

**JURNAL METAMORFOSA**  
**Journal of Biological Sciences**  
ISSN: 2302-5697  
<https://ejournal3.unud.ac.id/index.php/metamorfosa>

**Sintesis dan Karakterisasi Nanopartikel Perak Ekstrak Daun Melinjo (*Gnetum gnemon* L.) serta Potensinya sebagai Antibakteri**

**Synthesis and Characterization of Silver Nanoparticles Using Melinjo (*Gnetum gnemon* L.) Leaf Extract and Their Potential as Antibacterial Agents**

**Dinda Alithia Ningrum<sup>1</sup>, Khairiza Lubis<sup>2\*</sup>, Dinda Syahfitri<sup>3</sup>, Dhifa Umairah Putri<sup>4</sup>, Cyndi Clodia<sup>5</sup>, Hanifah Dzaky Fadillah<sup>6</sup>, Gita Hartati<sup>7</sup>**

<sup>1,2,3,4,5,6,7</sup> Program studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Medan, Jl. Willem Iskandar Psr V, Medan, Sumatera Utara, 20221

\*Email: [khairizalubis@unimed.ac.id](mailto:khairizalubis@unimed.ac.id)

**INTISARI**

Meningkatnya resistensi bakteri mendorong pengembangan alternatif antimikroba seperti nanopartikel perak berbasis bahan alam. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik nanopartikel perak yang disintesis menggunakan ekstrak daun melinjo (*Gnetum gnemon* Linn.) serta mengkaji potensinya sebagai agen antibakteri. Sintesis dilakukan dengan metode bioreduksi menggunakan rasio 1:30 antara ekstrak daun melinjo dan larutan AgNO<sub>3</sub>, kemudian diamati perubahan warna larutan setiap jam sebagai indikator pembentukan nanopartikel. Karakterisasi dilakukan menggunakan spektrofotometer UV-Vis, FTIR dan PSA. Hasil UV-Vis menunjukkan puncak serapan maksimum pada panjang gelombang sekitar 421 nm setelah 24 jam, sedangkan nilai PDI sebesar 0,101 menunjukkan distribusi partikel yang relatif homogen dengan diameter ukuran rata-rata 116,2 nm. Hasil FTIR menunjukkan adanya tiga puncak utama pada 3279,51 cm<sup>-1</sup>, 2114,65 cm<sup>-1</sup>, dan 1635,42 cm<sup>-1</sup> yang mengindikasikan keberadaan gugus -OH, C≡C, dan C=O dari senyawa metabolit sekunder daun melinjo yang berperan dalam proses bioreduksi ion perak (Ag<sup>+</sup>) menjadi Ag<sup>0</sup>. Uji antibakteri dengan metode difusi cakram menunjukkan bahwa AgNPs hasil biosintesis menghasilkan zona hambat terhadap *E. coli* masing-masing sebesar 1,7 mm pada konsentrasi 50 µg/ml, 1,9 mm pada 75 µg/ml, dan 2,3 mm pada 100 µg/ml, sedangkan terhadap *S. aureus* sebesar 2 mm pada 50 µg/ml, 4 mm pada 75 µg/ml, dan 11,5 mm pada 100 µg/ml. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ekstrak daun melinjo dapat digunakan sebagai bioreduktor dalam sintesis nanopartikel perak dengan karakteristik yang baik dan ukuran partikel yang homogen. Selain itu, AgNPs yang dihasilkan memiliki aktivitas antibakteri terhadap *E. coli* dan *S. aureus* yang meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi.

**Kata kunci :** AgNP, bioreduktor, spektrofotometer UV-Vis, analisis FTIR, difusi cakram

**ABSTRACT**

The increasing prevalence of bacterial resistance has encouraged the development of alternative antimicrobial agents, including silver nanoparticles synthesized from natural sources. This study aimed to determine the success of synthesizing silver nanoparticles (AgNPs) using *Gnetum gnemon* Linn. (melinjo) leaf extract and to evaluate their potential as antibacterial agents. The synthesis was carried out using a bioreduction method with a 1:30 ratio between melinjo leaf extract and AgNO<sub>3</sub> solution, and the color change of the solution was observed hourly as an indicator of nanoparticle formation.

Characterization was conducted using UV-Vis, FTIR and PSA. The UV-Vis analysis revealed a maximum absorption peak at around 421 nm after 24 hours, while the PDI value of 0.101 indicated a relatively homogeneous particle distribution with an average particle diameter of 116.2 nm. FTIR results showed three main peaks at 3279.51  $\text{cm}^{-1}$ , 2114.65  $\text{cm}^{-1}$ , and 1635.42  $\text{cm}^{-1}$ , indicating the presence of  $-\text{OH}$ ,  $\text{C}\equiv\text{C}$ , and  $\text{C}=\text{O}$  groups from secondary metabolites of melinjo leaves that play a role in the bioreduction of silver ions ( $\text{Ag}^+$ ) to metallic silver ( $\text{Ag}^0$ ). The antibacterial test using the disk diffusion method showed that the biosynthesized AgNPs produced inhibition zones against *E. coli* of 1.7 mm at a concentration of 50  $\mu\text{g/ml}$ , 1.9 mm at 75  $\mu\text{g/ml}$ , and 2.3 mm at 100  $\mu\text{g/ml}$ , while against *S. aureus* the inhibition zones were 2 mm at 50  $\mu\text{g/ml}$ , 4 mm at 75  $\mu\text{g/ml}$ , and 11.5 mm at 100  $\mu\text{g/ml}$ . The results indicate that melinjo leaf extract can serve as a natural bioreductor for synthesizing silver nanoparticles with favorable characteristics and homogeneous particle size, and that the produced AgNPs exhibit concentration-dependent antibacterial activity against *E. coli* and *S. aureus*.

**Keyword:** AgNPs, bioreductors, UV-Vis spectrophotometry, FTIR analysis, disk diffusion

## PENDAHULUAN

Bakteri merupakan organisme mikroskopik yang hidup di berbagai kondisi lingkungan. Beberapa bakteri bersifat menguntungkan, namun beberapa bersifat merugikan, seperti *Escherichia coli* yang dapat menyebabkan infeksi saluran pencernaan dan *Staphylococcus aureus* yang dapat memicu penyakit kulit dan meningitis. Bakteri *E. coli* dikenal sebagai penyebab infeksi saluran pencernaan yang dapat mengakibatkan diare, diare berdarah, hingga sindrom hemolitik-uremik melalui struktur virulennya seperti pili, kapsul, endotoksin, dan eksotoksin (Simanjuntak *et al.*, 2022). Sementara itu, *S. aureus* merupakan bakteri penyebab utama infeksi nosokomial yang dapat memicu berbagai penyakit, seperti mastitis, dermatitis, infeksi saluran pernapasan, impetigo, abses, sindrom syok toksik, dan keracunan makanan dengan gejala mual, muntah, serta diare (Goetie *et al.*, 2022).

Salah satu pengobatan yang paling banyak digunakan dalam mengobati penyakit yang disebabkan infeksi bakteri adalah dengan memberikan antibiotik (Maida & Lestari, 2019). Namun, antibiotik memiliki kelemahan utama berupa resistensi, di mana bakteri memperoleh gen resisten yang memungkinkan mereka bertahan terhadap antibiotik. Resistensi ini diperparah oleh penggunaan antibiotik yang tidak bijak, baik di bidang kesehatan maupun pertanian, sehingga mempercepat munculnya *strain* resisten yang dapat menyebar antar manusia, hewan, dan lingkungan (Simanjuntak *et al.*, 2022). Oleh karena itu, diperlukan upaya yang lebih efektif serta solutif untuk mengatasi masalah ini seperti penggunaan ekstrak tanaman yang dimodifikasi dengan nanoteknologi (Luthfia *et al.*, 2024).

Nanoteknologi dipandang sebagai salah satu pendekatan alternatif yang menjanjikan dalam upaya mengatasi permasalahan resistensi bakteri. Bidang ini mempelajari material berukuran nano, yaitu partikel dengan skala sekitar 1–100 nanometer. Pada ukuran tersebut, nanopartikel memiliki karakteristik fisik dan kimia yang khas sehingga banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang, termasuk sebagai katalis maupun dalam aplikasi medis. Keunggulan sifat-sifat tersebut menjadikan nanoteknologi menarik perhatian luas di kalangan peneliti (Hasheminya & Dehghannya, 2020).

Salah satu jenis nanopartikel yang banyak diteliti adalah nanopartikel berbahan logam mulia, yang memiliki sifat-sifat unggul dan cocok untuk berbagai aplikasi. Nanopartikel yang terbuat dari logam mulia, seperti emas (AuNPs) dan perak (AgNPs). Perak dikenal sebagai agen antibakteri yang efektif terutama dalam bentuk ionik sehingga banyak dimanfaatkan dalam proses sintesis karena kemampuannya menghambat pertumbuhan sel mikroba. Aktivitas antibakteri perak dilaporkan meningkat seiring dengan penurunan ukuran partikel. Ukuran yang lebih kecil menghasilkan luas permukaan yang lebih besar, sehingga intensitas interaksi dan kontak antara perak dengan sel bakteri menjadi lebih tinggi (Indah *et al.*, 2022). Nanopartikel perak (AgNPs) telah menarik minat besar dalam beberapa tahun terakhir sebagai bahan ideal karena karakteristiknya yang unik, seperti biokompatibilitas, sifat inert, stabilitas, penyerapan kuat gelombang elektromagnetik di wilayah tampak

melalui *surface plasmon resonance* (SPR), serta toksisitas yang rendah (Zuhrotun *et al.*, 2023). Nanopartikel perak dilaporkan sebagai antibakteri yaitu berasal dari kemampuannya berinteraksi dengan dinding sel bakteri, menghasilkan ion perak ( $\text{Ag}^+$ ), dan menyebabkan kerusakan membran yang berujung pada kematian sel (Hasan *et al.*, 2024).

