebagai indikator kerusakan membran, disertai perubahan morfologi sel pada pengamatan mikroskop elektron. Penelitian lain oleh Agarwal et al. (2018) melaporkan bahwa nanopartikel ZnO (ZnO-NP) yang disintesis melalui *green synthesis* memicu peningkatan ROS intraseluler dan kerusakan membran pada bakteri, menegaskan bahwa stres oksidatif dan disrupsi integritas membran merupakan mekanisme sentral aktivitas antimikroba ZnO-NP.

Beberapa penelitian menyoroti bahwa nanopartikel sintesis hijau tidak hanya bersifat bakterisidal, tetapi juga efektif terhadap strain multiresisten dan pembentukan biofilm. Das dkk. mengembangkan AgNP berbasis ekstrak daun *Ocimum gratissimum* dengan ukuran sekitar 16–18 nm yang menunjukkan MIC serendah 4 µg/mL terhadap *Escherichia coli* multiresisten dan 8 µg/mL terhadap *Staphylococcus aureus* resisten, AgNP ini juga secara signifikan menghambat pembentukan biofilm pada kedua strain tersebut (Das et al., 2017). Analisis SEM dan uji ROS mengungkap permukaan sel yang terdistorsi, kebocoran komponen sel, serta peningkatan generasi ROS intraseluler hingga hampir 90%, mengonfirmasi bahwa kerusakan membran dan stres oksidatif bekerja sinergis dalam menyebabkan kematian sel bakteri (Das et al., 2017). Studi oleh Choi et al. (2021) kemudian menunjukkan bahwa AgNP yang disintesis menggunakan ekstrak *Areca catechu* efektif menghambat pertumbuhan beberapa spesies bakteri resisten antibiotik. Sementara itu, citra SEM memperlihatkan agregat AgNP yang menempel pada dinding sel dan menginduksi destruksi membran, mendukung peran interaksi permukaan nanopartikel–bakteri sebagai langkah awal aksi antibakteri.

Aktivitas antibakteri nanopartikel sintesis hijau juga terlihat kuat pada konteks antibiofilm dan model *in vivo*. Studi oleh Siregar et al. (2024) melaporkan bahwa AgNP yang disintesis dengan metode *microwave-assisted* menggunakan ekstrak daun kluwih (*Artocarpus camansi*) memiliki aktivitas

antibakteri terhadap *Staphylococcus epidermidis* dan *Pseudomonas aeruginosa*, serta mampu menurunkan pembentukan biofilm secara bermakna bahkan pada konsentrasi $\frac{1}{2}$ MIC, menunjukkan potensi penggunaan pada infeksi yang didominasi komunitas biofilm. Pada level in vivo, Escárcega-González et al. (2018) mensintesis AgNP menggunakan ekstrak *Acacia rigidula* dan menunjukkan bahwa pemberian AgNP pada model infeksi bakteri di hewan uji mampu menurunkan beban bakteri secara signifikan pada konsentrasi yang masih berada di bawah ambang toksisitas terhadap sel eukariotik. Aktivitas antibakteri nanopartikel sintesis hijau dan mekanisme aksinya dirangkum dalam Tabel 1. Temuan-temuan ini secara keseluruhan mengindikasikan bahwa nanopartikel yang diperoleh melalui sintesis hijau tidak hanya efektif membunuh bakteri melalui kerusakan membran, kebocoran komponen sel, dan induksi ROS, tetapi juga menjanjikan sebagai platform terapi infeksi yang menargetkan biofilm dan strain multiresisten dengan profil keamanan yang relatif lebih baik.

Tabel 1. Ringkasan aktivitas antibakteri nanopartikel sintesis hijau berbasis senyawa alami

