



Pemanfaatan Nanopartikel Berbasis Tumbuhan sebagai Agen Antibakteri Ramah Lingkungan

Desi Reski Fajar ^{1*}, Dedy Ma'ruf ²

¹⁻²Institut Ilmu Kesehatan Pelamonia, Indonesia

* Penulis Korespondensi : desi.rf1991@gmail.com¹

Abstract. Antibiotic resistance has emerged as a significant global health challenge, prompting the exploration of alternative antimicrobial agents. This study focuses on the synthesis and antibacterial potential of plant-based nanoparticles, specifically silver nanoparticles (AgNPs), synthesized using neem leaf extract (*Azadirachta indica*). The research aims to assess the effectiveness of these green-synthesized nanoparticles against *Escherichia coli* (*E. coli*), a common pathogen responsible for numerous infections, including those resistant to conventional antibiotics. The synthesis of AgNPs was performed using neem leaf extract as a reducing and stabilizing agent, following a green synthesis approach that is environmentally friendly and avoids harmful chemicals. The synthesized nanoparticles were characterized using UV-Vis spectroscopy, Transmission Electron Microscopy (TEM), and X-ray Diffraction (XRD), ensuring the particles' size, shape, and crystalline structure were in the desired range. Antibacterial activity was assessed using the agar diffusion method, comparing the inhibition zones formed by the nanoparticles with those of traditional antibiotics. The findings revealed that the silver nanoparticles displayed significant antibacterial activity against *E. coli*, with inhibition zones comparable to conventional antibiotics, indicating their potential as an effective alternative in combating antibiotic-resistant bacteria. Moreover, these nanoparticles exhibited high stability and biocompatibility, making them a promising candidate for further biomedical applications. The results suggest that neem-based AgNPs could serve as an eco-friendly solution for addressing antibiotic resistance. Future research is recommended to explore the broad-spectrum activity of these nanoparticles against other bacterial pathogens and to assess their safety and efficacy in clinical settings.

Keywords: Antibacterial activity; *Azadirachta indica*; Green synthesis; Neem leaf extract; Silver nanoparticles.

Abstrak. Resistensi antibiotik telah menjadi tantangan besar dalam bidang kesehatan global, yang mendorong pencarian agen antimikroba alternatif. Penelitian ini berfokus pada sintesis dan potensi antibakteri nanopartikel berbasis tumbuhan, khususnya nanopartikel perak (AgNPs), yang disintesis menggunakan ekstrak daun neem (*Azadirachta indica*). Penelitian ini bertujuan untuk menilai efektivitas nanopartikel yang disintesis secara hijau ini terhadap *Escherichia coli* (*E. coli*), patogen umum yang bertanggung jawab atas berbagai infeksi, termasuk infeksi yang resisten terhadap antibiotik konvensional. Sintesis AgNPs dilakukan dengan menggunakan ekstrak daun neem sebagai agen pereduksi dan penstabil, mengikuti pendekatan sintesis hijau yang ramah lingkungan dan menghindari penggunaan bahan kimia berbahaya. Nanopartikel yang dihasilkan dikarakterisasi menggunakan spektroskopi UV-Vis, Mikroskopi Elektron Transmisi (TEM), dan Difraksi Sinar-X (XRD), memastikan bahwa ukuran, bentuk, dan struktur kristalnya berada dalam rentang yang diinginkan. Aktivitas antibakteri diuji menggunakan metode difusi agar, membandingkan zona hambat yang terbentuk oleh nanopartikel dengan antibiotik konvensional. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nanopartikel perak menunjukkan aktivitas antibakteri yang signifikan terhadap *E. coli*, dengan zona hambat yang sebanding dengan antibiotik konvensional, yang mengindikasikan potensi mereka sebagai alternatif yang efektif untuk mengatasi bakteri resisten antibiotik. Selain itu, nanopartikel ini menunjukkan stabilitas tinggi dan biokompatibilitas, menjadikannya kandidat yang menjanjikan untuk aplikasi biomedis lebih lanjut. Temuan ini menunjukkan bahwa nanopartikel perak berbasis daun neem dapat menjadi solusi ramah lingkungan dalam menghadapi resistensi antibiotik. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengeksplorasi aktivitas spektrum luas nanopartikel ini terhadap patogen bakteri lainnya serta untuk menilai keamanan dan efektivitasnya dalam pengaturan klinis.

Kata kunci: Aktivitas antibakteri; *Azadirachta indica*; Ekstrak daun neem; Nanopartikel perak; Sintesis hijau.

1. LATAR BELAKANG

Resistensi antibiotik telah berkembang menjadi ancaman serius bagi kesehatan global, yang memengaruhi kemampuan untuk mengobati infeksi yang sebelumnya dapat diatasi dengan mudah (Morehead & Scarbrough, 2018). Penyalahgunaan dan penggunaan berlebihan antibiotik, baik pada manusia, hewan, maupun dalam sektor pertanian, telah mempercepat perkembangan resistensi ini. Fenomena ini menyebabkan peningkatan biaya perawatan kesehatan, durasi perawatan yang lebih lama, serta peningkatan tingkat morbiditas dan mortalitas (Sharma et al., 2024). Mikroorganisme yang resisten terhadap antibiotik dapat ditemukan di berbagai ekosistem, termasuk tanah, air, dan atmosfer, yang menunjukkan bahwa lingkungan menjadi sumber utama dan reservoir resistensi antibiotik (Tadi & Naaz, 2024).

