

Sintesis Cepat Nanopartikel Perak dengan Irradiasi Gelombang Mikro dan Aplikasinya sebagai Antibakteri pada Kain Katun

Ahmad Dzulfiqar, Mohammad Alauhdin*, Arsenius Olfa Herlistyawan

Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang, Semarang, Indonesia

Corresponding Author:
Mohammad Alauhdin
m.alauhdin@mail.unnes.ac.id

Received: July 2022
Accepted: September 2022
Published: September 2022

©Mohammad Alauhdin et al.
This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Abstract

Silver nanoparticles (AgNPs) are silver metal particles with nanoscale size. In the scale, they generate different properties compared to the original particle or material. AgNPs can be synthesized in several ways, one of which is through chemical reduction. This method is accelerated by heating, usually using conventional heating. However, the heating takes time, so it is less effective for application. In this study, AgNPs were synthesized by chemical reduction with sodium citrate as a reducing agent accompanied by microwave irradiation to speed up the synthesis process. The resulting AgNPs were then applied to cotton fabric as an antibacterial agent. The reaction lasted for 6 minutes, much faster than using conventional heating. The synthesized particles have an average size of 56.2 nm and are stable for up to 41 days of storage. The AgNPs then can be applied to cotton fabric and inhibit the growth of *S. aureus* and *P. aeruginosa* bacteria with a Minimum Inhibitory Concentration of 70%.

Keywords: *Silver nanoparticles; microwave; antibacterial; cotton fabric.*

Pendahuluan

Nanopartikel perak (NPP) telah banyak dikembangkan dan diaplikasikan untuk berbagai keperluan, misalnya untuk pembuatan sensor^{[1]-[4]}, sebagai antimikroba^{[5]-[7]}, katalis^[8], dan lain-lain. NPP ini dapat disintesis melalui beberapa cara, salah satunya adalah dengan metode reduksi kimia. Metode reduksi ini relatif sederhana, mudah, dan efektif untuk menghasilkan NPP. Pada metode ini, suatu agen pereduksi diperlukan untuk mereduksi Ag^+ menjadi Ag^0 . Proses ini dipercepat dengan pemanasan, biasanya dengan pemanasan secara konvensional. Namun, pemanasan konvensional ini membutuhkan waktu yang lama^[5]. Meskipun, ini juga dipengaruhi oleh jenis reduktor yang digunakan.

Salah satu cara yang dapat meningkatkan laju reaksi reduksi pada sintesis NPP adalah dengan menggunakan irradiasi gelombang mikro (*microwave*)^{[6],[9]}. Irradiasi ini bekerja dengan melewati radiasi gelombang mikro pada molekul air yang akan menyerap energi elektromagnetik sehingga terjadi pemanasan dielektrik^[10]. Irradiasi gelombang mikro dapat menghasilkan pemanasan yang homogen, sehingga berpengaruh secara langsung pada proses nukleasi pada saat sintesis NPP^[11]. Membandingkan secara langsung antara kedua metode pemanasan, konvensional dan dengan irradiasi gelombang mikro, akan memberikan informasi tentang efektivitas waktu sintesis nanopartikel perak diantara kedua metode tersebut.

NPP telah diketahui mempunyai sifat antibakteri^{[5],[6],[12],[13]}. NPP ini dapat menempel pada dinding sel sehingga mengganggu permeabilitas dinding sel dan respirasi sel. Nanopartikel ini juga dapat berpenetrasi ke dalam sel dan menyebabkan kerusakan sel melalui interaksi dengan senyawa-senyawa yang mengandung fosfor atau sulfur, seperti DNA dan protein. Sifat antibakteri NPP dapat juga disebabkan karena penempelan ion perak yang dilepaskan dari NPP pada dinding sel^{[14],[15]}.

NPP sebagai antibakteri telah diaplikasikan pada berbagai media, diantaranya kain^[16] dan plastik dalam beragam bentuk, seperti kateter, implan, penutup luka bakar, atau peralatan medis^[5]. Penggunaan NPP sebagai antibakteri ini dapat pula menjadi alternatif solusi terhadap resistensi antibiotik^[17], misalnya akibat pemakaian yang tidak sesuai aturan.