Nanopartikel perak dapat bekerja melawan bakteri Gram positif dan gram negatif melalui interaksi yang kuat dengan membran bakteri, merusaknya, dan menghasilkan *Reactive Oxygen Species* (ROS) serta dapat menjadi solusi alternatif untuk mengatasi resistensi antibiotik (Wahab *et al.*, 2021). Untuk menghasilkan AuNPs dan AgNPs yang optimal, berbagai metode sintesis telah dikembangkan. Sintesis AuNPs dan AgNPs dilakukan melalui metode kimia, fisika, dan biologi atau sering disebut "sintesis hijau". Metode kimia dan fisika secara perlahan mulai digantikan oleh metode sintesis hijau karena beberapa kelemahan, seperti pelepasan senyawa kimia berbahaya dan beracun, kebutuhan energi yang tinggi, penggunaan alat yang kompleks, dan kondisi sintesis yang rumit (Zuhrotun *et al.*, 2023).

Saat ini, sintesis nanopartikel melalui metode biologi lebih diutamakan dibandingkan metode fisikokimia karena dinilai memiliki berbagai keunggulan seperti tidak beracun, memiliki reproduksibilitas yang baik, lebih mudah untuk diproduksi dalam skala besar dan menghasilkan morfologi yang lebih optimal (Dewi *et al.*, 2019). Senyawa metabolit sekunder yang terdapat dalam ekstrak tumbuhan, seperti flavonoid, senyawa fenolik, tanin, dan komponen sejenis lainnya, berperan penting dalam proses sintesis nanopartikel perak. Senyawa-senyawa tersebut dapat bertindak sebagai agen pereduksi (bioreduktor) sekaligus penstabil (*capping agent*) yang memfasilitasi reduksi ion  $\text{Ag}^+$  menjadi nanopartikel perak serta menjaga kestabilan partikel yang terbentuk (Oktavia & Sutoyo, 2021). Setiap tanaman dilaporkan memiliki kandungan senyawa metabolit sekunder termasuk pada tanaman melinjo (Susmayanti & Rahmadani, 2023).

Melinjo (*Gnetum gnemon* Linn.) merupakan tanaman berbiji terbuka (Gymnospermae) yang secara alami banyak tumbuh di kawasan Asia Tenggara, khususnya Indonesia (Tanamal *et al.*, 2017). Tanaman ini diketahui mengandung beragam senyawa metabolit sekunder yang berpotensi dimanfaatkan dalam pengobatan tradisional. Senyawa-senyawa tersebut antara lain alkaloid, flavonoid, dan saponin. Selain itu, bagian biji dan daun melinjo juga dilaporkan kaya akan flavonoid, saponin, serta tanin (Susmayanti & Rahmadani, 2023). Flavonoid memiliki berbagai potensi, seperti sebagai antioksidan serta aktivitas biologis lainnya, termasuk sebagai antibakteri, antiinflamasi, antialergi, dan antitrombosis (Rais, 2015). Tanaman melinjo mengandung senyawa flavonoid yang berpotensi sebagai bioreduktor (Susmayanti & Rahmadani, 2023).

Sintesis nanopartikel perak menggunakan ekstrak daun melinjo (*Gnetum gnemon*) sebagai bioreduktor telah dilaporkan oleh Budiman (2022) dengan aktivitas sebagai agen antifungi terhadap *Aspergillus niger*. Sejumlah penelitian terdahulu juga melaporkan bahwa nanopartikel perak (AgNPs) yang disintesis menggunakan berbagai ekstrak tanaman memiliki aktivitas antibakteri. Huong dan Nguyen (2021) melaporkan sintesis hijau AgNPs menggunakan ekstrak daun lerak (*Sapindus mukorossi*) sebagai agen pereduksi, yang menunjukkan efektivitas antibakteri terhadap *Staphylococcus aureus* (Gram positif) sehingga berpotensi untuk aplikasi biomedis. Penelitian yang dilakukan oleh Masykuroh dan Puspasari (2022) menggunakan ekstrak keladi sarawak (*Alocasia macrorrhizos*) sebagai agen pereduksi dalam sintesis AgNPs, dengan hasil uji antibakteri yang menunjukkan kemampuan penghambatan terhadap *Escherichia coli* (Gram negatif). Selain itu, Luthfia *et al.* (2024) melaporkan sintesis AgNPs melalui metode green synthesis menggunakan ekstrak daun bidara (*Ziziphus spinachristi*), yang menghasilkan zona hambat terhadap *S. aureus* berkisar antara 9,05 mm hingga 13,19 mm, menunjukkan potensi AgNPs sebagai agen antimikroba. Hingga saat ini, belum terdapat laporan yang secara khusus mengkaji sintesis AgNPs menggunakan ekstrak daun melinjo (*G. gnemon*) sebagai agen antibakteri. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi ekstrak daun melinjo sebagai bioreduktor dalam sintesis hijau AgNPs yang stabil dan homogen, serta menilai aktivitas antibakterinya terhadap *S. aureus* dan *E. coli*.

## BAHAN DAN METODE

### Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi timbangan analitik, gelas beker, pipet volume, *hot plate* dengan *magnetic stirrer*, mikropipet, cawan petri, autoklaf, inkubator 37°C, laminar air flow, spektrofotometer UV-Vis Thermoscientific, spektrofotometer FTIR dan PSA serta jangka untuk mengukur zona hambat. Bahan yang digunakan yaitu daun segar sebagai bahan pereduksi, daun yang diambil dari tangkai ke-3 sampai ke-5 dipilih karena posisi tersebut umumnya mewakili daun matang secara fisiologis, sehingga kandungan metabolit sekundernya lebih stabil dibandingkan daun sangat muda atau daun tua, pengambilan dari node tengah ini mengurangi variasi biologis akibat pertumbuhan atau senesens (Vasconcelos *et al.*, 2017). Kemudian bahan lain yang dibutuhkan yaitu larutan perak nitrat (AgNO<sub>3</sub>) 1 mM, akuabides, ampisilin, media Nutrien Agar (NA) dan Mueller-Hinton Agar (MHA), cakram kertas steril, larutan saline (NaCl 0,85%), standar kekeruhan McFarland 0,5 yaitu sekitar 1,5×10<sup>8</sup> sel/mL, serta kultur bakteri *S. aureus* dan *E. coli* sebagai organisme uji.

### Ekstraksi Daun Melinjo

Proses ekstraksi daun melinjo (*Gnetum gnemon*) pada penelitian ini mengadaptasi metode Ketebu & Gede (2020). Daun segar dicuci bersih menggunakan air mengalir dan akuades, kemudian dipotong kecil-kecil. Sebanyak 20 gram daun dipanaskan dengan 100 mL akuades pada suhu sekitar 60 °C selama 15 menit, lalu disaring menggunakan kertas saring Whatman No. 1 untuk memperoleh ekstrak jernih. Ekstrak yang dihasilkan disimpan pada suhu 4 °C hingga siap digunakan dalam sintesis nanopartikel perak.

### Sintesis Nanopartikel Perak

Sintesis nanopartikel perak dilakukan dengan mencampurkan ekstrak daun melinjo sebagai agen pereduksi dengan larutan AgNO<sub>3</sub> pada perbandingan 1 mL ekstrak dan 30 mL larutan AgNO<sub>3</sub>. Untuk mengoptimalkan laju reaksi dan pembentukan partikel, pH campuran diatur menjadi 10 melalui penambahan NaOH 0,1 M. Campuran diaduk dan diamati perubahan warnanya pada waktu reaksi 0, 1, 6, 24, dan 48 jam. Perubahan warna dari kuning muda menjadi kecokelatan menandakan terbentuknya nanopartikel. Koloid nanopartikel perak yang dihasilkan kemudian dikarakterisasi menggunakan spektrofotometer UV-Vis, FTIR, dan PSA, serta dimanfaatkan untuk uji aktivitas antibakteri (Mangkay *et al.*, 2023).

### Karakterisasi Nanopartikel Perak

Karakterisasi nanopartikel perak (AgNP) dilakukan untuk memastikan terbentuknya partikel dan mengetahui sifat fisiknya. Analisis awal menggunakan spektrofotometer UV-Vis dilakukan pada koloid AgNP 1 mM pada waktu reaksi 0, 1, 6, 24, dan 48 jam untuk menentukan panjang gelombang dan nilai absorbansi maksimum, dengan puncak serapan khas berada pada rentang 400–450 nm. Sampel kemudian dipurifikasi melalui sentrifugasi bertahap pada 14.000 rpm dan dicuci dengan akuades. Selanjutnya, karakterisasi FTIR dilakukan pada rentang 400–4000 cm<sup>-1</sup> untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang berperan dalam pembentukan AgNP, sedangkan analisis PSA digunakan untuk menentukan distribusi ukuran dan rata-rata diameter partikel.