No.	Jenis Nanopartikel & Sumber Biomassanya	Target Bakteri Uji (Patogen Klinis)	Ringkasan Hasil Temuan Aktivitas Antibakteri
1	AgNP – ekstrak <i>Ocimum basilicum</i> L. dan <i>Hibiscus sabdariffa</i> L.	<i>Salmonella enterica</i>	AgNP sintesis hijau bersifat polidisersi, dikombinasikan dengan bakteriofag ZCSE6 menunjukkan efek sinergis dalam menurunkan viabilitas <i>S. Enterica</i> . Uji in vitro menunjukkan penghambatan pertumbuhan dan kerusakan sel yang lebih besar dibandingkan ZCSE6 atau AgNP Tunggal (Abdelsattar et al., 2022).
2	AgNP – infusa daun kayu tulak (<i>Schefflera elliptica</i> Harms)	<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i>	AgNP berukuran nano yang dihasilkan oleh infusa daun kayu tulak menunjukkan zona hambat nyata terhadap <i>E. coli</i> dan <i>S. aureus</i> ; senyawa fitokimia daun (terutama fenolik/terpenoid) bertindak sebagai reduktor dan <i>capping agent</i> yang mendukung aktivitas antibakterinya (Aryasa & Artini, 2022).
3	AgNP – ekstrak daun gempur batu (<i>Ruellia napifera</i>)	<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i>	AgNP menunjukkan aktivitas antibakteri dan antibiofilm yang kuat; penurunan ketebalan dan densitas biofilm diamati pada konsentrasi sub-MIC, mengindikasikan potensi untuk mengganggu komunitas biofilm sekaligus membunuh sel planktonik (Aryasa et al., 2024).
4	AgNP – ekstrak daun <i>Ocimum kilimandscharicum</i>	<i>E. coli</i> ATCC 25922, <i>Salmonella choleraesuis</i> ATCC 10708, <i>S. aureus</i> ATCC 25923	AgNP sintesis hijau dari ekstrak <i>O. kilimandscharicum</i> menunjukkan aktivitas antibakteri signifikan dengan zona hambat dan penurunan CFU yang jelas terhadap semua bakteri uji; perubahan morfologi bakteri dan kerusakan sel diamati, menunjukkan peran interaksi permukaan NP–membran dan kemungkinan stres oksidatif (Ouandaogo et al., 2024).
5	AgNP – ekstrak daun <i>Saussurea obvallata</i>	<i>E. coli</i> dan <i>Enterococcus faecalis</i>	AgNP berbentuk sferis dan sangat kristalin menunjukkan aktivitas antibakteri, selain aktivitas antioksidan dan kemampuan katalitik reduksi nitrofenol; hal ini mendukung peran senyawa bioaktif daun sebagai reduktor/capping yang menghasilkan NP multifungsi dengan aktivitas antibakteri (Sagar et al., 2024).
6	AuNP – ekstrak daun <i>Pimenta dioica</i>	<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i>	AuNP hasil sintesis hijau menunjukkan aktivitas antibakteri, antioksidan, dan fotokatalitik; perubahan morfologi bakteri dan penurunan pertumbuhan diamati, dengan fitokimia daun <i>P. dioica</i> sebagai agen reduktor dan penstabil yang memperkaya interaksi AuNP–membran bakteri (Fadaka et al., 2021).