Aplikasi nanopartikel pada kain dapat dilakukan dengan cara perendaman, pelapisan, penyemprotan, atau dengan teknik busa^[18]. Untuk meningkatkan ketahanan (*durability*) nanopartikel yang menempel di kain, beberapa cara dapat dilakukan, misalnya dengan penambahan resin atau binder akrilik, penggunaan zat pengikat silang (*crosslinker*), mikroenkapsulasi, atau dengan grafting polimer^{[19],[20]}.

Artikel ini akan membahas pengaruh irradiasi gelombang mikro dan konsentrasi AgNO₃ pada sintesis NPP secara reduksi kimia. Karakterisasi terhadap nanopartikel perak yang dihasilkan dilakukan dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis dan *Particle Size Analyzer* (PSA). NPP yang diperoleh selanjutnya diaplikasikan pada kain katun dan dianalisis aktivitas antibakterinya terhadap bakteri *Staphylococcus aureus* dan *Pseudomonas aeruginosa*.

Metodologi Penelitian

Bahan Kimia

Bahan yang digunakan adalah grade pereaksi analitis tanpa pemurnian ulang, diantaranya

perak nitrat (for analysis, Merck), tri-natrium sitrat dihidrat (for analysis, Merck), binder poliakrilik 2% (Indo Warna), *Nutrient Broth* (for microbiology, Merck), suspensi bakteri *Staphylococcus aureus* dan *Pseudomonas aeruginosa* (Laboratorium Mikrobiologi, Fakultas Kedokteran, Universitas Diponegoro), akua demineralisasi, serta akuades.

Peralatan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini yaitu *Microwave* (Sharp R-728), spektrofotometer UV-Vis (BMG-Lab-Tech-Fluorostar Omega), *Particle Size Analyzer* (Horiba Scientific nano partica SZ-100), SEM-EDX (JEOL JSM-6510LA), inkubator, oven (Memmert), hot plate, dan autoklaf.

Prosedur penelitian

Sintesis NPP

Sintesis NPP dilakukan dengan mereaksikan larutan AgNO₃ dengan larutan natrium sitrat 1% tetes demi tetes. Campuran kemudian dipanaskan dengan atau tanpa irradiasi gelombang mikro. Untuk mengetahui pengaruh konsentrasi prekursor, konsentrasi AgNO₃ divariasikan, yaitu 0,1 mM; 0,5 mM; dan 1 mM. Pemanasan konvensional dilakukan menggunakan hotplate pada suhu 80°C disertai pengadukan selama 2 jam. Sementara itu, pemanasan dengan gelombang mikro dilakukan pada daya 270 W, 360 W, dan 450 W serta waktu irradiasi antara 1 – 8 menit.

NPP yang dihasilkan berupa nanokoloid. Secara visual, terbentuknya NPP ditandai dengan perubahan warna campuran reaksi dari tak berwarna menjadi berwarna kuning pucat hingga kecoklatan. Selanjutnya, terbentuknya NPP dikonfirmasi dengan spektrofotometer UV-Vis, yaitu dengan adanya absorbansi khas NPP pada kisaran panjang gelombang 410 – 430 nm^[21]. Karakterisasi dengan PSA juga dilakukan untuk mengetahui ukuran, distribusi ukuran, dan zeta potensial NPP yang terbentuk. Uji kestabilan dilakukan dengan mengamati perubahan pita serapan NPP melalui Spektrofotometer UV-Vis selama 41 hari sejak disintesis.

Pelapisan NPP pada Kain

Kain katun steril dengan ukuran 1x1 cm dicelupkan ke dalam campuran NPP dan 5% binder akrilik selama 10 menit. Untuk keperluan pengujian aktivitas antibakteri, konsentrasi NPP divariasikan 100%, 70%, 50%, 30% dan 10% (%v/v). Setelah pencelupan, kain diangkat dan dikeringkan pada 90°C selama 10 menit. Pencelupan dilakukan berulang sebanyak 3x. Kain yang telah dilapisi NPP dikarakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX).