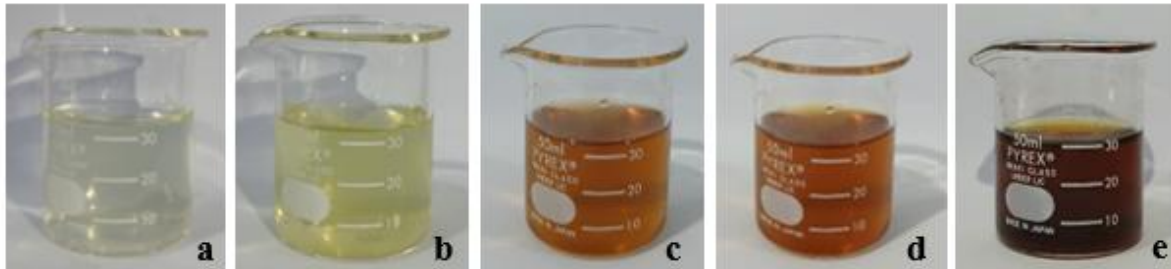
### Uji Antibakteri

Uji antibakteri dilakukan menggunakan metode difusi cakram pada media Mueller-Hinton Agar (MHA). Media disiapkan dan disterilisasi pada 121°C selama 15 menit, sedangkan biakan *E. coli* dan *S. aureus* diremajakan pada media Nutrient Agar, kemudian dibuat suspensi dengan kekeruhan setara standar McFarland 0,5. Kertas cakram direndam dalam larutan nanopartikel perak dengan konsentrasi 50, 75, dan 100 µg/mL, serta disiapkan kontrol positif yaitu ampisilin 1 mg/mL dan kontrol negatif yaitu akuabides. Cakram diletakkan pada permukaan MHA yang telah diinokulasi bakteri, lalu diinkubasi pada suhu 37°C selama 24 jam. Aktivitas antibakteri diamati dari diameter zona hambat yang terbentuk di sekitar cakram, kemudian diklasifikasikan berdasarkan kekuatan daya hambatnya.

## HASIL

### Sintesis Nanopartikel Perak

Sintesis nanopartikel perak (AgNPs) dilakukan menggunakan prekursor larutan perak nitrat ( $\text{AgNO}_3$ ) dengan konsentrasi 1 mM dengan perbandingan volume ekstrak dan prekursor sebesar 1:30. Pengamatan dilakukan pada 0, 1, 4, 6, dan 24 jam. Adapun hasil sintesis nanopartikel perak dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut.

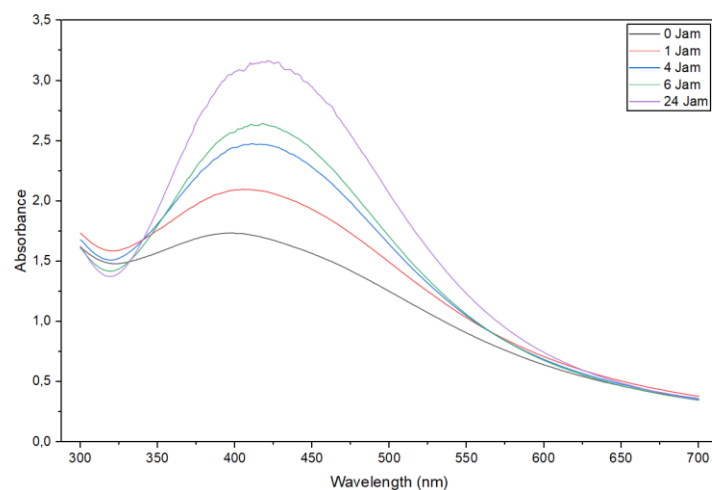


**Gambar 1.** Hasil sintesis nanopartikel perak menggunakan ekstrak daun melinjo; (a) hasil sintesis 0 jam; (b) hasil sintesis 1 jam; (c) hasil sintesis 4 jam; (d) hasil sintesis 6 jam; (e) hasil sintesis 24 jam

Berdasarkan Gambar 1 perubahan warna larutan selama sintesis nanopartikel perak (AgNP) menggunakan ekstrak daun melinjo (*G. gnemon*) terjadi secara bertahap. Larutan  $\text{AgNO}_3$  awalnya bening, kemudian berubah menjadi kekuningan pada 15 menit pertama, kuning-coklat setelah 1 jam, coklat muda hingga tua pada 2–4 jam, dan akhirnya coklat kemerahan pekat setelah 24 jam.

### Karakterisasi Menggunakan UV-Vis

Karakterisasi dengan spektrofotometer UV–Vis dilakukan untuk mengonfirmasi keberhasilan sintesis nanopartikel perak (AgNPs) melalui pengamatan puncak khas *Surface Plasmon Resonance* (SPR) pada rentang panjang gelombang 400–450 nm. Kurva spektrum menunjukkan peningkatan intensitas absorbansi yang semakin nyata seiring bertambahnya waktu reaksi dari 0 hingga 24 jam. Profil spektrum UV–Vis nanopartikel perak yang disintesis menggunakan ekstrak daun melinjo disajikan pada Gambar 2.

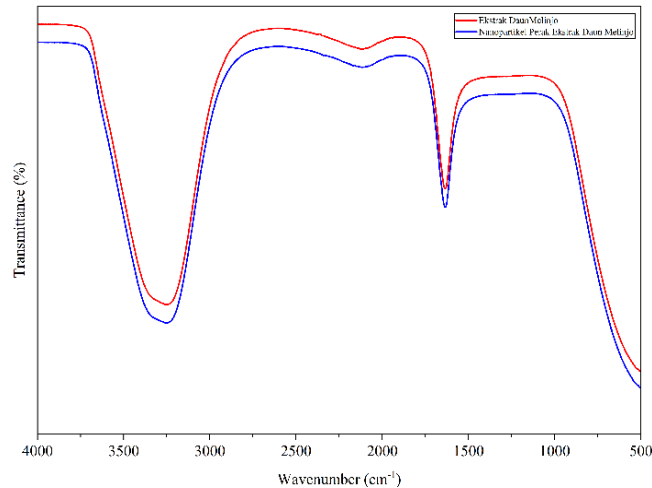


**Gambar 2.** Hasil karakterisasi nanopartikel perak ekstrak daun melinjo dengan spektrofotometer uv-vis

Berdasarkan hasil karakterisasi menggunakan spektrofotometer UV–Vis (Gambar 2), pembentukan nanopartikel perak (AgNPs) ditandai dengan adanya puncak serapan karakteristik pada rentang panjang gelombang 390–450 nm.

### Karakterisasi Menggunakan FTIR

Karakterisasi Nanopartikel Perak dengan FTIR digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi senyawa bioaktif yang berperan dalam proses reduksi dan penstabilan nanopartikel perak. Adapun hasil karakterisasi FTIR dari nanopartikel perak ekstrak daun melinjo disajikan pada Gambar 3 berikut.

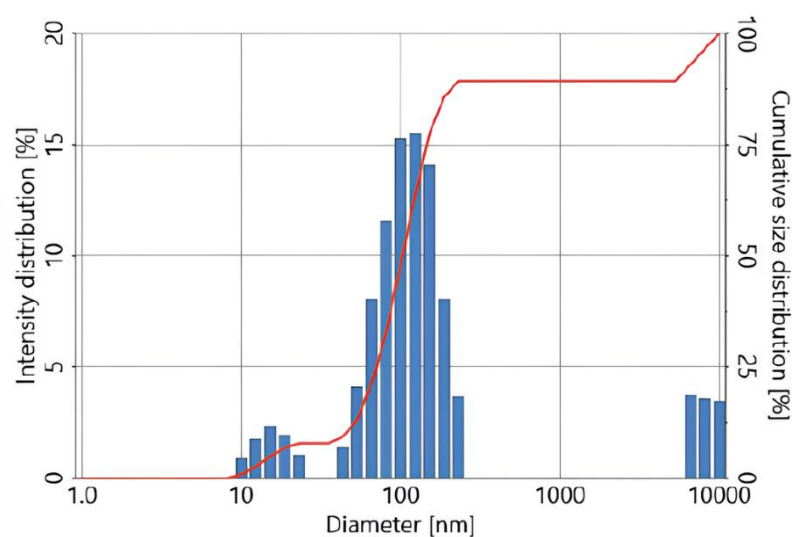


**Gambar 3.** Spektrum FTIR nanopartikel perak (AgNP) menunjukkan pola serapan pada rentang bilangan gelombang 4000–500  $\text{cm}^{-1}$

Pada hasil ini, terdapat tiga puncak utama yang terdeteksi, yaitu pada 3279,51  $\text{cm}^{-1}$ , 2114,65  $\text{cm}^{-1}$ , dan 1635,42  $\text{cm}^{-1}$ . Ketiga puncak tersebut memiliki nilai absorbansi masing-masing sebesar 0,373, 0,935, dan 0,628. Rentang bilangan gelombang pada sumbu x berada antara 4000–500  $\text{cm}^{-1}$

### Karakterisasi Menggunakan PSA

Karakterisasi PSA digunakan untuk menentukan ukuran rata-rata partikel, distribusi ukuran, dan tingkat homogenitas/*Polydispersity index* (PDI) dari nanopartikel yang terbentuk. Hasil pengukuran ukuran partikel dan nilai PDI pada sampel AgNPs daun melinjo dengan rasio 1:30 dapat dilihat pada Gambar 4.