No.	Jenis Nanopartikel & Sumber Biomassanya	Target Bakteri Uji (Patogen Klinis)	Ringkasan Hasil Temuan Aktivitas Antibakteri
7	AuNP – ekstrak <i>Thymus</i> spp. (thyme)	<i>Bacillus</i> dan <i>E. coli</i>	AuNP yang disintesis menggunakan ekstrak <i>thyme</i> memiliki ukuran nano dan menunjukkan aktivitas antibakteri yang signifikan, disertai aktivitas antioksidan dan sitotoksik selektif; hasil ini mengindikasikan bahwa terpenoid dan fenolat <i>thyme</i> berperan penting dalam pembentukan dan bioaktivitas AuNP (Hamelian et al., 2018).
8	ZnO-NP – kombinasi ekstrak cengkih (<i>Syzygium aromaticum</i>) dan <i>Thymus capitatus</i>	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>E. coli</i> , <i>Salmonella typhimurium</i> , <i>Klebsiella pneumoniae</i> , <i>S. aureus</i> , <i>S. hominis</i> , dan <i>Candida albicans</i>	ZnO-NP heksagonal termodifikasi fitokimia menunjukkan aktivitas antibakteri dan antifungi yang meningkat signifikan dibanding kontrol; peningkatan ROS dan kerusakan dinding sel dilaporkan sebagai mekanisme utama, diperkuat oleh peran polifenol sebagai <i>capping</i> di permukaan ZnO (Haiouani et al., 2024).
9	ZnO-NP – ekstrak rosemary (<i>Salvia rosmarinus</i>)	<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i>	ZnO-NP hasil sintesis hijau dengan ekstrak rosemary menunjukkan aktivitas antibakteri kuat; uji MIC dan zona hambat mengindikasikan penghambatan signifikan, dengan rosemary bertindak sebagai reduktor dan penstabil yang juga memberikan efek antioksidan/antimikroba tambahan (Khadim et al., 2025).
10	ZnO-NP – ekstrak daun serai <i>Cymbopogon olivieri</i> (lemongrass)	Bakteri Gram positif: <i>S. epidermis</i> , <i>Bacillus cereus</i> , <i>Streptococcus pyogenes</i> Bakteri Gram negatif: <i>P. aeruginosa</i> , <i>Klebsiella pentomonium</i> , <i>E. coli</i> Fungi: <i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>Candida albicans</i> , dan <i>Fusarium oxyprom</i>	ZnO-NP yang disintesis dari ekstrak serai menunjukkan sifat antimikroba signifikan terhadap bakteri dan fungi uji, sekaligus aktivitas antikanker; kombinasi ukuran nano, kristalinitas baik, dan lapisan fitokimia di permukaan diduga memfasilitasi interaksi kuat dengan membran bakteri dan induksi stres oksidatif (Golzarnezhad et al., 2025).
11	AgNP - ekstrak kulit batang <i>Salvadora persica</i>	<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i>	AgNPs berukuran puluhan nm menunjukkan zona hambat ± 14 mm (<i>E. coli</i>) dan 12 mm (<i>S. aureus</i>); MIC 100 $\mu\text{g/mL}$ (<i>E. coli</i>) dan 400 $\mu\text{g/mL}$ (<i>S. aureus</i>), MBC 200 $\mu\text{g/mL}$ untuk <i>E. coli</i> , mengindikasikan potensi aktivitas antibakteri kuat terhadap patogen Gram-negatif dan Gram-positif (Miri et al., 2016)
12	AgNP - ekstrak daun <i>Blumea balsamifera</i> (sembung)	<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i>	AgNPs dengan ukuran rata-rata $\sim 40\text{--}60$ nm menghasilkan zona hambat 9,2–10,9 mm terhadap <i>E. coli</i> dan 9,4–10,0 mm terhadap <i>S. aureus</i> (kategori sedang–kuat), menunjukkan bahwa polifenol dan protein daun berperan sebagai reduktor sekaligus <i>capping agent</i> yang mendukung aktivitas antibakteri (Aryasa & Artini, 2023)
13	AgNP nanoemulsi (AgNPs@BBO-TS NE) - Minyak atsiri <i>B. balsamifera</i> + tea saponin	<i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> , <i>P. aeruginosa</i>	Nanoemulsi minyak <i>B. balsamifera</i> yang mengandung AgNPs (~ 250 nm, ζ -35 mV) menunjukkan efek antimikroba sangat kuat dengan penurunan signifikan jumlah koloni <i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> , dan <i>P. aeruginosa</i> , menegaskan sinergi antara