Uji Aktivitas Antibakteri

Sampel yang diuji adalah kain katun tanpa dilapisi NPP dan kain katun yang dilapisi NPP serta NPP tanpa kain (dalam bentuk nanokoloid). Sampel dimasukkan ke dalam tabung reaksi, kemudian ditambahkan 0.8 mL akuades steril dan dikocok selama 10 menit. Setelah itu, *Nutrient Broth* (NB) ditambahkan sebanyak 2.2 mL sebagai media pertumbuhan bakteri sehingga volume total campuran menjadi 3 mL. Suspensi bakteri 10⁸ CFU/mL ditambahkan pada campuran tersebut sebanyak 10 µL, lalu campuran diinkubasi selama 24 jam pada temperatur 37°C.

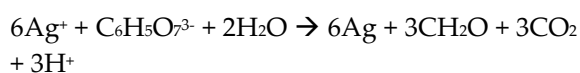
Tingkat pertumbuhan bakteri diukur sebagai *optical density* (OD) pada panjang gelombang 600 nm menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Aktivitas antibakteri dinyatakan dengan Konsentrasi Hambat Minimum (KHM) yang diperoleh dari konsentrasi NPP terkecil yang memberikan selisih nilai OD setelah inkubasi dan nilai OD sebelum inkubasi kurang atau sama dengan nol ($\Delta OD \leq 0$).

Hasil dan Diskusi

Sintesis dan Karakterisasi NPP

Sintesis NPP dilakukan dengan mereaksikan AgNO₃ dan natrium sitrat dengan perbandingan tertentu. AgNO₃ berperan sebagai prekursor perak sedangkan natrium sitrat berperan sebagai reduktor untuk mereduksi Ag⁺ menjadi Ag⁰ sehingga menghasilkan NPP. Natrium sitrat juga dapat berperan sebagai stabilisator untuk mencegah agregasi dari NPP yang telah terbentuk^{[14],[22]}.

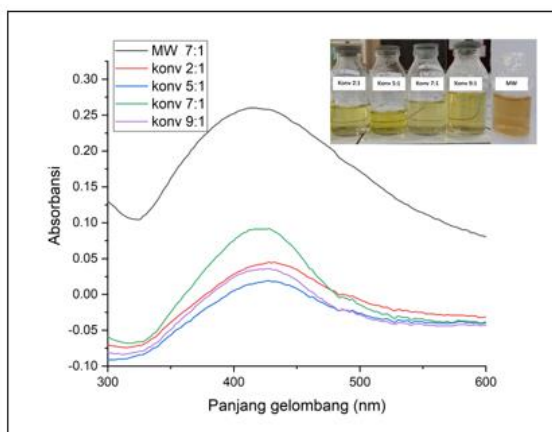
Reaksi kimia yang terjadi adalah seperti berikut:



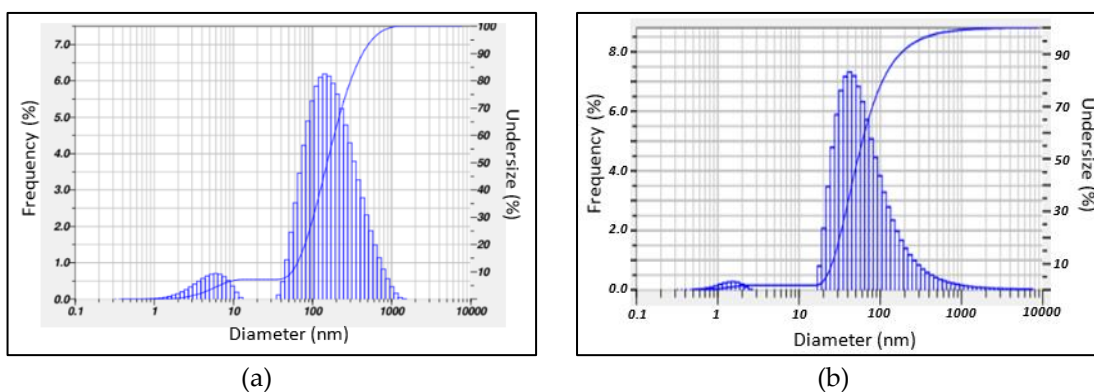
Indikasi terbentuknya NPP secara visual dapat dilihat dengan perubahan warna, yaitu dari tidak berwarna menjadi kuning pucat hingga kecoklatan. Warna ini merupakan ciri khas nanokoloid NPP yang timbul karena fenomena *surface plasmon resonance* (SPR) dalam NPP^[23]. Selain secara visual, terbentuknya NPP dapat dikonfirmasi dari spektrum UV-Vis, yaitu munculnya absorbansi maksimum pada panjang gelombang di sekitar 410-430 nm (Gambar 1), yang merupakan pita serapan SPR dari NPP^{[16],[21],[24]-[26]}. Proses reduksi oleh natrium sitrat dipercepat dengan pemanasan. Dua cara pemanasan dilakukan, yaitu pemanasan secara konvensional dan pemanasan dengan iradiasi gelombang mikro.