Untuk menghadapi krisis ini, diperlukan pendekatan yang lebih holistik, yang mencakup pengelolaan antibiotik yang bijak, pengendalian infeksi yang ketat, serta strategi pengurangan penyalahgunaan antibiotik di lingkungan (Khan & Aziz, 2024). Salah satu solusi yang menjanjikan adalah penggunaan nanopartikel berbasis tumbuhan. Nanopartikel ini tidak hanya berasal dari sumber alami, tetapi juga menawarkan biokompatibilitas yang tinggi dan potensi pengiriman obat yang lebih terarah dan lebih efisien (Kushwaha, Sharma, & Kumar, 2024).

Nanopartikel berbasis tumbuhan, seperti nanopartikel perak (AgNPs) dan nanopartikel seng oksida (ZnO NPs), telah menunjukkan aktivitas antibakteri yang signifikan terhadap berbagai patogen, termasuk strain bakteri yang resisten terhadap beberapa jenis antibiotik (Surette & Wright, 2017). Sintesis nanopartikel ini melalui metode hijau yang menggunakan ekstrak tumbuhan tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga mengurangi risiko yang sering terkait dengan metode sintesis kimia dan fisik (Mallik et al., 2024). Nanopartikel yang disintesis dari tumbuhan seperti *Zanthoxylum armatum* dan *Causonis trifolia* menunjukkan aktivitas antimikroba yang efektif tanpa menimbulkan efek genotoksik, menjadikannya pilihan yang aman dan stabil untuk pengobatan infeksi (Quadri et al., 2024). Selain itu, kombinasi senyawa bioaktif tumbuhan dengan nanopartikel dapat meningkatkan stabilitas nanopartikel dan memungkinkan pengiriman yang lebih terarah ke sel bakteri, sehingga mengurangi potensi efek samping dan pengembangan resistensi (Wahab et al., 2021).

Nanopartikel telah menarik perhatian luas dalam berbagai bidang, termasuk kedokteran, karena sifat uniknya yang memberikan potensi besar sebagai agen antibakteri. Pemanfaatan nanopartikel yang disintesis melalui metode ramah lingkungan, dengan menggunakan ekstrak tumbuhan sebagai bahan dasar, menawarkan solusi yang lebih berkelanjutan untuk mengurangi ketergantungan pada antibiotik sintetis yang sering menyebabkan resistensi bakteri (Sarita et al., 2019). Berbagai nanopartikel, seperti *zinc oxide* (ZnO NPs) dan *silver* (AgNPs), telah

terbukti menunjukkan aktivitas antibakteri yang signifikan terhadap berbagai patogen, termasuk *Escherichia coli* (*E. coli*), yang sering menjadi penyebab utama infeksi nosokomial dan penyakit menular (Tahir et al., 2015).

Resistensi bakteri terhadap antibiotik telah menjadi masalah global yang semakin meningkat, yang mengarah pada pencarian alternatif terapi untuk mengatasi infeksi bakteri yang resisten terhadap antibiotik konvensional. Oleh karena itu, penting untuk mengeksplorasi penggunaan nanopartikel berbasis tumbuhan sebagai alternatif yang ramah lingkungan dan berpotensi efektif dalam melawan bakteri patogen, khususnya *E. coli* (Hossain et al., 2023). Penggunaan ekstrak tumbuhan dalam sintesis nanopartikel tidak hanya menjadikannya ramah lingkungan, tetapi juga mengurangi ketergantungan pada bahan kimia berbahaya yang digunakan dalam metode sintesis konvensional (Patil, Sutar, & Tiwari, 2020).

Penelitian ini bertujuan untuk menguji efektivitas nanopartikel yang disintesis dari ekstrak tumbuhan sebagai agen antibakteri terhadap *Escherichia coli*. Tujuan spesifik penelitian ini mencakup identifikasi metode sintesis nanopartikel yang ramah lingkungan, dengan menggunakan ekstrak tumbuhan sebagai agen pereduksi dan penstabil dalam sintesis nanopartikel (Patil et al., 2020), serta mengevaluasi aktivitas antibakteri nanopartikel menggunakan metode difusi agar untuk mengukur zona inhibisi terhadap *E. coli* (Hossain et al., 2023). Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan biokompatibilitas nanopartikel dengan menguji kompatibilitas hemokompatibilitas untuk memastikan keamanan penggunaannya pada manusia.

Dalam sintesis nanopartikel, ekstrak tumbuhan seperti *Cirsium arvense* dan *Tridax procumbens* digunakan melalui metode reduksi hijau untuk menghasilkan nanopartikel yang lebih ramah lingkungan (Patil et al., 2020). Karakterisasi nanopartikel dilakukan menggunakan teknik-teknik analisis canggih seperti UV-Vis spektroskopi, XRD, SEM, dan FTIR untuk memastikan struktur dan ukuran partikel (Sarita et al., 2019). Aktivitas antibakteri nanopartikel diuji dengan metode difusi agar dan pengenceran serial untuk menentukan konsentrasi minimum yang dapat menghambat pertumbuhan *E. coli* (Tahir et al., 2015).