No.	Jenis Nanopartikel & Sumber Biomassanya	Target Bakteri Uji (Patogen Klinis)	Ringkasan Hasil Temuan Aktivitas Antibakteri
			minyak atsiri dan AgNPs sebagai platform antibakteri hijau (Ma et al., 2024).
14	CuNP / Cu–CuO NP - ekstrak akar <i>Polyalthia longifolia</i> (air)	<i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> (juga <i>Candida albicans</i>)	CuNPs berukuran 2–10 nm (campuran Cu(0) dan oksida Cu) menunjukkan zona hambat $17,2 \pm 0,2$ mm (<i>S. aureus</i>) dan $15,6 \pm 0,2$ mm (<i>E. coli</i>); juga aktif terhadap <i>C. albicans</i> , menegaskan bahwa fenolik dan flavonoid akar berperan sebagai reduktor dan capping agent yang menghasilkan NP dengan aktivitas antibakteri dan antifungi tinggi (Maulana et al., 2024)
15	ZnO NPs - Ekstrak daun <i>Jatropha curcas</i>	<i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> , <i>Klebsiella pneumoniae</i> , <i>P. aeruginosa</i>	ZnO NPs (puncak UV ~290 nm, morfologi sferis) menunjukkan aktivitas antibakteri penting terhadap <i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> , <i>K. pneumoniae</i> dan <i>P. aeruginosa</i> dengan uji agar dilution, mengindikasikan bahwa metabolit sekunder daun <i>J. curcas</i> efektif sebagai agen pereduksi dan penstabil dalam menghasilkan nanomaterial aktif secara biologis (Ovonramwen et al., 2024)
16	Chitosan NPs (CS-NPs) - Chitosan (biopolimer alam), direduksi secara hijau	<i>Acinetobacter baumannii</i> multiresisten	Nanopartikel kitosan yang disintesis, dioptimasi, dan dikarakterisasi secara hijau menunjukkan aktivitas antibakteri dan antibiofilm kuat terhadap <i>A. baumannii</i> penghasil biofilm, termasuk strain multi-drug resistant, dengan penurunan densitas biofilm dan viabilitas sel yang signifikan, sehingga relevan sebagai kandidat terapi infeksi nosokomial (Villarta et al., 2025)
17	AgNP – ekstrak kulit batang <i>Senna alata</i>	Bakteir Gram positif, Bakteri Gram negatif dan Fungi uji	AgNP ukuran 10–30 nm menunjukkan aktivitas penghambatan kuat dengan MIC 31,25–125 µg/mL, serta meningkatkan kebocoran ion sebagai indikator lisis membrane (Ontong et al., 2019).
18	AgNP — ekstrak daun <i>Ocimum gratissimum</i>	MDR <i>E. coli</i> dan MRSA (<i>S. aureus</i>)	AgNP ukuran 16–18 nm sangat potent dengan MIC 4 µg/mL (MDR <i>E. coli</i>) dan 8 µg/mL (MRSA), serta mampu menekan pembentukan biofilm secara signifikan (Das et al., 2017).
19	AgNP — ekstrak <i>Areca catechu</i>	Strain bakteri resisten antibiotik	AgNP menunjukkan efisiensi tinggi dalam menghambat pertumbuhan berbagai bakteri resisten; citra SEM menunjukkan aglomerasi NP pada dinding sel dan lisis membrane(Choi et al., 2021) .
20	AgNP — ekstrak daun <i>Artocarpus camansi</i> (microwave-assisted)	<i>S. epidermidis</i> & <i>P. aeruginosa</i>	AgNP menurunkan biomassa dan densitas biofilm bahkan pada ½ MIC, menunjukkan potensi untuk aplikasi pada infeksi kronis berbasis biofilm (Siregar et al., 2024).
21	AgNP — ekstrak <i>Acacia rigidula</i>	Model infeksi bakteri in vivo	AgNP efektif dalam menurunkan beban bakteri pada model hewan uji tanpa menunjukkan toksisitas yang berarti terhadap sel mamalia, menunjukkan profil keamanan yang baik (Escárcega-González et al., 2018).

Implikasi Ilmiah dan Klinis

Temuan dalam kajian ini menunjukkan bahwa nanopartikel hasil sintesis hijau memiliki potensi signifikan sebagai agen antimikroba modern, terutama pada era meningkatnya resistensi antibiotik global. Beberapa penelitian membuktikan bahwa nanopartikel berbasis ion logam yang disintesis menggunakan biomassa alami mampu menghasilkan efek bakterisidal melalui mekanisme multimodal, termasuk kerusakan membran, peningkatan produksi ROS, dan gangguan pembentukan biofilm patogen (Das et al., 2017; Ontong et al., 2019). Bahkan, Siregar et al. (2024) melaporkan bahwa AgNP berbasis *Artocarpus camansi* tidak hanya efektif terhadap bakteri planktonik tetapi juga menunjukkan efek penghambatan signifikan terhadap biofilm *Pseudomonas aeruginosa* dan *Staphylococcus epidermidis*, yang merupakan target terapi klinis yang sulit dicapai menggunakan antibiotik tunggal. Dengan demikian, keberhasilan sintesis nanopartikel berbasis biomassa lokal memperkuat potensi aplikasi klinis, terutama dalam terapi luka infeksius, perangkat medis terinfeksi biofilm, dan infeksi kronis terkait bakteri resisten antibiotik.

Keterbatasan Saat Ini

Meskipun menunjukkan aktivitas biologis yang kuat, hasil-hasil ini masih menghadapi sejumlah keterbatasan penting dari perspektif translasi medis. Sebagian besar penelitian masih berada pada tingkat *in vitro*, dengan sedikit penelitian yang mengevaluasi keamanan biologis pada model hewan atau sistem biologis kompleks. Studi oleh Escárcega-González et al. (2018) merupakan salah satu pengecualian yang menunjukkan bahwa AgNP berbasis *Acacia rigidula* mampu menurunkan jumlah bakteri pada model infeksi hewan tanpa menunjukkan toksisitas signifikan terhadap sel mamalia, tetapi penelitian lanjutan tetap diperlukan untuk mengevaluasi parameter farmakokinetik, metabolisme nanopartikel dalam jaringan, serta interaksi jangka panjang dengan sistem imun. Selain itu, variabilitas fitokimia antar sumber biomassa dan faktor lingkungan menyebabkan perbedaan signifikan dalam ukuran, stabilitas, dan aktivitas biologis nanopartikel, sehingga standar sintesis, karakterisasi, dan uji biologis masih perlu diharmonisasi agar teknologi dapat dibandingkan secara global dan diproduksi secara konsisten.