Gambar 1 juga menunjukkan bahwa dengan perbandingan reduktor dan prekursor Ag⁺ yang sama (1:7), sintesis dengan iradiasi gelombang mikro menghasilkan absorbansi yang jauh lebih tinggi daripada menggunakan pemanasan konvensional. Artinya, sintesis dengan bantuan gelombang mikro menghasilkan lebih banyak NPP daripada dengan pemanasan konvensional. Absorbansi tersebut diperoleh pada panjang gelombang 414 nm yang merupakan panjang gelombang khas untuk NPP. Pada pemanasan konvensional, absorbansi tertinggi secara umum muncul pada panjang gelombang yang lebih tinggi (426-432 nm), ini mengindikasikan ukuran partikel yang lebih besar. Perbedaan ukuran partikel hasil sintesis dengan dua metode ini juga dikonfirmasi dari hasil analisis PSA (Gambar 2).

Hasil analisis PSA menunjukkan, NPP yang dihasilkan melalui pemanasan konvensional memiliki ukuran rata-rata 128 nm dengan indeks polidispersitas (PI) 0.420 (Gambar 2a). Sementara itu, NPP hasil sintesis dengan bantuan gelombang mikro berukuran 56.2 nm dengan PI sebesar 0.470 (Gambar 2b).



Gambar 1. Spektra sinar tampak nanopartikel perak hasil sintesis dengan pemanasan konvensional (konv) dan gelombang mikro (MW). Sintesis dilakukan dengan AgNO_3 1 mM dan natrium sitrat 1%.



Gambar 2. Distribusi ukuran nanopartikel perak hasil sintesis dengan a) pemanasan konvensional dan b) irradiasi gelombang mikro

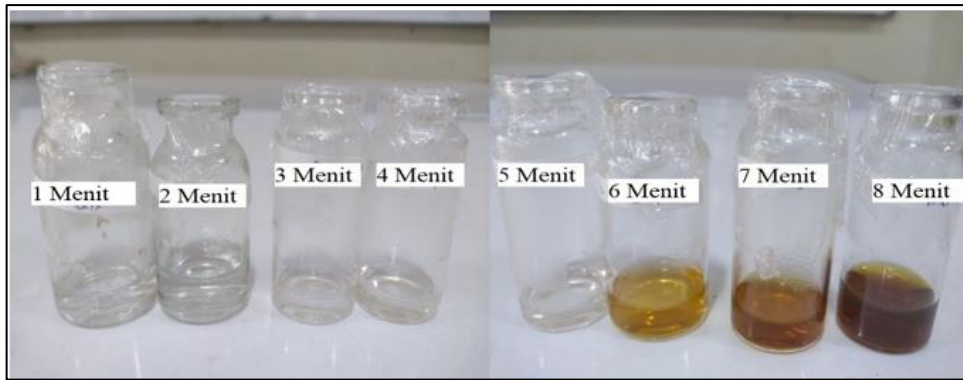
Nilai PI yang kurang dari 0.500 menunjukkan ukuran partikel yang seragam^[27]. Ukuran partikel ini merupakan salah satu parameter penting pada NPP karena akan mempengaruhi karakteristiknya, termasuk aktivitas antibakterinya.

Selain menghasilkan absorbansi yang lebih tinggi, waktu sintesis NPP dengan bantuan gelombang mikro juga berlangsung lebih cepat, yaitu hanya selama 6 menit, dibandingkan dengan pemanasan konvensional yang membutuhkan waktu sampai 60 menit bahkan lebih^{[1],[5]}. Proses yang cepat ini dapat dilihat secara visual pada hasil reaksi yang terjadi dari menit awal pencampuran sampai 8 menit berikutnya (Gambar 3). Pengaruh irradiasi gelombang mikro pada laju reaksi kimia sampai saat ini belum diketahui dengan jelas.