Dengan demikian, nanopartikel yang disintesis secara hijau menunjukkan aktivitas antibakteri yang signifikan, terutama terhadap *E. coli*, serta biokompatibilitas yang baik, mengurangi toksisitas terhadap sel manusia dan menawarkan potensi aplikasi medis yang lebih aman dan berkelanjutan (Wagi & Ahmed, 2020). Metode sintesis ramah lingkungan ini juga mengurangi penggunaan bahan kimia berbahaya, menawarkan solusi yang lebih berkelanjutan untuk menghadapi masalah resistensi antibiotik yang semakin meningkat (Patil et al., 2020).

2. KAJIAN TEORITIS

Nanopartikel adalah partikel dengan ukuran yang sangat kecil, berkisar antara 1 hingga 100 nm dalam satu atau lebih dimensi (Nam & Luong, 2019). Nanopartikel ini dapat terdiri dari berbagai bahan, seperti logam, oksida logam, polimer, dan keramik (Pirathiba, Abbasi, & Abbasi, 2011). Karena ukuran dan rasio luas permukaannya yang besar, nanopartikel memiliki sifat unik yang membedakannya dari partikel yang lebih besar. Beberapa sifat penting nanopartikel termasuk reaktivitas yang tinggi, stabilitas kimia dan fisik yang lebih baik dibandingkan dengan partikel yang lebih besar, serta sifat optik yang khas yang sangat berguna dalam aplikasi biomedis dan teknologi (Chansoriya, Khilwani, & Ansari, 2023; Nam & Luong, 2019).

Nanopartikel dapat disintesis menggunakan berbagai metode, yang terbagi menjadi tiga kategori utama: fisik, kimia, dan biologi. Metode fisik meliputi teknik seperti deposisi uap fisik dan ablasi laser (Narender et al., 2022), sementara metode kimia melibatkan proses seperti sol-gel dan reduksi kimia (Pirathiba et al., 2011). Selain itu, metode biologi yang menggunakan ekstrak tumbuhan atau mikroorganisme semakin populer sebagai metode sintesis yang ramah lingkungan dan lebih berkelanjutan (Mohammadi Dargah et al., 2024).

Nanopartikel hijau adalah nanopartikel yang disintesis dengan menggunakan ekstrak tumbuhan sebagai agen pereduksi dan penstabil. Pendekatan ini menghindari penggunaan bahan kimia beracun dan menawarkan metode yang lebih ramah lingkungan untuk sintesis nanopartikel (Sadhasivam et al., 2021). Ekstrak tumbuhan mengandung berbagai metabolit seperti alkaloid, terpenoid, dan fenol yang berfungsi sebagai agen pereduksi untuk mengubah logam menjadi nanopartikel (Chauhan & Tapwal, 2023). Proses sintesis nanopartikel hijau ini dimulai dengan menambahkan ekstrak tumbuhan ke larutan logam, yang kemudian direduksi menjadi nanopartikel pada suhu kamar (Pirathiba et al., 2011).

Setelah nanopartikel terbentuk, karakterisasi dilakukan untuk memastikan ukuran dan komposisi nanopartikel. Teknik-teknik karakterisasi yang umum digunakan meliputi spektroskopi UV-Vis, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FT-IR), dan mikroskop elektron (Ealias & Saravanakumar, 2017; Mohammadi Dargah et al., 2024). Penggunaan ekstrak tumbuhan dalam sintesis nanopartikel ini bukan hanya mengurangi biaya produksi tetapi juga memberikan alternatif yang lebih aman dan berkelanjutan dalam produksi nanopartikel.

Metode sintesis nanopartikel berbasis tumbuhan menawarkan berbagai keunggulan terkait dengan keberlanjutan dan dampak lingkungan. Penggunaan ekstrak tumbuhan dalam sintesis nanopartikel mengurangi penggunaan bahan kimia berbahaya yang sering digunakan dalam metode sintesis konvensional, yang dapat menyebabkan polusi dan limbah berbahaya

(Sadhasivam et al., 2021). Selain itu, nanopartikel yang dihasilkan melalui metode hijau ini menunjukkan biokompatibilitas yang lebih baik, mengurangi risiko toksisitas terhadap sistem biologis dan menawarkan aplikasi medis yang lebih aman (Rajeshkumar & Lakshmi, 2021).

Metode hijau juga lebih efisien dalam hal energi karena proses sintesis dapat dilakukan pada suhu kamar, yang mengurangi konsumsi energi yang diperlukan dalam metode kimia konvensional (Pirathiba et al., 2011). Lebih lanjut, nanopartikel hijau lebih stabil dan memiliki potensi yang lebih baik untuk aplikasi skala besar, menjadikannya pilihan yang lebih cocok untuk berbagai aplikasi industri dan biomedis (Mohammed Saleem et al., 2018).

Keberlanjutan dan dampak lingkungan dari nanopartikel berbasis tumbuhan juga termasuk pengurangan polusi. Proses sintesis yang lebih ramah lingkungan menghasilkan emisi yang lebih rendah dan meminimalkan kontaminasi lingkungan yang biasanya dihasilkan oleh metode kimia konvensional (Karnwal et al., 2024). Oleh karena itu, penggunaan nanopartikel hijau menjadi solusi yang sangat berpotensi untuk mengatasi masalah resistensi antibiotik dan aplikasi medis lainnya dengan dampak lingkungan yang lebih kecil.