Arah Pengembangan Penelitian di Masa Depan

Berdasarkan evaluasi sistematis literatur, arah penelitian selanjutnya perlu difokuskan pada standarisasi proses sintesis dan karakterisasi untuk memastikan konsistensi struktur serta efektivitas biologis nanopartikel. Agarwal et al. (2018) dan Yu et al. (2019) menegaskan bahwa parameter sintesis seperti suhu, pH, dan rasio ekstrak sangat memengaruhi ukuran partikel dan potensi antibakteri, sehingga pengembangan protokol universal berbasis parameter optimasi menjadi urgensi riset kedepan. Selain itu, integrasi nanopartikel sintesis hijau ke dalam sistem penghantaran obat atau biomaterial lain seperti hidrogel, *coating* antibakteri perangkat medis, dan nanoemulsi telah menunjukkan peningkatan potensi antibakteri dalam beberapa studi eksperimental terbaru, seperti yang dilaporkan oleh Ma et al. (2024). Keberhasilan validasi klinis teknologi ini akan bergantung pada penelitian lanjutan yang mencakup evaluasi toksisitas jangka panjang, bioakumulasi, stabilitas formulasi, serta uji efektivitas pada model infeksi independen dan studi uji klinis fase awal.

KESIMPULAN

Secara keseluruhan, temuan ini menegaskan bahwa *green synthesis nanoparticle* merupakan platform teknologi berbasis biomaterial yang menjanjikan untuk aplikasi medis masa depan, terutama pada pengelolaan infeksi yang melibatkan patogen multiresisten dan biofilm. Namun, penerapan teknologi ini dalam ranah klinis membutuhkan percepatan penelitian translasi, pendekatan regulasi yang jelas, serta kemitraan multidisiplin antara peneliti material, mikrobiolog, ahli toksikologi, dan klinisi. Dengan kebutuhan global yang semakin mendesak akan terapi alternatif dalam menghadapi era resistensi antibiotik, nanopartikel sintesis hijau berpotensi menjadi salah satu solusi strategis yang relevan, efektif, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelsattar, A. S., Hakim, T. A., Rezk, N., Farouk, W. M., Hassan, Y. Y., Gouda, S. M., & El-Shibiny, A. (2022). Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using *Ocimum basilicum* L. and *Hibiscus sabdariffa* L. Extracts and Their Antibacterial Activity in Combination with Phage ZCSE6 and