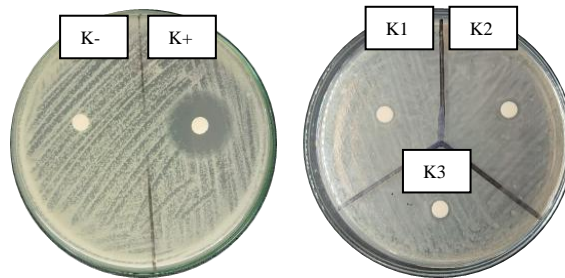


**Gambar 4.** Distribusi ukuran partikel berdasarkan intensitas (%) dan kurva kumulatif ukuran partikel (nm).

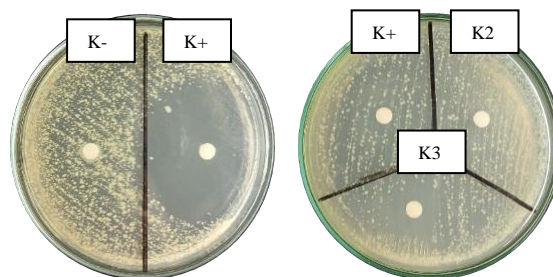
Hasil analisis PSA pada Gambar 4. menunjukkan bahwa nanopartikel perak (AgNPs) yang disintesis menggunakan ekstrak daun melinjo dengan rasio 1:30 memiliki ukuran partikel dominan pada rentang 90–160 nm dengan rata-rata sebesar 116,2 nm. Distribusi intensitas partikel mencapai maksimum sekitar 17%, sedangkan kurva kumulatif menunjukkan distribusi ukuran partikel mencapai 100% pada kisaran di bawah 1000 nm.

### Uji Antibakteri

Aktivitas antibakteri nanopartikel perak diuji terhadap *E. coli* dan *S. aureus*. Pengamatan dilakukan berdasarkan zona hambat yang terbentuk pada masing-masing perlakuan. Hasil pengujian disajikan pada Gambar 5.



**Gambar 5.** Hasil uji antibakteri nanopartikel perak (AgNPs) terhadap *E. coli* menggunakan metode difusi cakram. (a) Kontrol positif (ampisilin) dan kontrol negatif (akuabides) (b) Nanopartikel perak K1: konsentrasi 50 µg/ml, K2: konsentrasi 75 µg/ml, dan K3: konsentrasi 100 µg/ml



**Gambar 6.** Hasil uji antibakteri nanopartikel perak (AgNPs) terhadap *S. aureus* menggunakan metode difusi cakram. (a) Kontrol positif (ampisilin) dan kontrol negatif (akuabides) (b) Nanopartikel perak K1: konsentrasi 50 µg/ml, K2: konsentrasi 75 µg/ml, dan K3: konsentrasi 100 µg/ml

Hasil uji aktivitas antibakteri terhadap kedua bakteri uji menunjukkan adanya variasi diameter zona hambat pada masing-masing konsentrasi nanopartikel perak yang digunakan. Data hasil uji aktivitas antibakteri nanopartikel perak yang disintesis menggunakan ekstrak daun melinjo dapat dilihat pada Tabel 1 berikut. Berdasarkan data pada Tabel 1, hasil pengujian aktivitas antibakteri menunjukkan bahwa nanopartikel perak yang disintesis menggunakan ekstrak daun melinjo mampu menghambat pertumbuhan *E. coli*. Aktivitas antibakteri yang dihasilkan pada konsentrasi 50, 75, dan 100 µg/mL menunjukkan diameter zona hambat masing-masing sebesar 7,7 mm, 7,9 mm, dan 8,3 mm. Ukuran zona hambat tersebut berada pada rentang 5–10 mm yang termasuk dalam kategori sedang. Sementara itu, kontrol positif (K+) menghasilkan diameter zona hambat sebesar 11,6 mm yang diklasifikasikan sebagai aktivitas kuat, sedangkan pada kontrol negatif (K-) tidak teramati pembentukan zona hambat.

**Tabel 1.** Hasil uji antibakteri menggunakan nanopartikel perak ekstrak daun melinjo

Bakteri	Konsentrasi	Diameter Zona (mm)	Kategori
<i>E. coli</i>	K+	11,6	Kuat
	K-	0	Lemah
	K1	7,7	Sedang
	K2	7,9	Sedang
	K3	8,3	Sedang
<i>S. aureus</i>	K+	45	Sangat Kuat
	K-	0	Lemah
	K1	8	Sedang
	K2	10	Sedang
	K3	17,5	Kuat

Keterangan:

Kontrol positif: Antibiotik Ampisilin

Kontrol negatif: Akuabides

K1: Konsentrasi 50 µg/ml ( $5 \times 10^{-5}$  g/ml)

K2: Konsentrasi 75 µg/ml ( $7.5 \times 10^{-5}$  g/ml)

K3: Konsentrasi 100 µg/ml ( $1 \times 10^{-4}$  g/ml) (Parthiban *et al.*, 2019)

Pada bakteri *S. aureus*, nanopartikel perak menunjukkan aktivitas antibakteri pada seluruh variasi konsentrasi yang diuji, yaitu 50, 75, dan 100 µg/mL, dengan diameter zona hambat masing-masing sebesar 8 mm, 10 mm, dan 17,5 mm. Aktivitas penghambatan pada konsentrasi 50 dan 75 µg/mL tergolong kategori sedang, sedangkan peningkatan diameter zona hambat teramati pada konsentrasi 100 µg/mL. Kontrol positif (K<sup>+</sup>) menghasilkan diameter zona hambat sebesar 45 mm yang diklasifikasikan sebagai aktivitas kuat, sementara kontrol negatif (K<sup>-</sup>) tidak menunjukkan pembentukan zona hambat. Hasil ini mengindikasikan bahwa nanopartikel perak hasil sintesis memiliki kemampuan menghambat pertumbuhan *S. aureus*, meskipun efektivitasnya masih terbatas pada konsentrasi yang lebih rendah.

## PEMBAHASAN

### Sintesis Nanopartikel Perak

Larutan perak nitrat (AgNO<sub>3</sub>) pada kondisi awal tampak jernih karena mengandung ion Ag<sup>+</sup> dalam bentuk terlarut. Setelah penambahan ekstrak daun melinjo dan berlangsungnya reaksi, terjadi perubahan warna larutan secara bertahap, yaitu menjadi kekuningan pada 15 menit pertama, kuning kecokelatan setelah 1 jam, cokelat muda pada 2 jam, cokelat tua setelah 4 jam, hingga berubah menjadi cokelat kemerahan pekat pada 24 jam. Perubahan warna tersebut mengindikasikan terbentuknya nanopartikel perak yang dihasilkan dari proses reduksi ion Ag<sup>+</sup> menjadi perak logam (Ag<sup>0</sup>) oleh senyawa metabolit aktif yang terkandung dalam ekstrak daun melinjo. Fenomena ini berkaitan dengan kemunculan Surface Plasmon Resonance (SPR), yang merupakan karakteristik khas nanopartikel perak dan umumnya ditandai dengan warna cokelat kemerahan pada sistem koloid (Veerasingam *et al.*, 2011).

Warna kekuningan yang muncul pada menit-menit awal merupakan indikasi fase nukleasi, yaitu tahap awal terbentuknya inti nanopartikel perak dari reduksi ion Ag<sup>+</sup>. Setelah satu hingga empat jam, larutan berubah menjadi coklat muda hingga coklat tua, menandakan terjadinya fase pertumbuhan partikel di mana inti-inti perak yang terbentuk mulai berkembang menjadi partikel yang lebih besar. Pada tahap ini, senyawa bioaktif dari ekstrak berperan sebagai agen penstabil (*capping agent*) yang mencegah aglomerasi berlebih antarpartikel. Menurut Ahmad *et al.* (2010) senyawa fenolik, flavonoid, dan tanin pada ekstrak tumbuhan berperan penting dalam mereduksi ion logam serta menstabilkan nanopartikel melalui interaksi gugus hidroksil dengan permukaan perak

Pada tahap akhir (18–24 jam), larutan menunjukkan warna coklat kemerahan pekat, yang mengindikasikan bahwa proses reduksi telah berlangsung hampir sempurna dan sistem telah mencapai kondisi setimbang. Menurut Obaid *et al.* (2015), perubahan warna menjadi coklat kemerahan merupakan tanda bahwa nanopartikel perak telah terbentuk secara stabil dengan distribusi ukuran yang relatif homogen. Penelitian oleh Sasikala *et al.* (2014) juga melaporkan perubahan warna serupa pada sintesis AgNP menggunakan ekstrak daun *Cochlospermum religiosum*, dengan hasil koloid berwarna coklat gelap setelah 24 jam reaksi. Kesamaan pola perubahan warna ini menunjukkan bahwa mekanisme bioreduksi pada ekstrak daun melinjo sejalan dengan prinsip *green synthesis* yang telah banyak dilaporkan pada berbagai tanaman

### Karakterisasi Menggunakan UV-Vis

Berdasarkan hasil karakterisasi menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada Gambar 2 terbentuknya nanopartikel perak (AgNPs) ditunjukkan oleh adanya puncak serapan (absorbansi) khas pada rentang panjang gelombang 390–450 nm. Pada 0 jam spektrum UV-Vis menunjukkan puncak absorbansi dasar (*baseline*) atau hanya sedikit sinyal di wilayah plasmon 398 nm. Intensitasnya relatif rendah dibandingkan jam-jam selanjutnya. Hal ini menunjukkan bahwa pada  $t = 0$  belum banyak ion  $\text{Ag}^+$  yang tereduksi menjadi  $\text{Ag}^0$  (nanopartikel), sehingga konsentrasi nanopartikel masih sangat rendah. Keadaan ini mencerminkan fase inisiasi reaksi reduksi. Hal ini sejalan dengan penelitian Okka *et al.* (2023) yang menyebutkan bahwa pada waktu awal intensitas SPR (*surface plasmon resonance*) masih kecil (belum terbentuk banyak nanopartikel). Pada titik ini juga puncak SPR mungkin belum tampak jelas atau hanya berupa membentuk *shoulder* kecil, yang menandakan bahwa proses nukleasi baru mulai berjalan.