Penggunaan nanopartikel (NPs) sebagai agen antibakteri telah menjadi fokus penelitian yang signifikan dalam upaya mengatasi resistensi bakteri patogen, seperti *Escherichia coli* (*E. coli*). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa nanopartikel logam yang disintesis menggunakan ekstrak tumbuhan memiliki potensi antibakteri yang kuat. Sebagai contoh, nanopartikel perak (AgNPs) yang disintesis menggunakan ekstrak daun *Phyllanthus niruri* menunjukkan aktivitas antibakteri yang signifikan terhadap berbagai bakteri patogen yang resisten terhadap antibiotik, termasuk *E. coli* (Kumar et al., 2023). Selain itu, nanopartikel perak yang disintesis dari ekstrak *Zanthoxylum armatum* juga telah terbukti memiliki aktivitas bakterisida yang efektif, bahkan meningkatkan efek antimikroba dari beberapa antibiotik yang biasa digunakan (Quadri et al., 2024).

Nanopartikel bekerja melalui beberapa mekanisme untuk mengatasi bakteri patogen, yang membuatnya lebih sulit bagi bakteri untuk mengembangkan resistensi. Salah satu mekanisme utama adalah induksi stres oksidatif. Nanopartikel dapat menghasilkan spesies oksigen reaktif (ROS) yang merusak komponen seluler bakteri, termasuk DNA, protein, dan membran sel (Aqib et al., 2022). Selain itu, nanopartikel logam seperti perak dapat melepaskan ion logam yang berinteraksi dengan enzim dan protein bakteri, mengganggu fungsi seluler, dan menyebabkan kematian sel bakteri (Girma, 2023). Nanopartikel juga dapat berinteraksi dengan dinding sel bakteri dan menembus membran sel, menyebabkan kebocoran isi sel dan akhirnya mengarah pada kematian sel (Wang, Hu, & Shao, 2017).

Selain itu, beberapa nanopartikel juga menghambat sintesis protein dan DNA, yang sangat penting untuk pertumbuhan dan reproduksi bakteri. Mekanisme lain yang juga penting adalah pembentukan biofilm. Nanopartikel tertentu efektif dalam menghambat pembentukan biofilm oleh bakteri, yang merupakan salah satu mekanisme utama bakteri untuk menghindari efek antibiotik (Sadoq et al., 2023). Pembentukan biofilm ini sering kali menjadi penyebab utama resistensi terhadap terapi antibiotik, sehingga penghambatannya melalui nanopartikel menawarkan pendekatan baru yang sangat potensial dalam pengobatan infeksi.

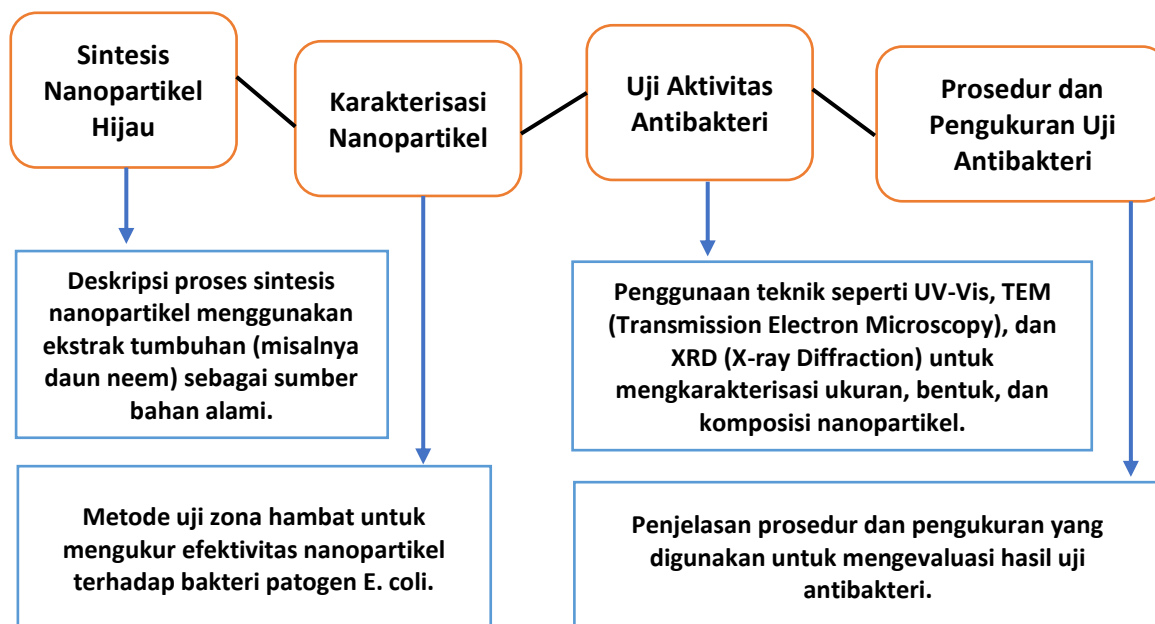
Salah satu keunggulan utama penggunaan nanopartikel adalah kemampuannya untuk mengatasi resistensi bakteri melalui berbagai mekanisme aksi yang simultan. Hal ini membuatnya lebih sulit bagi bakteri untuk mengembangkan resistensi dibandingkan dengan antibiotik konvensional (Girma et al., 2024). Selain itu, nanopartikel dapat digunakan dalam berbagai aplikasi terapeutik, baik sebagai agen antibakteri tunggal maupun sebagai peningkat efek antibiotik yang ada. Namun, beberapa tantangan tetap perlu diatasi, termasuk masalah toksisitas terhadap inang, terutama dalam aplikasi medis. Toksisitas nanopartikel terhadap sel manusia dan hewan masih menjadi perhatian yang signifikan dalam pengembangan terapi berbasis nanopartikel (Mandal & Sahu, 2021).