- Sensing Properties. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 32(6), 1951–1965. <https://doi.org/10.1007/s10904-022-02234-y>
- Agarwal, H., Menon, S., Kumar, S. V., & Rajeshkumar, S. (2018). Mechanistic study on antibacterial action of zinc oxide nanoparticles synthesized using green route. *Chemico-Biological Interactions*, 286, 60–70. <https://doi.org/10.1016/J.CBI.2018.03.008>
- Ahmed, S. K., Hussein, S., Qurbani, K., Ibrahim, R. H., Fareeq, A., Mahmood, K. A., & Mohamed, M. G. (2024). Antimicrobial resistance: Impacts, challenges, and future prospects. *Journal of Medicine, Surgery, and Public Health*, 2, 100081. <https://doi.org/10.1016/j.glmedi.2024.100081>
- Aryasa, I. W. T., & Artini, N. P. R. (2022). Green Synthesis of Silver Nanoparticles using Kayu tulak Leaf (Schefflera Elliptica Harms) Infusion as a Bio-reductant and Its Antibacterial Activity. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 25(6), 212–217. <https://doi.org/10.14710/jksa.25.6.212-217>
- Aryasa, I. W. T., & Artini, N. P. R. (2023). Green Synthesis Silver Nanoparticles Using Sembung (Blumea balsamifera) Leaf Extract as an Antibacterial and Antioxidant. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9(12), 11877–11886. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i12.6609>
- Aryasa, I. W. T., Artini, N. P. R., & Setiawan, P. Y. B. (2024). Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Gempur Batu Leaf Extract (Ruellia napifera) as Antibacterial, Antibiofilm, and Antioxidant. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 10(12), 10556–10567. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i12.9356>
- Bharathi, D., & Lee, J. (2025). Recent Trends in Bioinspired Metal Nanoparticles for Targeting Drug-Resistant Biofilms. In *Pharmaceuticals* (Vol. 18, Issue 7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/ph18071006>
- Chand, K., Cao, D., Eldin Fouad, D., Hussain Shah, A., Qadeer Dayo, A., Zhu, K., Nazim Lakhan, M., Mehdi, G., & Dong, S. (2020). Green synthesis, characterization and photocatalytic application of silver nanoparticles synthesized by various plant extracts. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(11), 8248–8261. <https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2020.01.009>
- Choi, J. S., Jung, H. C., Baek, Y. J., Kim, B. Y., Lee, M. W., Kim, H. D., & Kim, S. W. (2021). Antibacterial Activity of Green-Synthesized Silver Nanoparticles Using Areca catechu Extract against Antibiotic-Resistant Bacteria. 11. <https://doi.org/10.3390/nano>
- Chopra, H., Bibi, S., Singh, I., Hasan, M. M., Khan, M. S., Yousafi, Q., Baig, A. A., Rahman, M. M., Islam, F., Emran, T. Bin, & Cavalu, S. (2022). Green Metallic Nanoparticles: Biosynthesis to Applications. In *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* (Vol. 10). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.874742>
- Das, B., Dash, S. K., Mandal, D., Ghosh, T., Chattopadhyay, S., Tripathy, S., Das, S., Dey, S. K., Das, D., & Roy, S. (2017). Green synthesized silver nanoparticles destroy multidrug resistant bacteria via reactive oxygen species mediated membrane damage. *Arabian Journal of Chemistry*, 10(6), 862–876. <https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2015.08.008>
- Devasvaran, K., Alallam, B., Yunus, M. A., Dewi, F. R. P., Kamal, N. N. S. N. M., & Lim, V. (2023). Microwave-assisted green synthesis of silver nanoparticles using alkaline extracted crude polysaccharide of C. Nutans: Optimisation, characterisation, toxicity, anticancer potential and antibacterial studies. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2023.104688>
- Eker, F., Akdaşçi, E., Duman, H., Bechelany, M., & Karay, S. (2025). Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Plant Extracts: A Comprehensive Review of Physicochemical Properties and Multifunctional Applications. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 26, Issue 13). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/ijms26136222>
- Escárcega-González, C. E., Garza-Cervantes, J. A., Vázquez-Rodríguez, A., Montelongo-Peralta, L. Z., Treviño-González, M. T., Díaz Barriga Castro, E., Saucedo-Salazar, E. M., Chávez Morales, R. M., Regalado Soto, D. I., Treviño González, F. M., Carrasco Rosales, J. L., Villalobos Cruz,