Setelah 1 jam, terjadi peningkatan intensitas absorbansi di sekitar panjang gelombang plasmon khas 405 nm. Ini menunjukkan bahwa sejumlah ion  $\text{Ag}^+$  telah direduksi menjadi  $\text{Ag}^0$  dan mulai membentuk nanopartikel yang cukup besar untuk bisa beresonansi plasmon. Puncak mulai muncul dengan bentuk yang lebih jelas dibandingkan 0 jam. Adanya peningkatan ini konsisten dengan kinetika pembentukan nanopartikel pada fase awal di mana laju reduksi masih berlangsung dan banyak ion  $\text{Ag}^+$  yang tersedia. Penelitian Kumar *et al.* (2022) menyebutkan bahwa proses pembentukan AgNP mengikuti kinetika orde pertama atau pseudo-orde pertama selama jam-jam awal. Ada sedikit pergeseran puncak ke arah panjang gelombang lebih panjang (*red shift*) dibandingkan waktu nol, hal ini menandakan telah terjadi interaksi awal antar partikel atau pengaruh senyawa penstabil dalam ekstrak yang mulai melapisi nanopartikel.

Pada jam ke-4 intensitas absorbansi puncak plasmon umumnya lebih tinggi dibandingkan 1 jam. Puncak menjadi lebih jelas dan mungkin mulai sedikit melebar (*broadening*). Hal ini menandakan bahwa pembentukan nanopartikel berlangsung terus dan jumlah nanopartikel (konsentrasi) relatif sudah meningkat. Ketika puncak melebar hal tersebut menunjukkan sedikit heterogenitas ukuran (polidispersitas) atau adanya awal agregasi ringan. Lebar puncak menjadi indikator variasi ukuran nanopartikel. Dalam literatur, pelebaran puncak SPR sering dikaitkan dengan distribusi ukuran yang lebih luas atau interaksi antar nanopartikel (Sharma *et al.*, 2020). Pada fase ini, reaksi reduksi masih aktif dan sebagian ion  $\text{Ag}^+$  masih tersedia sebagai substrat reaksi. Namun laju peningkatan absorbansi mulai melambat dibandingkan fase awal karena ketersediaan ion  $\text{Ag}^+$  menurun atau sistem mulai mendekati kesetimbangan.

Selanjutnya pada jam ke-6 puncak serapan maksimum ( $\lambda_{\text{max}}$ ) berada pada 418 nm dengan nilai absorbansi sebesar 2,643. Intensitas absorbansi mendekati nilai maksimum dan mengalami peningkatan yang lebih lambat dibandingkan fase 1-4 jam. Puncak SPR biasanya sudah sangat jelas pada rentang khas nanopartikel perak yaitu pada 418 nm. Terjadi sedikit pergeseran puncak ke panjang gelombang lebih tinggi (*red shift*) hal ini menandakan bahwa ada beberapa agregasi atau pertumbuhan partikel menjadi ukuran sedikit lebih besar. Okka *et al.* (2023) melaporkan bahwa setelah lebih dari 4 jam sistem mulai mendekati kesetimbangan dan perubahan absorbansi selanjutnya kecil.

Setelah 24 jam puncak serapan maksimum ( $\lambda_{max}$ ) berada pada 421 nm dengan nilai absorbansi sebesar 3,169. Terjadi pergeseran puncak ke arah panjang gelombang yang lebih tinggi (*red shift*) hal ini menandakan bahwa telah terjadi agregasi. Fenomena ini diperkuat dengan bentuk kurva UV-Vis yang mulai melebar di sekitar puncak serapan yang menandakan adanya peningkatan ukuran partikel atau penggabungan antarpartikel akibat terbatasnya jumlah senyawa fitokimia yang berperan sebagai penstabil. Hal serupa juga dilaporkan oleh Ansari *et al.* (2023) di mana nanopartikel perak yang disintesis menggunakan bioreduktor tanaman mengalami agregasi setelah waktu inkubasi 24 jam karena biomolekul penstabil sudah tidak mampu mempertahankan dispersi koloid. Sejalan dengan penelitian Liaqat *et al.* (2022) pergeseran atau pelebaran puncak SPR pada waktu reaksi yang lebih lama menandakan adanya pertumbuhan dan penggumpalan partikel yang menyebabkan hilangnya kestabilan sistem koloid. Nilai absorbansi tinggi yang diikuti dengan puncak yang tidak tajam menunjukkan bahwa reaksi reduksi ion  $Ag^+$  telah mencapai titik optimum sehingga sisa partikel cenderung mengalami interaksi antarmuka dan membentuk agregat.

### Karakterisasi Menggunakan FTIR

Berdasarkan hasil karakterisasi FTIR yang ditampilkan pada Gambar 3, nanopartikel perak (AgNPs) yang disintesis menggunakan ekstrak daun melinjo menunjukkan beberapa pita serapan utama pada bilangan gelombang  $3279,51\text{ cm}^{-1}$ ,  $2114,65\text{ cm}^{-1}$ , dan  $1635,42\text{ cm}^{-1}$ . Pita kuat pada  $3279,51\text{ cm}^{-1}$  mengindikasikan adanya getaran ulur (stretching) dari gugus N–H atau O–H yang berasal dari senyawa fenolik dalam ekstrak daun melinjo. Temuan ini sejalan dengan laporan Liaqat *et al.* (2022), yang menyatakan bahwa pita pada rentang  $3336,65\text{--}3238,46\text{ cm}^{-1}$  berkaitan dengan regangan N–H atau O–H dari senyawa fenolik. Gugus tersebut berperan penting dalam mereduksi ion  $Ag^+$  menjadi  $Ag^0$  serta membantu menstabilkan nanopartikel yang dihasilkan.

Sementara itu pita pada  $2114,65\text{ cm}^{-1}$  berkaitan dengan vibrasi ulur gugus  $C\equiv C$  atau  $C\equiv N$  yang berasal dari senyawa organik kompleks dalam ekstrak. Merujuk pada penelitian Alfryyan *et al.* (2022) yang melaporkan bahwa pada pita  $2100\text{--}2200\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan regangan (ulur) ikatan  $C\equiv C$  dari senyawa alkuna. Munculnya pita ini menunjukkan adanya interaksi antara biomolekul ekstrak dengan permukaan nanopartikel, yang mengindikasikan bahwa biomolekul tersebut menempel pada permukaan AgNP melalui ikatan koordinasi atau adsorpsi fisik.

Pita serapan pada bilangan gelombang  $1635,42\text{ cm}^{-1}$  mengindikasikan adanya vibrasi ulur gugus  $C=O$  dari ikatan amida (Amide I) yang umumnya berasal dari protein atau peptida dalam ekstrak tanaman. Rentang ini sesuai dengan karakteristik Amide I yang biasanya muncul pada  $1600\text{--}1700\text{ cm}^{-1}$  terutama ketika gugus tersebut berikatan hidrogen atau berinteraksi dengan senyawa lain. Menurut Liaqat *et al.* (2022), daerah  $1600\text{--}1700\text{ cm}^{-1}$  memang berhubungan dengan regangan  $C=O$  pada struktur amida. Pada sintesis nanopartikel perak, gugus amida ini berpotensi berinteraksi atau berkoordinasi dengan ion logam, sehingga berperan dalam proses reduksi maupun stabilisasi nanopartikel.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa senyawa bioaktif dalam ekstrak daun melinjo, seperti fenol, flavonoid, dan protein, berperan penting dalam proses reduksi ion perak ( $Ag^+$ ) menjadi perak logam ( $Ag^0$ ) serta dalam stabilisasi nanopartikel yang dihasilkan. Kehadiran gugus fungsi seperti  $-OH$ ,  $C\equiv C$ , dan  $C=O$  mengindikasikan bahwa biomolekul dari ekstrak daun melinjo berinteraksi dengan permukaan nanopartikel melalui ikatan koordinasi atau adsorpsi fisik membentuk. Hal ini sejalan dengan penelitian Liaqat *et al.* (2022) dan Alfryyan *et al.* (2022), yang menyatakan bahwa gugus fenolik dan karbonil berperan sebagai agen pereduksi dalam sintesis nanopartikel perak berbasis bahan alam. Kesamaan gugus fungsi yang terdeteksi pada spektrum FTIR ekstrak daun dan AgNPs menunjukkan bahwa fitokimia ekstrak melinjo berkontribusi aktif dalam proses pembentukan nanopartikel perak. (Ajaykumar *et al.*, 2023).

## Karakterisasi Menggunakan PSA

Berdasarkan hasil karakterisasi PSA pada Gambar 4, nanopartikel perak (AgNPs) yang disintesis menggunakan ekstrak daun melinjo pada rasio 1:30, distribusi intensitas menunjukkan puncak dominan pada rentang ukuran 80–150 nm dengan ukuran rata-rata partikel sebesar 116,2 nm. Hasil ini membuktikan bahwa sintesis tersebut menghasilkan nanopartikel, di mana suatu partikel dapat dikategorikan sebagai nanopartikel jika memiliki ukuran dengan diameter antara 1–1000 nm (Retnaningtyas *et al.*, 2025). Puncak distribusi tunggal yang tampak pada grafik menunjukkan bahwa sebagian besar partikel berada pada rentang ukuran yang sempit, mengindikasikan sistem yang cukup stabil dan terdispersi baik. Sejalan dengan penelitian Kassem Agha *et al.* (2024) hasil analisis PSA menunjukkan bahwa nanopartikel perak yang dihasilkan memiliki distribusi ukuran partikel yang seragam dengan puncak tunggal pada kurva intensitas serta nilai PDI yang rendah (0,213). Kondisi ini menandakan bahwa partikel yang terbentuk memiliki ukuran yang relatif homogen dan sistem koloid yang stabil tanpa adanya aglomerasi signifikan. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa proses biosintesis berlangsung secara terkendali, menghasilkan dispersi nanopartikel yang baik dan terdistribusi secara sempit dalam medium koloid.