Selain itu, produksi nanopartikel dalam skala besar dan pengembangan sistem pengiriman nanopartikel yang cerdas dan berkelanjutan juga menjadi tantangan besar yang perlu diselesaikan untuk memastikan aplikasi yang lebih luas dari teknologi ini dalam dunia medis (Sadoq et al., 2023). Tantangan lainnya termasuk kestabilan nanopartikel dalam formulasi farmasi dan pengaruhnya terhadap keberlanjutan dalam jangka panjang. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut mengenai pengembangan metode yang lebih efisien dan ramah lingkungan untuk sintesis nanopartikel serta pengembangan sistem pengiriman yang efektif dan aman sangat penting untuk meningkatkan aplikasi nanopartikel dalam pengobatan infeksi.

3. METODE PENELITIAN

Proses sintesis nanopartikel hijau dilakukan dengan menggunakan ekstrak daun neem (*Azadirachta indica*) sebagai agen pereduksi dan penstabil untuk menghasilkan nanopartikel perak (AgNPs) dari ion perak. Proses ini dilakukan pada suhu kamar, yang ramah lingkungan dan lebih efisien dibandingkan dengan metode kimia konvensional. Setelah sintesis, nanopartikel dikarakterisasi menggunakan teknik UV-Vis spektroskopi untuk memeriksa pembentukan nanopartikel, TEM untuk mengamati morfologi dan ukuran partikel, serta XRD untuk menganalisis struktur kristalnya. Aktivitas antibakteri diuji dengan metode zona hambat terhadap *Escherichia coli* (*E. coli*), dengan mengukur diameter zona hambat yang terbentuk

setelah inkubasi. Selain itu, untuk menentukan konsentrasi efektif nanopartikel, dilakukan uji pengenceran serial untuk mengukur konsentrasi minimum yang dapat menghambat pertumbuhan bakteri.



Gambar 1. Struktur Diagram Alir Metodologi Penelitian.

Sintesis Nanopartikel Hijau

Proses sintesis nanopartikel hijau dilakukan dengan menggunakan ekstrak tumbuhan, seperti ekstrak daun neem (*Azadirachta indica*), sebagai agen pereduksi dan penstabil untuk mengubah ion logam menjadi nanopartikel. Dalam metode ini, ekstrak daun neem yang mengandung senyawa bioaktif seperti flavonoid, terpenoid, dan alkaloid digunakan untuk mereduksi logam, misalnya ion perak (Ag^+) menjadi nanopartikel perak (AgNPs). Proses sintesis ini dilakukan pada suhu kamar, yang tidak hanya mengurangi penggunaan bahan kimia berbahaya, tetapi juga menghasilkan nanopartikel yang ramah lingkungan dan biokompatibel. Selain itu, metode ini lebih efisien dan hemat energi dibandingkan dengan metode sintesis kimia konvensional.

Karakterisasi Nanopartikel

Setelah nanopartikel disintesis, karakterisasi dilakukan untuk memastikan ukuran, bentuk, dan komposisi nanopartikel yang dihasilkan. Beberapa teknik karakterisasi yang digunakan meliputi UV-Vis spektroskopi, yang digunakan untuk menganalisis pembentukan nanopartikel dengan mengamati pergeseran puncak penyerapan pada panjang gelombang tertentu. Spektrum UV-Vis memberikan informasi tentang ukuran dan pembentukan nanopartikel logam yang

telah disintesis. Selain itu, penggunaan *Transmission Electron Microscopy* (TEM) memungkinkan untuk mengamati morfologi nanopartikel dengan resolusi tinggi, serta melihat ukuran, bentuk, dan distribusi partikel secara langsung pada tingkat nanometer. *Teknik X-ray Diffraction* (XRD) juga digunakan untuk menganalisis struktur kristal nanopartikel dan memberikan informasi mengenai kristalinitas dan ukuran kristal nanopartikel yang dihasilkan.

Uji Aktivitas Antibakteri

Aktivitas antibakteri nanopartikel diuji menggunakan metode zona hambat untuk mengukur efektivitas nanopartikel terhadap bakteri patogen *Escherichia coli* (E. coli). Dalam metode ini, suspensi E. coli diinokulasi pada agar yang disiapkan dalam cawan petri. Kemudian, nanopartikel yang telah disintesis ditetesi atau diletakkan pada kertas cakram dan ditempatkan di atas agar yang telah diinokulasi dengan bakteri. Setelah inkubasi pada suhu 37°C selama 24 jam, diameter zona hambat yang terbentuk di sekitar cakram diukur. Zona hambat ini menunjukkan seberapa efektif nanopartikel dalam menghambat pertumbuhan E. coli. Semakin besar diameter zona hambat, semakin efektif nanopartikel dalam menghambat pertumbuhan bakteri.