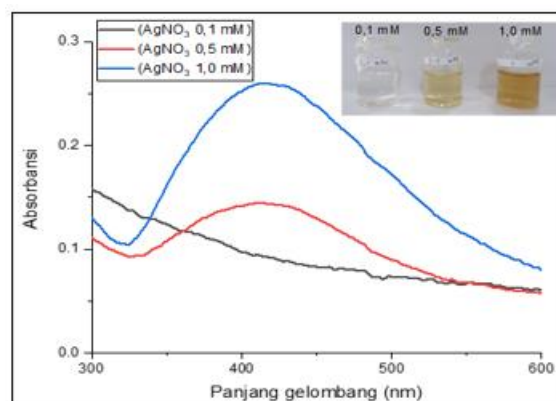
Ada beberapa pendapat yang mencoba menjelaskannya. Pertama, penggunaan gelombang mikro dapat memberikan efek katalitik, yaitu menurunkan energi aktivasi^{[9],[28]} sehingga reaksi lebih mudah terjadi. Kedua, laju reaksi dapat meningkat karena adanya efek kenaikan panas yang cepat pada media reaksi sebagai akibat dari radiasi gelombang mikro. Ketiga, adanya efek non termal yang disebabkan oleh interaksi antara gelombang mikro dengan molekul-molekul reaktan^{[29],[30]}.

Pengaruh konsentrasi prekursor dan daya gelombang mikro

Konsentrasi prekursor Ag^+ tentunya akan berpengaruh terhadap jumlah dan karakteristik NPP yang dihasilkan.



Gambar 3. Perubahan warna dalam sintesis NPP pada menit ke-1 hingga ke-8.

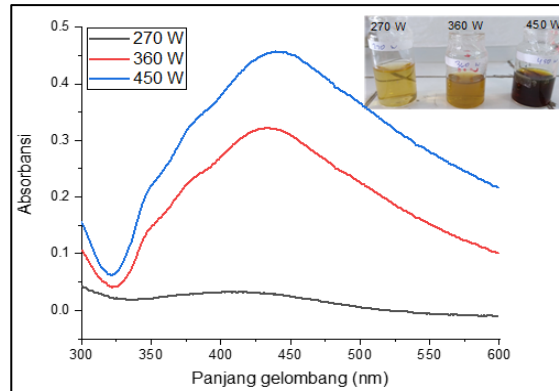


Gambar 4. Spektra sinar tampak NPP hasil sintesis dengan variasi konsentrasi AgNO_3 . Inset: foto nanokoloid hasil sintesis.

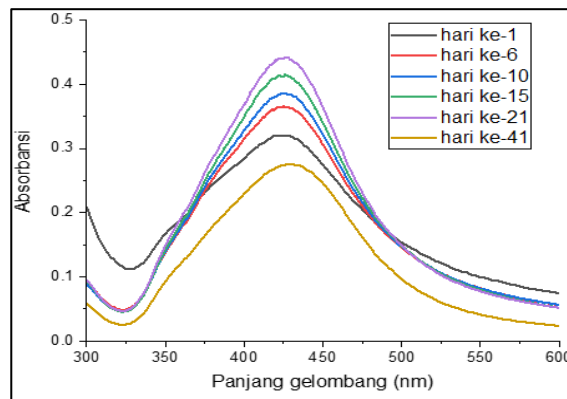
Gambar 4 menunjukkan bahwa absorbansi mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan konsentrasi AgNO_3 . Absorbansi yang semakin tinggi mengindikasikan semakin banyak NPP yang terbentuk^[31]. Semakin tinggi konsentrasi AgNO_3 maka semakin banyak Ag^+ yang dapat direduksi oleh natrium sitrat menjadi Ag^0 dan proses reduksi juga akan semakin cepat. Pada konsentrasi tinggi, jumlah ion Ag^+ dalam larutan semakin banyak sehingga reduktor dapat lebih mudah bereaksi dengan Ag^+ ^[32]. Pada rentang konsentrasi yang dianalisis, konsentrasi AgNO_3 1 mM merupakan konsentrasi optimum yang dapat menghasilkan lebih banyak NPP.