- R., & Morones-Ramírez, J. R. (2018). In vivo antimicrobial activity of silver nanoparticles produced via a green chemistry synthesis using acacia rigidula as a reducing and capping agent. *International Journal of Nanomedicine*, 13, 2349–2363. <https://doi.org/10.2147/IJN.S160605>
- Fadaka, A., Aluko, O., Awawu, S., & Theledi, K. (2021). Green Synthesis of Gold Nanoparticles using Pimenta dioica Leaves Aqueous Extract and Their Application as Photocatalyst, Antioxidant, and Antibacterial Agents. *Journal of Multidisciplinary Applied Natural Science*, 1(2), 78–88. <https://doi.org/10.47352/jmans.v1i2.81>
- Fahim, M., Shahzaib, A., Nishat, N., Jahan, A., Bhat, T. A., & Inam, A. (2024). Green synthesis of silver nanoparticles: A comprehensive review of methods, influencing factors, and applications. *JCIS Open*, 16, 100125. <https://doi.org/10.1016/J.JCISO.2024.100125>
- Girma, A., Mebratie, G., Mekuye, B., Abera, B., Bekele, T., & Alamnie, G. (2024). Antibacterial Capabilities of Metallic Nanoparticles and Influencing Factors. *Nano Select*, 5(12). <https://doi.org/10.1002/nano.202400049>
- Golzarneshad, F., Allahdou, M., Mehravaran, L., & Naderi, S. (2025). Green synthesis of ZnO nanoparticles from the extract of Cymbopogon olivieri and investigation of their antimicrobial and anticancer effects. *Discover Applied Sciences*, 7(3). <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06623-z>
- Haoui, K., Hegazy, S., Alsaeedi, H., Bechelany, M., & Barhoum, A. (2024). Green Synthesis of Hexagonal-like ZnO Nanoparticles Modified with Phytochemicals of Clove (Syzygium aromaticum) and Thymus capitatus Extracts: Enhanced Antibacterial, Antifungal, and Antioxidant Activities. *Materials*, 17(17). <https://doi.org/10.3390/ma17174340>
- Hamelian, M., Varmira, K., & Veisi, H. (2018). Green synthesis and characterizations of gold nanoparticles using Thyme and survey cytotoxic effect, antibacterial and antioxidant potential. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 184, 71–79. <https://doi.org/10.1016/J.JPHOTOBIO.2018.05.016>
- Ifeanyichukwu, U. L., Fayemi, O. E., & Ateba, C. N. (2020). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles from pomegranate (punica granatum) extracts and characterization of their antibacterial activity. *Molecules*, 25(19). <https://doi.org/10.3390/molecules25194521>
- Jadoun, S., Arif, R., Jangid, N. K., & Meena, R. K. (2021). Green synthesis of nanoparticles using plant extracts: a review. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 19, Issue 1, pp. 355–374). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01074-x>
- Jayachandran, A., T.R., A., & Nair, A. S. (2021). Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using Cayratia pedata leaf extract. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2021.100995>
- Khadim, N. S., Mohammed, D. S., Albukhaty, S., A-Aqbi, Z. T., & Qate, F. (2025). Green Synthesis and Antibacterial Activity of Zinc Oxide Nanoparticles Using Rosemary (Salvia rosmarinus) Extract. *Jundishapur J Nat Pharm Prod*, 20(4), e164560. <https://doi.org/https://doi.org/10.5812/jjnpp-164560>
- Lahariya, A. U., Garg, R., & Singh, S. K. (2024). Antimicrobial Resistance: An Emerging Global Challenge Waiting for Urgent Actions. *Preventive Medicine: Research & Reviews*, 1(4), 169–171. https://doi.org/10.4103/pmrr.pmrr_8_24
- Ma, C., Liu, B., Du, L., Liu, W., Zhu, Y., Chen, T., Wang, Z., Chen, H., & Pang, Y. (2024). Green Preparation and Antibacterial Activity Evaluation of AgNPs-Blumea balsamifera Oil Nanoemulsion. *Molecules*, 29(9). <https://doi.org/10.3390/molecules29092009>
- Maulana, I., Ginting, B., Mustafa, I., & Islami, R. A. N. (2024). Green Synthesis of Copper Nanoparticles Using Polyalthia longifolia Roots and their Bioactivities Against Escherichia coli, Staphylococcus aureus, and Candida albicans. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 16, S2218–S2223. https://doi.org/10.4103/jpbs.jpbs_1219_23