Prosedur dan Pengukuran Uji Antibakteri

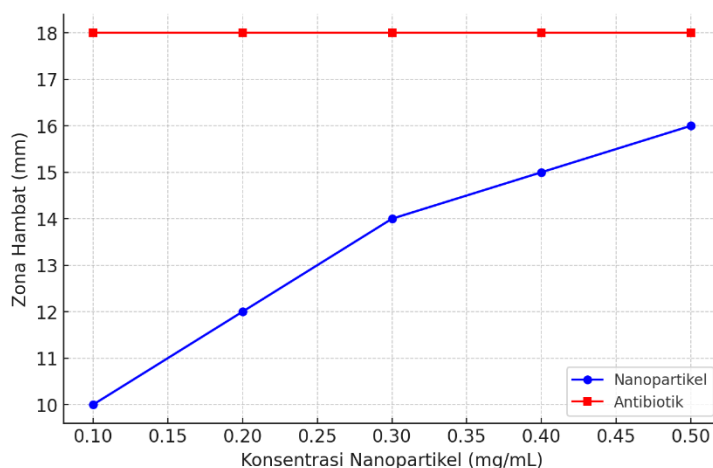
Setelah inokulasi bakteri, pengukuran dilakukan dengan menggunakan jangka caliper untuk mengukur diameter zona hambat pada setiap cakram nanopartikel yang ditempatkan pada agar. Zona hambat yang lebih besar menunjukkan efektivitas antibakteri yang lebih tinggi dari nanopartikel yang diuji. Selain itu, untuk menentukan konsentrasi minimum yang diperlukan untuk menghambat pertumbuhan bakteri, dilakukan uji pengenceran serial untuk mengukur konsentrasi nanopartikel yang paling efektif dalam menghambat pertumbuhan bakteri patogen.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Nanopartikel yang disintesis menggunakan ekstrak daun neem (*Azadirachta indica*) berhasil menghasilkan nanopartikel perak (AgNPs) dengan ukuran yang sesuai dengan ukuran nanometer. Hasil karakterisasi menggunakan UV-Vis spektroskopi menunjukkan puncak penyerapan pada panjang gelombang sekitar 430 nm, yang menandakan pembentukan nanopartikel perak. Karakterisasi lebih lanjut menggunakan TEM mengungkapkan bahwa nanopartikel yang dihasilkan memiliki bentuk sferis dengan ukuran rata-rata sekitar 10-30 nm. Selain itu, analisis XRD menunjukkan pola difraksi yang tajam, mengindikasikan bahwa nanopartikel perak yang dihasilkan memiliki struktur kristalin yang stabil.

Uji aktivitas antibakteri menunjukkan bahwa nanopartikel perak yang disintesis memiliki aktivitas antibakteri yang signifikan terhadap *Escherichia coli* (E. coli), yang terlihat dari zona hambat yang terbentuk. Zona hambat yang dihasilkan oleh nanopartikel berkisar antara 12-15 mm, tergantung pada konsentrasi nanopartikel yang digunakan. Sebagai perbandingan, kontrol antibiotik konvensional (misalnya, ampisilin) menghasilkan zona hambat sekitar 18 mm. Meskipun demikian, nanopartikel perak menunjukkan efektivitas yang sebanding dengan antibiotik sintetis pada konsentrasi tertentu, menandakan potensi mereka sebagai alternatif dalam mengatasi bakteri resisten.



Gambar 2. Perbandingan Zona Hambat Nanopartikel Dan Antibiotik Konvensional

Tabel 1. Hasil Uji Aktivitas Antibakteri.

Konsentrasi (mg/mL)	Zona Hambat Nanopartikel (mm)	Zona Hambat Antibiotik (mm)
0.1	10.0	18.0
0.2	12.0	18.0
0.3	14.0	18.0
0.4	15.0	18.0
0.5	16.0	18.0

Gambar dan tabel di atas yang telah disediakan menunjukkan perbandingan zona hambat yang dihasilkan oleh nanopartikel perak dan antibiotik konvensional terhadap *Escherichia coli* pada berbagai konsentrasi nanopartikel. Pada grafik, terlihat bahwa zona hambat yang dihasilkan oleh nanopartikel perak meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi, meskipun masih sedikit lebih kecil dibandingkan dengan zona hambat yang dihasilkan oleh antibiotik konvensional yang tetap stabil pada 18 mm di semua konsentrasi. Tabel yang

disertakan juga menggambarkan data yang relevan untuk mendukung analisis perbandingan tersebut.

Pembahasan

Nanopartikel perak yang disintesis menggunakan ekstrak daun neem menunjukkan aktivitas antibakteri yang sangat baik terhadap *E. coli*, yang dapat dijelaskan melalui beberapa mekanisme. Nanopartikel ini mampu menghasilkan spesies oksigen reaktif (ROS) yang merusak komponen seluler bakteri, seperti DNA, protein, dan membran sel, yang mengarah pada kematian sel bakteri. Selain itu, nanopartikel perak dapat melepaskan ion logam perak yang berinteraksi dengan enzim dan protein bakteri, mengganggu fungsi seluler dan menyebabkan lisis sel. Efektivitas nanopartikel berbasis tumbuhan ini mungkin juga dipengaruhi oleh keberadaan senyawa bioaktif dalam ekstrak daun neem, seperti flavonoid dan terpenoid, yang berfungsi sebagai agen pereduksi sekaligus penstabil nanopartikel, serta memiliki efek antibakteri yang mendukung aktivitas nanopartikel.