Selain itu, nilai polidispersitas (PDI) yang diperoleh sebesar 0,101 memperkuat hasil tersebut. Jackson *et al.* (2025) menyebutkan bahwa PDI digunakan untuk menunjukkan rentang distribusi ukuran partikel dengan nilai antara 0 hingga 1. Nilai 0 menunjukkan bahwa nanopartikel yang terbentuk sangat homogen, sedangkan nilai 1 menunjukkan bahwa populasi nanopartikel tersebut sangat heterogen. Nilai PDI di bawah 0,3 umumnya menunjukkan bahwa sistem memiliki homogenitas ukuran yang tinggi dan dispersi partikel yang baik. PDI yang rendah menandakan bahwa proses sintesis berlangsung secara terkendali, di mana reduksi ion perak ( $\text{Ag}^+$ ) menjadi perak elementer ( $\text{Ag}^0$ ) terjadi secara merata tanpa menyebabkan aglomerasi berlebihan. Hasil ini sejalan dengan penelitian Priya & Santhi (2015) yang melaporkan bahwa nanopartikel dengan nilai PDI mendekati 0,1 menunjukkan morfologi partikel yang seragam serta kestabilan koloid yang tinggi. Dengan demikian, hasil analisis PSA menunjukkan bahwa AgNPs dari daun melinjo pada rasio 1:30 memiliki distribusi ukuran yang sempit, ukuran rata-rata partikel sekitar 116 nm dan kestabilan dispersi yang baik.

## Uji Antibakteri

Pengujian aktivitas antibakteri dilakukan menggunakan metode difusi cakram pada media Mueller–Hinton Agar (MHA). Metode ini dipilih karena kemudahan pelaksanaan, efisiensi biaya, waktu analisis yang relatif singkat, serta kemampuannya dalam memberikan visualisasi yang jelas melalui pembentukan zona hambat di sekitar cakram uji (Intan *et al.*, 2021). Evaluasi hasil pengujian dilakukan dengan mengukur diameter zona hambat (mm) setelah periode inkubasi. Terbentuknya zona bening di sekitar cakram menunjukkan adanya aktivitas antibakteri dari nanopartikel perak terhadap bakteri uji.

Berdasarkan hasil yang disajikan pada Tabel 1, nanopartikel perak menunjukkan aktivitas penghambatan terhadap pertumbuhan *E. coli* dengan diameter zona hambat sebesar 7,7 mm, 7,9 mm, dan 8,3 mm pada konsentrasi masing-masing 50  $\mu\text{g/mL}$ , 75  $\mu\text{g/mL}$ , dan 100  $\mu\text{g/mL}$ . Nilai diameter zona hambat tersebut termasuk dalam kategori aktivitas antibakteri sedang (5–10 mm). Kontrol positif menghasilkan zona hambat sebesar 11,6 mm yang diklasifikasikan sebagai aktivitas kuat, sedangkan pada kontrol negatif tidak teramati pembentukan zona hambat. Temuan ini menunjukkan bahwa pelarut yang digunakan tidak berkontribusi terhadap aktivitas antibakteri, sehingga efek penghambatan yang teramati sepenuhnya disebabkan oleh nanopartikel perak hasil sintesis.

Pada bakteri *S. aureus*, aktivitas antibakteri nanopartikel perak menunjukkan pola peningkatan seiring bertambahnya konsentrasi larutan uji. Diameter zona hambat yang terbentuk pada konsentrasi 50  $\mu\text{g/mL}$  dan 75  $\mu\text{g/mL}$  masing-masing sebesar 8 mm dan 10 mm, yang termasuk dalam kategori aktivitas sedang. Pada konsentrasi 100  $\mu\text{g/mL}$ , diameter zona hambat meningkat secara signifikan menjadi 17,5 mm dan diklasifikasikan sebagai aktivitas kuat. Cakram kontrol positif berupa ampisilin menghasilkan

zona hambat yang luas, sedangkan kontrol negatif menggunakan akuades tidak menunjukkan adanya zona penghambatan. Secara keseluruhan, hasil ini mengindikasikan bahwa efektivitas antibakteri nanopartikel perak terhadap *S. aureus* bersifat bergantung pada konsentrasi, dengan aktivitas optimum diperoleh pada konsentrasi tertinggi. Penentuan kategori daya hambat mengacu pada klasifikasi Davis dan Stout, yaitu lemah (<5 mm), sedang (5–10 mm), kuat (11–20 mm), dan sangat kuat (>20 mm). (Putri *et al.*, 2024).

Aktivitas antibakteri yang berada pada kategori sedang kemungkinan disebabkan oleh konsentrasi nanopartikel yang belum optimal atau distribusi partikel yang kurang homogen, sehingga interaksi antara nanopartikel dengan dinding sel bakteri belum mencapai tingkat maksimal. Selain itu, ukuran partikel yang lebih besar dapat menurunkan kemampuan penetrasi ke dalam sel bakteri. Hal ini sejalan dengan penelitian Daskar *et al.* (2022) yang menjelaskan bahwa semakin kecil ukuran nanopartikel, semakin besar kemampuannya menembus dinding sel bakteri dan berinteraksi dengan membran, sehingga dapat menyebabkan kerusakan pada struktur membran sel.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa *E. coli* cenderung memiliki daya tahan lebih tinggi terhadap nanopartikel perak dibandingkan *S. aureus*. Perbedaan ini berkaitan dengan struktur dinding sel kedua bakteri. *S. aureus* yang merupakan bakteri Gram positif memiliki lapisan peptidoglikan tebal namun tidak memiliki lapisan luar lipid, sehingga nanopartikel perak lebih mudah menembus dinding sel. Sebaliknya, *E. coli* yang termasuk bakteri Gram negatif memiliki lapisan ganda yang terdiri dari fosfolipid dan lipopolisakarida yang berperan sebagai penghalang difusi senyawa antibakteri (Hamidah *et al.*, 2019). Mekanisme penghambatan pertumbuhan bakteri oleh nanopartikel perak berlangsung melalui beberapa jalur. Salah satu mekanismenya melibatkan interaksi langsung nanopartikel dengan dinding dan membran sel bakteri, yang dapat meningkatkan permeabilitas membran hingga menyebabkan kebocoran komponen intraseluler. Selain itu, nanopartikel perak mampu menginduksi pembentukan spesies oksigen reaktif (ROS) yang berpotensi merusak protein serta materi genetik, sehingga mengganggu aktivitas metabolisme dan menurunkan viabilitas sel bakteri. (Panjaitan *et al.*, 2025).

Hasil uji antibakteri nanopartikel perak (AgNPs) terhadap *S. aureus* menunjukkan bahwa aktivitas penghambatan meningkat seiring dengan kenaikan konsentrasi namun secara keseluruhan tergolong lemah. Pada konsentrasi 50 dan 75 µg/mL zona hambat yang terbentuk termasuk kategori sedang sedangkan pada konsentrasi 100 µg/mL terdapat peningkatan aktivitas yang tidak konsisten pada antar konsentrasi. Hal ini mengindikasikan bahwa efektivitas AgNPs terhadap bakteri Gram positif seperti *S. aureus* sangat bergantung pada ukuran partikel dan jumlah ion perak ( $\text{Ag}^+$ ) yang dilepaskan selama interaksi dengan sel bakteri (Eker *et al.*, 2024). Hal ini disebabkan karena konsentrasi rendah memiliki jumlah ion  $\text{Ag}^+$  yang sedikit sehingga tidak cukup untuk menembus dan merusak membran sel bakteri secara efektif. Selain itu, perbedaan ukuran, morfologi, dan homogenitas partikel yang terbentuk selama sintesis dapat memengaruhi luas zona hambat antar konsentrasi (Dong *et al.*, 2019). Variasi kondisi teknis seperti ketebalan agar, volume inokulum, serta difusi partikel pada media juga dapat menjadi faktor penyebab perbedaan hasil antar konsentrasi (Rodrigues *et al.*, 2024).

Pada sistem nanopartikel perak (AgNPs), pembentukan spesies oksigen reaktif (ROS) menjadi salah satu mekanisme utama yang berperan dalam aktivitas antibakterinya. Ketika AgNPs berinteraksi dengan dinding atau membran sel bakteri, sebagian kecil dari permukaannya dapat melepaskan ion  $\text{Ag}^+$ . Meskipun sebagian besar atom perak telah tereduksi menjadi  $\text{Ag}^0$ , pelepasan ion  $\text{Ag}^+$  ini tetap dapat terjadi akibat reaksi oksidasi permukaan nanopartikel yang kontak langsung dengan lingkungan yang mengandung oksigen dan air. Ion  $\text{Ag}^+$  yang dilepaskan ini kemudian berperan dalam pembentukan ROS, seperti superoksida ( $\text{O}_2^-$ ), hidrogen peroksida ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), dan radikal hidroksil (OH $\cdot$ ). ROS tersebut dapat dihasilkan melalui proses reduksi oksigen oleh enzim NADPH oksidase (Dakal *et al.*, 2016).