Gambar 5 menunjukkan spektra sinar tampak dari NPP yang disintesis pada kondisi daya gelombang mikro yang berbeda. Pada daya 270 W, energi gelombang mikro tidak cukup untuk mendorong berlangsungnya reduksi Ag^+ . Akibatnya, reduksi berjalan sangat lambat,

hanya sebagian kecil Ag^+ yang tereduksi. Ini ditunjukkan dengan serapan yang lemah di sekitar panjang gelombang 410 nm. Pada daya yang lebih tinggi, 360 W dan 450 W, puncak khas NPP terlihat jelas. Artinya, NPP sudah terbentuk. Daya gelombang mikro yang tinggi menghasilkan energi panas yang akan mendorong tumbukan antar reaktan sehingga reaksi dapat berjalan lebih cepat. Namun demikian, pada 450 W, puncak serapan terlihat melebar yang mengindikasikan distribusi ukuran partikel yang semakin tidak seragam. Semakin tinggi daya gelombang mikro akan menghasilkan energi panas yang tinggi pula. Energi panas yang berlebih dapat mengakibatkan tumbukan antar partikel yang lebih hebat, termasuk antar NPP yang telah terbentuk sehingga cenderung terjadi aglomerasi. NPP yang mengalami aglomerasi akan memiliki ukuran partikel yang lebih besar^[14].



Gambar 5. Spektra sinar tampak NPP hasil sintesis dengan variasi daya gelombang mikro. Inset: foto nanokoloid hasil sintesis.



Gambar 6. Spektra sinar tampak NPP dalam pengukuran kestabilan selama 41 hari menunjukkan pita serapan SPR relatif stabil (424-428 nm).

Untuk mengetahui kestabilan NPP yang terbentuk, koloid NPP hasil sintesis disimpan dan diamati pita serapan SPR-nya selama waktu tertentu. Gambar 6 menunjukkan spektra sinar tampak pada pengamatan kestabilan NPP sampai 41 hari. Posisi panjang gelombang maksimum NPP selama masa penyimpanan berkisar dari 424 sampai 428 nm. Adanya pergeseran posisi panjang gelombang maksimum mengindikasikan terjadinya perubahan ukuran partikel. Perubahan ukuran partikel tersebut disebabkan oleh aglomerasi atau ukuran partikel menjadi lebih besar yang ditandai dengan pergeseran pita serapan SPR ke arah panjang gelombang yang lebih tinggi (*red shift*)^[33]. Namun demikian, pergeseran yang terjadi tidak signifikan. Artinya, ukuran partikel koloid NPP relatif konstan selama penyimpanan. Hal ini menunjukkan bahwa natrium sitrat dapat berperan sebagai penstabil

dengan baik. Ion sitrat pada permukaan nanopartikel akan menyebabkan permukaan partikel cenderung bermuatan negatif. Hal ini kemudian menimbulkan gaya tolak menolak antar partikel dan mencegah terjadinya aglomerasi^[14].

Gambar 6 juga menunjukkan bahwa absorbansi mengalami peningkatan sejak hari pertama sampai hari ke-21, lalu mengalami penurunan setelah 41 hari. Peningkatan absorbansi diperkirakan akibat masih terjadi proses reduksi dari Ag^+ sisa dan membentuk NPP^[34].

Stabilitas NPP juga dievaluasi dari nilai zeta potensialnya, berdasarkan data dari PSA. Zeta potensial NPP hasil sintesis adalah sebesar -1,8 mV. Nilai ini masih jauh dari nilai zeta potensial tinggi yang seringkali dikaitkan dengan kestabilan sistem dispersi^[35]. Kestabilan

nanopartikel dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti ukuran, distribusi, dan morfologi partikel^[36], zeta potensial hanya salah satu parameter yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kestabilan suatu sistem koloid.