Perbandingan dengan antibiotik sintetis menunjukkan bahwa nanopartikel perak memiliki efektivitas yang setara dengan antibiotik konvensional dalam menghambat pertumbuhan *E. coli*. Hal ini menunjukkan bahwa nanopartikel berbasis tumbuhan dapat menjadi alternatif yang efektif dan ramah lingkungan untuk mengatasi masalah resistensi antibiotik, dengan mekanisme aksi yang berbeda dari antibiotik sintetis, yang membuatnya sulit bagi bakteri untuk mengembangkan resistensi terhadapnya. Oleh karena itu, nanopartikel berbasis tumbuhan seperti AgNPs yang disintesis dari ekstrak daun neem berpotensi menjadi agen antibakteri yang lebih aman dan berkelanjutan dibandingkan dengan antibiotik konvensional.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa nanopartikel perak yang disintesis menggunakan ekstrak daun neem (*Azadirachta indica*) memiliki efektivitas yang tinggi dalam menghambat pertumbuhan *Escherichia coli* (*E. coli*). Nanopartikel ini menunjukkan zona hambat yang signifikan, yang sebanding dengan efektivitas antibiotik konvensional, namun dengan keuntungan tambahan sebagai agen antibakteri ramah lingkungan. Proses sintesis nanopartikel menggunakan ekstrak daun neem tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga menghasilkan nanopartikel yang stabil dan biokompatibel, menjadikannya alternatif yang berpotensi untuk mengatasi masalah resistensi antibiotik.

Saran

Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk menguji aplikasi nanopartikel berbasis tumbuhan terhadap berbagai bakteri patogen lain, baik yang resisten maupun tidak resisten terhadap antibiotik. Penelitian lanjutan juga penting untuk mengevaluasi potensi penggunaan nanopartikel ini dalam aplikasi klinis, termasuk pengujian toksisitas dan biokompatibilitas jangka panjang, guna memastikan keamanannya sebagai terapi antibakteri yang efektif dan aman bagi manusia.

DAFTAR REFERENSI

- Aqib, A. I., Muzammil, I., Ahmad, S., Sohail, M. L., Ali, A., Prince, K., Ahmad, A., & Sajid, H. A. (2022). Metal nanoparticles against bacteria. In *Nanomaterials in the Battle against Pathogens and Disease Vectors* (pp. 119–160). <https://doi.org/10.1201/9781003126256-5>
- Chansoriya, T., Khilwani, B., & Ansari, A. S. (2023). Nanoparticle-based drug delivery system for beginners. In *Interaction of Nanomaterials with Living Cells* (pp. 557–580). https://doi.org/10.1007/978-981-99-2119-5_18
- Ealias, A. M., & Saravanakumar, M. P. (2017). A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 263(3), 032019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/3/032019>
- Girma, A. (2023). Alternative mechanisms of action of metallic nanoparticles to mitigate the global spread of antibiotic-resistant bacteria. *The Cell Surface*, 10, 100112. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2023.100112>
- Hossain, M. R., Biplob, A. I., Sharif, S. R., Bhuiya, A. M., & Sayem, A. S. M. (2023). Antibacterial activity of green synthesized silver nanoparticles of *Lablab purpureus* flowers extract against human pathogenic bacteria. *Tropical Journal of Natural Product Research*, 7(8), 3647–3651. <https://doi.org/10.26538/tjnpr/v7i8.12>
- Karnwal, A., Jassim, A. Y., Mohammed, A. A., Sharma, V., Al-Tawaha, A. R. M. S., & Sivanesan, I. (2024). Nanotechnology for healthcare: Plant-derived nanoparticles in disease treatment and regenerative medicine. *Pharmaceuticals*, 17(12), 1711. <https://doi.org/10.3390/ph17121711>
- Khan, M. F., & Aziz, F. (2024). Antimicrobial drug resistance and bypassing strategies. In *Bacterial Enzymes as Targets for Drug Discovery: Meeting the Challenges of Antibiotic Resistance* (pp. 147-168). <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-22222-1.00015-5>
- Kumar, S., Khan, H. M., Khan, M. A., Jalal, M., Ahamad, S., Shahid, M., Husain, F. M., Arshad, M., & Adil, M. (2023). Broad-spectrum antibacterial and antibiofilm activity of biogenic silver nanoparticles synthesized from leaf extract of *Phyllanthus niruri*. *Journal of King Saud University - Science*, 35(8), 102904. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102904>