Akumulasi ROS di dalam sel bakteri menyebabkan stres oksidatif, yang dapat merusak komponen vital seperti lipid membran, protein, dan DNA. Selain itu, AgNPs juga dapat menempel pada dinding sel dan menembus membran bakteri, sehingga mengganggu integritas membran serta menghambat fungsi

enzim respirasi. Ketika fungsi rantai transpor elektron terganggu, produksi energi dalam bentuk ATP menurun, dan keseimbangan redoks sel menjadi tidak stabil. Akibatnya, peningkatan ROS yang tidak terkendali dapat menyebabkan peroksidasi lipid, denaturasi protein, kerusakan DNA, hingga kematian sel (Dakal *et al.*, 2016). Aktivitas antibakteri ini menunjukkan bahwa meskipun daya hambat yang dihasilkan masih lemah, nanopartikel perak memiliki potensi sebagai agen antibakteri alami yang dapat dikembangkan lebih lanjut melalui optimasi ukuran partikel, konsentrasi, dan kestabilan koloidnya.

Nanopartikel perak (AgNP) yang digunakan untuk aplikasi antibakteri idealnya berada dalam skala nanometer yaitu sekitar 1–100 nm karena pada rentang ukuran ini rasio luas permukaan terhadap volume sangat tinggi sehingga pelepasan ion perak ( $\text{Ag}^+$ ) lebih efisien dan interaksi dengan dinding sel bakteri menjadi lebih optimal. Namun dalam penelitian ini, AgNP yang dihasilkan menunjukkan aglomerasi yaitu penggumpalan partikel-partikel nano menjadi agregat yang lebih besar akibat gaya tarik antar partikel seperti gaya *van der Waals* ketika stabilisasi permukaan tidak memadai. Kondisi aglomerasi ini menurunkan luas permukaan efektif partikel dan berdampak pada aktivitas antibakteri, karena jumlah ion  $\text{Ag}^+$  yang dilepaskan ke medium menjadi lebih terbatas (Mulenos *et al.*, 2020).

Ukuran partikel AgNP ditentukan oleh berbagai parameter sintesis yang saling berinteraksi secara kompleks. Literatur melaporkan bahwa variasi konsentrasi prekursor perak ( $\text{AgNO}_3$ ), jenis dan konsentrasi agen pereduksi, pH larutan, temperatur reaksi, waktu pemanasan, serta keberadaan dan komposisi stabilisator atau capping agent merupakan faktor utama yang mengontrol proses nukleasi dan pertumbuhan partikel. Setiap parameter tersebut dapat mengubah laju pembentukan inti (nucleation rate) maupun laju pertumbuhan kristalnya, sehingga perbedaan kecil dalam kondisi sintesis dapat menghasilkan ukuran partikel yang berbeda secara signifikan (Nguyen *et al.*, 2023).

## KESIMPULAN

Nanopartikel perak (AgNP) yang disintesis menggunakan ekstrak daun melinjo menunjukkan puncak serapan maksimum pada 432 nm dengan ukuran rata-rata 116,2 nm dan PDI 0,101, menandakan distribusi ukuran yang cukup seragam. Hasil FTIR mengonfirmasi adanya gugus  $-\text{OH}$ ,  $\text{C}\equiv\text{C}/\text{C}\equiv\text{N}$ , dan  $\text{C}=\text{O}$  yang berasal dari senyawa bioaktif daun melinjo yang berperan sebagai agen pereduksi dan penstabil. Uji antibakteri menunjukkan bahwa AgNP memiliki aktivitas sedang terhadap *E. coli* dan *S. aureus*, serta meningkat menjadi kategori kuat pada konsentrasi 100  $\mu\text{g}/\text{mL}$  terhadap *S. aureus*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, N., Sharma, S., Singh, V. N., Shamsi, S. F., Fatma, A., & Mehta, B. R. (2010). Biosynthesis of silver nanoparticles from *Desmodium triflorum*: A novel approach towards weed utilization. *Biotechnology Research International*, 2011, 1–8. <https://doi.org/10.4061/2011/454090>
- Ajaykumar, A. P., Mathew, A., Chandni, A. P., Varma, S. R., Jayaraj, K. N., Sabira, O., Rasheed, V. A., Binitha, V. S., Swaminathan, T. R., Basheer, V. S., Giri, S., & Chatterjee, S. (2022). Green synthesis of silver nanoparticles using the leaf extract of the medicinal plant, *Uvaria narum* and its antibacterial, antiangiogenic, anticancer and catalytic properties. *Nanomaterials*, 12(12),2072. <https://doi.org/10.3390/nano12122072>
- Alfryyan, N., Kordy, M. G., Abdel-Gabbar, M., Soliman, H. A., & Shaban, M. (2022). Characterization of the biosynthesized intracellular and extracellular plasmonic silver nanoparticles using *Bacillus cereus* and their catalytic reduction of methylene blue. *Scientific Reports*, 12(1), 12495. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16029-1>
- Ansari, M., Ahmed, S., Abbasi, A., Khan, M. T., Subhan, M., Bukhari, N. A., Hatamleh, A. A., & Abdelsalam, N. R. (2023). Plant mediated fabrication of silver nanoparticles, process optimization, and impact on tomato plant. *Scientific Reports*, 13(1), 18048. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45038-x>.

- Dakal, T. C., Kumar, A., Majumdar, R. S., & Yadav, V. (2016). Mechanistic basis of antimicrobial actions of silver nanoparticles. *Frontiers in microbiology*, 7, 1831. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01831>
- Daskar, A., Utami, P. I., Astuti, I. Y., & Antoni, F. (2022). Formulasi dan karakterisasi nanopartikel ekstrak daun senggani (*Melastoma malabathricum* L.) pada berbagai variasi komposisi kitosan dengan metode gelas ionik. *Journal Pharmacy Aisyah*, 1(2), 46-56.
- Dewi, K. T. A., Kartini, K., Sukweenadhi, J., & Avanti, C. (2019). Karakter fisik dan aktivitas antibakteri nanopartikel perak hasil green synthesis menggunakan ekstrak air daun sendok (*Plantago major* L.). *Pharmaceutical Sciences and Research (PSR)*, 6(2), 69-81. <https://doi.org/10.7454/psr.v6i2.4220>
- Dong, Y., Zhu, H., Shen, Y., Zhang, W., & Zhang, L. (2019). Antibacterial activity of silver nanoparticles of different particle size against *Vibrio Natriegens*. *PloS one*, 14(9), e0222322. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222322>
- Eker, F., Duman, H., Akdaşci, E., Witkowska, A. M., Bechelany, M., & Karav, S. (2024). Silver nanoparticles in therapeutics and beyond: A review of mechanism insights and applications. *Nanomaterials*, 14(20), 1618. <https://doi.org/10.3390/nano14201618>
- Goetie, I. H., Sundu, R., & Supriningrum, R. (2022). Uji aktivitas antibakteri ekstrak kulit batang sekilang (*Embelia borneensis* Scheff) terhadap Bakteri *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus* menggunakan metode disc diffusion. *Jurnal Riset Kefarmasian Indonesia*, 4(2), 144-155. <https://doi.org/10.33759/jrki.v4i2.260>
- Hamidah, M. N., Rianingsih, L., & Romadhon, R. (2019). Aktivitas antibakteri isolat bakteri asam laktat dari peda dengan jenis ikan berbeda terhadap *E. coli* dan *S. aureus*. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Perikanan*, 1(2), 11-21. <https://doi.org/10.14710/jitpi.2019.6742>
- Hasan, W. L., Sari, R., & Hendradi, E. (2024). Green synthesis of antimicrobial silver nanoparticles using green tea extract: The role of concentration and pH. *Jurnal Sains Farmasi & Klinis*, 11(1), 25-31. <https://doi.org/10.25077/jsfk.11.1.25-31.2024>
- Hasheminya, S. M., & Dehghannya, J. (2020). Green synthesis and characterization of copper nanoparticles using *Eryngium caucasicum* trautv aqueous extracts and its antioxidant and antimicrobial properties. *Particulate Science and Technology*, 38(8), 1019-1026. <https://doi.org/10.1080/02726351.2019.1658664>
- Huong, V. T. L., & Nguyen, N. T. (2021). Green synthesis, characterization and antibacterial activity of silver nanoparticles using *Sapindus mukorossi* fruit pericarp extract. *Materials Today: Proceedings*, 42, 88-93. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.015>
- Indah, S. R., Asri, M., Auliah, N., & Ashari, A. T. (2022). Sintesis nanopartikel perak dengan air rebusan daun pegagan (*Centella asiatica* L.) dan uji aktivitas dalam menghambat pertumbuhan bakteri *Pseudomonas aeruginosa* dan *Staphylococcus aureus*. *Majalah Farm. Farmakol*, 26(2), 88-91. <https://doi.org/10.20956/mff.v26i2.19903>
- Intan, K., Diani, A., & Nurul, A. S. R. (2021). Aktivitas antibakteri kayu manis (*Cinnamomum burmanii*) terhadap pertumbuhan *Staphylococcus aureus*. *Jurnal Kesehatan Perintis*, 8(2), 121-127. <https://doi.org/10.33653/jkp.v8i2.679>
- Jackson, T. C., Oloche, J. J., Uwah, T. O., Alozie, M. F., & Emeje, M. O. (2025). Preparation and characterization of *Persea americana* silver nanoparticles. *American Journal of Nano Research and Applications*, 13(3), 47-52. <https://doi.org/10.11648/j.nano.20251303.11>
- Kassem Agha, M., Maatouk, B., Mhanna, R., & El-Dakdouki, M. H. (2024). Catalytic degradation efficacy of silver nanoparticles fabricated using *Actinidia deliciosa* peel extract. *Journal of Nanomaterials*, 2024(1), 8813109. <https://doi.org/10.1155/2024/8813109>
- Ketebu, O., & Gede, E. E. (2020). Green synthesis of silver nanoparticles using mixture of *Gnetum africanum* and *Heinsia crinita* leaf extracts. *International Journal of Academic Engineering Research (IJAER)*, 4(4), 17-23.