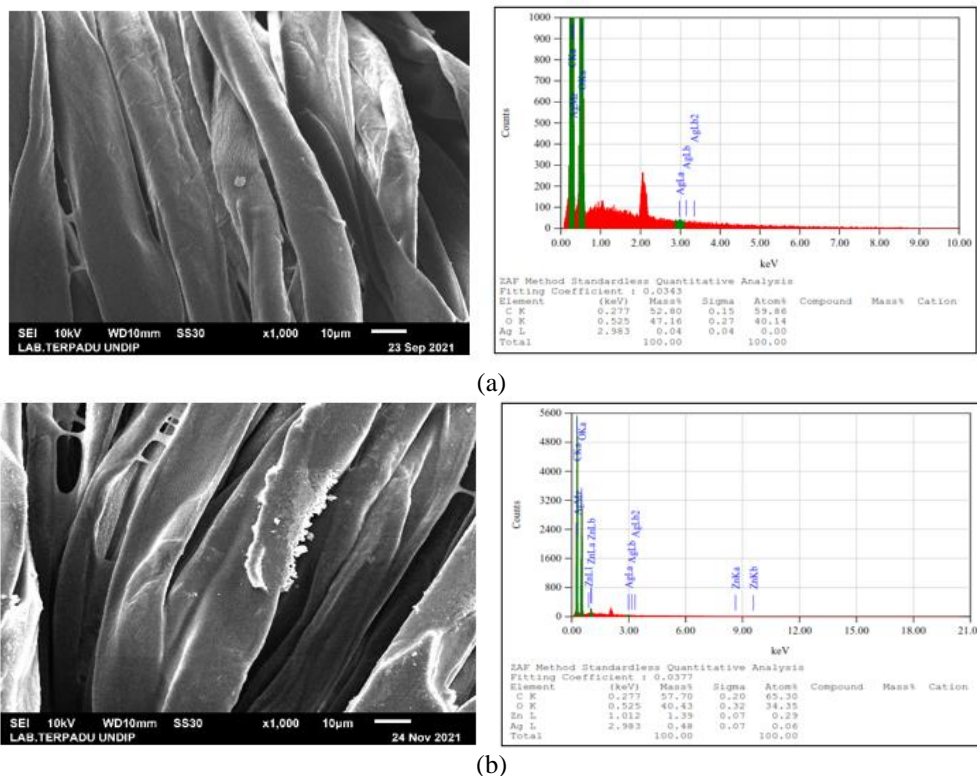
Uji aktivitas antibakteri

NPP hasil sintesis diaplikasikan sebagai pelapis antibakteri pada kain katun yang dapat digunakan untuk melindungi luka atau keperluan medis lainnya. Koloid NPP dilapiskan pada kain katun dengan bantuan binder akrilik untuk meningkatkan daya rekat. Binder akrilik merupakan rantai panjang makromolekul yang dapat menciptakan jaringan tiga dimensi dengan kain sehingga dapat mencegah nanopartikel terlepas dari kain^[37]. Kain katun yang telah dilapisi NPP diamati dengan SEM-EDX untuk melihat morfologi dan keberadaan NPP pada kain (Gambar 7).

Persentase NPP yang menempel pada kain dipengaruhi oleh proses pencelupan kain pada

koloid NPP. Berdasarkan hasil EDX, persentase NPP yang menempel pada kain dengan 3x pencelupan adalah 0.45%, sedangkan untuk 1x pencelupan sebesar 0.04% (Gambar 7b dan 7c). Meskipun, persentase ini tidak menggambarkan kondisi permukaan kain secara umum terutama jika NPP menempel secara tidak merata pada kain. Selain itu, jangkauan SEM-EDX hanya pada sebagian kecil permukaan kain saja. Kain yang telah terlapisi NPP ini selanjutnya diuji aktivitas antibakterinya terhadap *S. aureus* dan *P. Aeruginosa*.

Pertumbuhan bakteri diamati dengan mengukur *optical density* (OD) pada 600 nm. Pengukuran OD ini berdasarkan kecenderungan suspensi bakteri untuk menyebarkan cahaya daripada menyerapnya^[38]. Pertumbuhan sel bakteri akan meningkatkan kekeruhan media kultur cair sehingga absorbansi meningkat^[39].



Gambar 7. Foto SEM dan data EDX kain terlapisi NPP a) dengan 1x pencelupan dan b) dengan 3x pencelupan. Perbesaran foto SEM adalah 1000x, skala bar 10 μ m.