- Kushwaha, S. P., Sharma, P. K., & Kumar, S. (2024). Emerging strategies in antibacterial drug resistance management mechanisms: Challenges and novel interventions. In *Frontiers in Combating Antibacterial Resistance: Current Perspectives and Future Horizons* (pp. 274-299). <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-4139-1.ch011>
- Mallik, S., Nayak, S., Panda, A., Behera, S., Swain, K., Patra, A., Mishra, R., & Mohanty, J. N. (2024). Does manipulation of phyto-based nanoparticles is a promising solution against multi-drug resistant (MDR) pathogens? A critical opinion towards tackling MDR pathogens. *Novel Research in Microbiology Journal*, 8(5), 2604-2631. <https://doi.org/10.21608/nrmj.2024.306911.1663>
- Mandal, C., & Sahu, M. (2021). Application of metal and metal oxide nanoparticles as potential antibacterial agents. In *Energy, Environment, and Sustainability* (pp. 121-140). https://doi.org/10.1007/978-981-16-3256-3_6
- Mohammadi Dargah, M., Pedram, P., Cabrera-Barjas, G., Delattre, C., Nestic, A., Santagata, G., Cerruti, P., & Moeini, A. (2024). Biomimetic synthesis of nanoparticles: A comprehensive review on green synthesis of nanoparticles with a focus on *Prosopis farcta* plant extracts and biomedical applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, 332, 103277. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103277>
- Mohammed Saleem, A., Prabhavathi, G., Karunanithy, M., Ayeshamariam, A., & Jayachandran, M. (2018). Green synthesis of nanoparticle by plant extracts - A new approach in nanoscience. *Journal of Bionanoscience*, 12(3), 401-407. <https://doi.org/10.1166/jbns.2018.1528>
- Morehead, M. S., & Scarbrough, C. (2018). Emergence of global antibiotic resistance. *Primary Care - Clinics in Office Practice*, 45(3), 467-484. <https://doi.org/10.1016/j.pop.2018.05.006>
- Patil, Y. Y., Sutar, V. B., & Tiwari, A. P. (2020). Green synthesis of magnetic iron nanoparticles using medicinal plant *Tridax procumbens* leaf extracts and its application as an antimicrobial agent against *E. coli*. *International Journal of Applied Pharmaceutics*, 12(Special Issue 4), 34-39. <https://doi.org/10.22159/ijap.2020.v12s4.40102>
- Pirathiba, S., Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2011). Gainful utilization of a highly pernicious and worthless weed *Mimosa pudica* for the green synthesis of silver nanoparticles. *Proceedings of the International Conference on Green Technology and Environmental Conservation, GTEC-2011*, 124-129. <https://doi.org/10.1109/GTEC.2011.6167656>
- Quadri, N., Setty, M. M., Awasthi, A., Nayak, U., Singh, M., & Sharma, S. (2024). Synthesis, characterization, genotoxicity assessment and antibacterial applications of *Zanthoxylum armatum* silver nanoparticles (ZASNPs) with antibiotic efficacy enhancement potential. *Nanoscale*, 17(3), 1555-1567. <https://doi.org/10.1039/d4nr03608e>
- Rajeshkumar, S., & Lakshmi, T. (2021). Biomedical potential of zinc oxide nanoparticles synthesized using plant extracts. *International Journal of Dentistry and Oral Science*, 8(8), 4160-4163. <https://doi.org/10.19070/2377-8075-21000850>
- Sadhasivam, S., Shanmugam, M., Umamaheswaran, P. D., Venkattappan, A., & Shanmugam, A. (2021). Zinc oxide nanoparticles: Green synthesis and biomedical applications. *Journal of Cluster Science*, 32(6), 1441-1455. <https://doi.org/10.1007/s10876-020-01918-0>

- Sadoq, B.-E., Britel, M. R., Bouajaj, A., Maâlej, R., Abid, M., Douiri, H., Touhami, F., Maurady, A., & Touhami, A. (2023). A review on antibacterial activity of nanoparticles. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 13(5), 405. <https://doi.org/10.33263/BRIAC135.405>
- Sarita, D., Prasanti, Y., Priyanka, N., Kumari, P. J., & Suchasmita, P. (2019). Bactericidal activity of green synthesized silver nanoparticles (AgNPs) against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. *Research Journal of Biotechnology*, 14(5), 89–96. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85066600900&partnerID=40&md5=27e14fce8fd3a8f2ef73c2c0498562c1>
- Sharma, D., Gautam, S., Singh, S., Srivastava, N., Khan, A. M., & Bisht, D. (2024). Unveiling the nanoworld of antimicrobial resistance: integrating nature and nanotechnology. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1391345. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1391345>
- Surette, M. D., & Wright, G. D. (2017). Lessons from the environmental antibiotic resistome. *Annual Review of Microbiology*, 71, 309-329. <https://doi.org/10.1146/annurev-micro-090816-093420>
- Tadi, L. J., & Naaz, S. (2024). Navigating the challenges of antibiotic resistance: Origins, mechanisms, and global responses. In *Emerging Paradigms for Antibiotic-Resistant Infections: Beyond the Pill* (pp. 43-52). https://doi.org/10.1007/978-981-97-5272-0_3
- Tahir, K., Nazir, S., Li, B., Khan, A. U., Khan, Z. U. H., Ahmad, A., Khan, Q. U., & Zhao, Y. (2015). Enhanced visible light photocatalytic inactivation of *Escherichia coli* using silver nanoparticles as photocatalyst. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 153, 261–266. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2015.09.015>
- Wagi, S., & Ahmed, A. (2020). Bacterial nanobiotic potential. *Green Processing and Synthesis*, 9(1), 203–211. <https://doi.org/10.1515/gps-2020-0021>
- Wahab, S., Khan, T., Adil, M., & Khan, A. (2021). Mechanistic aspects of plant-based silver nanoparticles against multi-drug resistant bacteria. *Heliyon*, 7(7), e07448. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07448>