- Kumar, I., Gangwar, C., Yaseen, B., Pandey, P. K., Mishra, S. K., & Naik, R. M. (2022). Kinetic and mechanistic studies of the formation of silver nanoparticles by nicotinamide as a reducing agent. *ACS omega*, 7(16), 13778-13788. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00046>
- Liaqat, N., Jahan, N., Anwar, T., & Qureshi, H. (2022). Green synthesized silver nanoparticles: Optimization, characterization, antimicrobial activity, and cytotoxicity study by hemolysis assay. *Frontiers in chemistry*, 10, 952006. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.952006>
- Luthfia, C. D. M., Miswanda, D., Nasution, H. M., & Lubis, M. S. (2024). Sintesis nanopartikel perak menggunakan ekstrak daun bidara *Ziziphus spina-christi* dan uji aktivitas antibakteri terhadap bakteri *Staphylococcus aureus*. *OBAT: Jurnal Riset Ilmu Farmasi dan Kesehatan*, 2(1), 139-149. <https://doi.org/10.61132/obat.v2i1.168>
- Maida, S., & Lestari, K. A. P. (2019). Aktivitas antibakteri amoksisilin terhadap bakteri gram positif dan bakteri gram negatif. *Jurnal Pijar MIPA*, 14(3), 189-191. <https://doi.org/10.29303/jpm.v14i3.1029>
- Mangkay, E. R. J., Setiawan, A. O., & Razi, F. (2023). Green synthesis nanopartikel perak menggunakan bioreduktor ekstrak biji buah bungong jeumpa aceh sebagai antibakteri pada hand sanitizer. *Jurnal Serambi Engineering*, 8(2). <https://doi.org/10.32672/jse.v8i2.5994>
- Masykuroh, A., & Puspasari, H. (2022). Aktivitas anti bakteri nanopartikel perak (npp) hasil biosintesis menggunakan ekstrak keladi sarawak *Alocasia macrorrhizos* terhadap *Staphylococcus aureus* dan *Escherichia coli*. *Bioma: Jurnal Biologi Makassar*, 7(1), 76-85. <https://doi.org/10.20956/bioma.v7i1.19350>
- Mulenos, M. R., Lujan, H., Pitts, L. R., & Sayes, C. M. (2020). Silver nanoparticles agglomerate intracellularly depending on the stabilizing agent: implications for nanomedicine efficacy. *Nanomaterials*, 10(10), 1953. <https://doi.org/10.3390/nano10101953>
- Nguyen, N. P. U., Dang, N. T., Doan, L., & Nguyen, T. T. H. (2023). Synthesis of silver nanoparticles: from conventional to 'modern' methods—a review. *Processes*, 11(9), 2617. <https://doi.org/10.3390/pr11092617>
- Obaid, A. Y., Al-Thabaiti, S. A., Al-Harbi, L. M., & Khan, Z. (2015). Biosynthesis of silver nanoparticles: Study of the effect of plant extract on the growth and stability of silver nanoparticles. *Arabian Journal of Chemistry*, 8(6), 806–814.
- Okka, E. Z., Tongur, T., Aytas, T. T., Yılmaz, M., Topel, Ö., & Sahin, R. (2023). Green Synthesis and the formation kinetics of silver nanoparticles in aqueous *Inula viscosa* extract. *Optik*, 294, 171487. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.171487>
- Oktavia, I. N., & Sutoyo, S. (2021). Review Artikel: Sintesis Nanopartikel Perak Menggunakan Bioreduktor Ekstrak Tumbuhan Sebagai Bahan Antioksidan. *UNESA Journal of Chemistry*, 10(1), 37-54. <https://doi.org/10.26740/ujc.v10n1.p37-54>
- Panjaitan, K., Syamsurizal, S., Maharini, I., Putra, D., & Septiana, P. (2025). Optimasi dan uji antibakteri nanopartikel perak dengan bioreduktor ekstrak batang anggrek merpati (*Dendrobium crumenatum* Sw.). *Sinteza Учену: Universitas Hamzanwadi*, 5(1), 18-31. <https://doi.org/10.29408/sinteza.v5i1.29574>
- Parthiban, E., Manivannan, N., Ramanibai, R., & Mathivanan, N. (2019). Green synthesis of silver-nanoparticles from *Annona reticulata* leaves aqueous extract and its mosquito larvicidal and anti-microbial activity on human pathogens. *Biotechnology Reports*, 21, e00297. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2018.e00297>
- Priya, S., & Santhi, S. (2015). Biosynthesis and in vitro anthelmintic activity of silver nanoparticles using aqueous leaf extracts of *Azadirachta indica*. *World J. Pharm. Pharm. Sci*, 4, 2105-2115.
- Putri, B., Wulandari, A. N., Putri, D. A., Mawarni, I., Laksono, B. A., Nurjanah, N. S., Jaya, I. I. K., Perdana, D. A., Syam, D. N., & Putri, W. A. (2024). Pengujian zona inhibisi difusi cakram ekstrak rumput laut merah (*Eucheuma cottonii*) sebagai antibakteri terhadap *Streptococcus mutans*. *Journal of Aquatropica Asia*, 9(2), 69-76. <https://doi.org/10.33019/joaa.v9i2.5982>

- Rais, I. R. (2015). Isolasi dan penentuan kadar flavonoid ekstrak etanolik herba sambiloto (*Andrographis paniculata* (burm. F.) Ness). *Pharmaciana*, 5(1). <https://doi.org/10.12928/pharmaciana.v5i1.2292>
- Retnaningtyas, Y., Dewi, N. P., Kristiningrum, N., & Kuswandi, B. (2025). Antioxidant activity and h 2 o 2 sensing ability of silver nanoparticles synthesized using *Solanum melongena* L. peel extract. *Tropical Journal of Natural Product Research*, 9(6). <https://doi.org/10.26538/tjnpr/v9i6.34>
- Rodrigues, A. S., Batista, J. G., Rodrigues, M. Á., Thipe, V. C., Minarini, L. A., Lopes, P. S., & Lugão, A. B. (2024). Advances in silver nanoparticles: a comprehensive review on their potential as antimicrobial agents and their mechanisms of action elucidated by proteomics. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1440065. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1440065>
- Sasikala, A., Linga Rao, M., Savithamma, N., & Prasad, T. N. V. K. V. (2014). Synthesis of silver nanoparticles from stem bark of *Cochlospermum religiosum* (L.) Alston and their characterization. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 6(3), 342–347. <https://doi.org/10.1007/s13204-014-0380-8>
- Sharma, V., Verma, D., & Okram, G. S. (2020). Influence of surfactant, particle size and dispersion medium on surface plasmon resonance of silver nanoparticles. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 32(14), 145302. <https://doi.org/10.1088/1361-648x/ab601a>
- Simanjuntak, H. A., Simanjuntak, H., Maimunah, S., Rahmiati, R., & Situmorang, T. S. (2022). Diameter zona hambat antibiotik amoxicillin dan tetracycline terhadap *Escherichia coli*. *Herbal Medicine Journal*, 5(2), 55-59. <https://doi.org/10.58996/hmj.v5i2.52>
- Susmayanti, W., & Rahmadani, A. (2023). Uji aktivitas antioksidan fraksi daun melinjo (*Gnetum gnemon* L.) menggunakan metode CUPRAC (cupric ion reducing antioxidant capacity): Antioxidant activity of fraction from *Gnetum gnemon* L. leaves using CUPRAC (cupric ion reducing antioxidant capacity) methods. *Indonesian Journal of Pharmacy and Natural Product*, 6(01), 97-106. <https://doi.org/10.35473/ijpnp.v6i01.2178>
- Tanamal, M. T., Papilaya, P. M., & Smith, A. (2017). Kandungan senyawa flavonoid pada daun melinjo (*Gnetum gnemon* L.) berdasarkan perbedaan tempat tumbuh. *BIOPENDIX: Jurnal Biologi, Pendidikan Dan Terapan*, 3(2), 142-147. <https://doi.org/10.30598/biopendixvol3issue2page142-147>
- Vasconcelos, A. L., Santos, A. V., Padilha, R. J., Alves, L. C., & Randau, K. P. (2017). Anatomical characterization of ultra-structures, biominerals and histolocalization of metabolites in leaves of *Genipa americana*. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 27(5), 541-548.
- Veerasingh, R., Xin, T. Z., Gunasagaran, S., Xiang, T. F. W., Yang, E. F. C., Jeyakumar, N., & Dhanaraj, S. A. (2011). Biosynthesis of silver nanoparticles using mangosteen leaf extract and evaluation of their antimicrobial activities. *Journal of Saudi Chemical Society*, 15(2), 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2010.06.004>
- Wahab, S., Khan, T., Adil, M., & Khan, A. (2021). Mechanistic aspects of plant-based silver nanoparticles against multi-drug resistant bacteria. *Heliyon*, 7(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07448>
- Zuhrotun, A., Oktaviani, D. J., & Hasanah, A. N. (2023). Biosynthesis of gold and silver nanoparticles using phytochemical compounds. *Molecules*, 28(7), 3240. <https://doi.org/10.3390/molecules28073240>