- Miri, A., Dorani, N., Darroudi, M., & Sarani, M. (2016). Green synthesis of silver nanoparticles using *Salvadora persica* L. and its antibacterial activity. *Cellular and Molecular Biology*, 62(9), 46–50.
- Muniyappan, N., & Nagarajan, N. S. (2014). Green synthesis of gold nanoparticles using *Curcuma pseudomontana* essential oil, its biological activity and cytotoxicity against human ductal breast carcinoma cells T47D. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(4), 2037–2044. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2014.03.004>
- Murray, C. J., Ikuta, K. S., Sharara, F., Swetschinski, L., Robles Aguilar, G., Gray, A., Han, C., Bisignano, C., Rao, P., Wool, E., Johnson, S. C., Browne, A. J., Chipeta, M. G., Fell, F., Hackett, S., Haines-Woodhouse, G., Kashef Hamadani, B. H., Kumaran, E. A. P., McManigal, B., ... Naghavi, M. (2022). Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: a systematic analysis. *The Lancet*, 399(10325), 629–655. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)02724-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)02724-0)
- Ontong, J. C., Paosen, S., Shankar, S., & Voravuthikunchai, S. P. (2019). Eco-friendly synthesis of silver nanoparticles using *Senna alata* bark extract and its antimicrobial mechanism through enhancement of bacterial membrane degradation. *Journal of Microbiological Methods*, 165, 105692. <https://doi.org/10.1016/J.MIMET.2019.105692>
- Ouandaogo, H. S., Diallo, S., Odari, E., & Kinyu, J. (2024). Silver nanoparticle biosynthesis utilizing *Ocimum kilimandscharicum* leaf extract and assessment of its antibacterial activity against certain chosen bacteria. *PLoS ONE*, 19(5 May). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295463>
- Ovonramwen, O. B., Nwaogu, N., Okunzuwa, I. G., & Omoruyi, U. (2024). Green Synthesis And Characterization of Zinc Oxide Nanoparticles Using *Jatropha Curcas* for Enhanced Antibacterial Potential. *Walisongo Journal of Chemistry*, 7(1), 90–97. <https://doi.org/10.21580/wjc.v7i1.20629>
- Sagar, P. S. R. V., Ramadevi, D., Basavaiah, K., & Botsa, S. M. (2024). Green synthesis of silver nanoparticles using aqueous leaf extract of *Saussurea obvallata* for efficient catalytic reduction of nitrophenol, antioxidant, and antibacterial activity. *Water Science and Engineering*, 17(3), 274–282. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.09.004>
- Salam, M. A., Al-Amin, M. Y., Salam, M. T., Pawar, J. S., Akhter, N., Rabaan, A. A., & Alqumber, M. A. A. (2023). Antimicrobial Resistance: A Growing Serious Threat for Global Public Health. In *Healthcare (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 13). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/healthcare11131946>
- Samuel, M. S., Ravikumar, M., John, A., Selvarajan, E., Patel, H., Chander, P. S., Soundarya, J., Vuppala, S., Balaji, R., & Chandrasekar, N. (2022). A Review on Green Synthesis of Nanoparticles and Their Diverse Biomedical and Environmental Applications. In *Catalysts* (Vol. 12, Issue 5). MDPI. <https://doi.org/10.3390/catal12050459>
- Shaban, A. S., Owda, M. E., Basuoni, M. M., Mousa, M. A., Radwan, A. A., & Saleh, A. K. (2024). *Punica granatum* peel extract mediated green synthesis of zinc oxide nanoparticles: structure and evaluation of their biological applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(11), 12265–12281. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03185-7>
- Siregar, N. A., Putra, E. D. L., Sinaga, S. M., Satria, D., & Waruwu, S. B. (2024). Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Extract of *Kluwih* Leaves (*Artocarpus camansi* Blanco.) by Microwave-Assisted Irradiation and Their Antibacterial Properties. *Indonesian Journal of Applied Research (IJAR)*, 5(3), 164–175. <https://doi.org/10.30997/ijar.v5i3.540>
- Susanti, Ramadhani, F., Soraya, M., & Afriani, F. (2021). Potensi Green-Synthesis Nanopartikel Perak Berbasis Bahan Floral di Indonesia: Sebuah Review. *Seminar Nasional Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat* 2021, 174–176. <https://doi.org/https://doi.org/10.33019/snppm.v5i0.2743>
- Tang, K. W. K., Millar, B. C., & Moore, J. E. (2023). Antimicrobial Resistance (AMR). In *British Journal of Biomedical Science* (Vol. 80). Institute of Biomedical Science (IBMS). <https://doi.org/10.3389/bjbs.2023.11387>

- Ullah, S., Khalid, R., Rehman, M. F., Irfan, M. I., Abbas, A., Alhoshani, A., Anwar, F., & Amin, H. M. A. (2023). Biosynthesis of phyto-functionalized silver nanoparticles using olive fruit extract and evaluation of their antibacterial and antioxidant properties. *Frontiers in Chemistry*, 11. <https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1202252>
- Vanlalveni, C., Lallianrawna, S., Biswas, A., Selvaraj, M., Changmai, B., & Rokhum, S. L. (2021). Green synthesis of silver nanoparticles using plant extracts and their antimicrobial activities: a review of recent literature. In *RSC Advances* (Vol. 11, Issue 5, pp. 2804–2837). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d0ra09941d>
- Villarta, J. D. A., Paylago, F. J. C., Poldo, J. C. H., Santos, J. S. R., Escordial, T. A. M. M., & Montealegre, C. M. (2025). Green Synthesis, Characterization, and Optimization of Chitosan Nanoparticles Using Blumea balsamifera Extract. *Processes*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/pr13030804>
- World Health Organization. (2023, November 21). *Antimicrobial Resistance: fact sheets*.
- Yu, C., Tang, J., Liu, X., Ren, X., Zhen, M., & Wang, L. (2019). Green biosynthesis of silver nanoparticles using eriobotrya japonica (thunb.) leaf extract for reductive catalysis. *Materials*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/ma12010189>
- Zafar, R., Intisar, A., Din, M. I., Sharif, A., Ahmed, E., & Afzal, A. (2025). Plant-derived green metal nanoparticles as antibacterial, antifungal, and therapeutic agents: Advances, challenges, and perspectives. *Bioresource Technology Reports*, 31, 102277. <https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2025.102277>