Tabel 1. Hasil uji aktivitas antibakteri kain terlapisi NPP terhadap pertumbuhan *S. aureus* dan *P. aeruginosa* dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis

Sampel	Nilai ΔOD^*	
	<i>S. aureus</i>	<i>P. aeruginosa</i>
Kain tanpa terlapisi NPP	0,146	0,167
Kain dengan NPP 10%	0,081	0,125
Kain dengan NPP 30%	0,142	0,057
Kain dengan NPP 50%	0,025	0,017
Kain dengan NPP 70%	-0,019	-0,040
Kain dengan NPP 100%	0,004	-0,029
nanokoloid NPP 100%	-0,038	-0,038
Kontrol + (Suspensi Bakteri)	0,024	0,053
Kontrol – (NB)	0,275	

*data merupakan rata-rata dari 2x pengukuran

ΔOD dapat bernilai positif atau negatif. Nilai positif menunjukkan pertumbuhan bakteri masih terjadi sedangkan nilai negatif menunjukkan pertumbuhan bakteri telah dihambat. Konsentrasi hambat minimum (KHM) ditentukan dengan melihat konsentrasi NPP terkecil yang memberikan nilai ΔOD negatif^[40]. Berdasarkan pengujian, nilai ΔOD negatif diperoleh dari nanokoloid NPP dan kain yang terlapisi NPP dengan konsentrasi 70% dan 100% (Tabel 1). Dengan demikian, KHM untuk kain yang terlapisi NPP adalah 70%. Artinya, kain dapat memberikan sifat antibakteri jika telah dilapisi oleh NPP dengan konsentrasi 70%.

Untuk bakteri *S. aureus*, ΔOD pada kain dengan NPP 100% bernilai positif. Ini dapat disebabkan karena pada saat pengukuran, selain penyerapan cahaya oleh larutan uji, terjadi juga penyerapan cahaya oleh sel bakteri yang telah mati^[41]. Hal ini dapat pula diakibatkan karena faktor kelemahan spektrofotometri UV-Vis dalam selektivitas untuk membedakan sampel dengan partikel-partikel lain atau kontaminan yang menyerap cahaya dalam panjang gelombang yang sama^[40]. Peningkatan nilai ΔOD juga terjadi pada kontrol negatif yang terindikasi NB terkontaminasi bakteri sehingga menunjukkan nilai ΔOD yang positif.

Kesimpulan

Irradiasi gelombang mikro dapat mempercepat sintesis NPP melalui proses reduksi kimia. NPP yang dihasilkan mempunyai pita serapan SPR pada panjang gelombang 414 nm, ukuran rata-rata partikel 56,2 nm, dan relatif stabil hingga 41 hari. Aplikasi NPP pada kain katun dapat memberikan efek antibakteri pada kain dengan nilai konsentrasi hambat minimum 70% terhadap pertumbuhan *S. aureus* dan *P. aeruginosa*.

Daftar Pustaka

1. Avissa, M. & Alauhdin, M., Selective Colorimetric Detection of Mercury(II) using Silver Nanoparticles-Chitosan. *Molekul*, **17(1)**: 107–115 (2022).
2. Shrivastava, K., Sahu, B., Deb, M. K., Thakur, S. S., Sahu, S., Kurrey, R., Kant, T., et al., Colorimetric and paper-based detection of lead using PVA capped silver nanoparticles: Experimental and theoretical approach. *Microchem. J.*, **150**: 104156 (2019).
3. Balasuraya, S., Syed, A., Thomas, A. M., Marraiki, N., Elgorban, A. M., Raju, L. L., Das, A., et al., Rapid colorimetric detection of mercury using silver nanoparticles in the presence of methionine. *Spectrochim. Acta*

- Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, **228**: 117712 (2020).
- Taufiq, M., Eden, W. T., Sumarni, W. & Alauhdin, M., Colorimetric detection of metal ions using green-synthesized silver nanoparticles. *J. Phys. Conf. Ser.*, **1918**: 1–6 (2021).
 - Wei, D., Sun, W., Qian, W., Ye, Y. & Ma, X., The synthesis of chitosan-based silver nanoparticles and their antibacterial activity. *Carbohydr. Res.*, **344(17)**: 2375–2382 (2009).
 - Fatimah, I., Green synthesis of silver nanoparticles using extract of *Parkia speciosa* Hassk pods assisted by microwave irradiation. *J. Adv. Res.*, **7(6)**: 961–969 (2016).
 - Jian, Y., Chen, X., Ahmed, T., Shang, Q., Zhang, S., Ma, Z. & Yin, Y., Toxicity and action mechanisms of silver nanoparticles against the mycotoxin-producing fungus *Fusarium graminearum*. *J. Adv. Res.*, **38**: 1–12 (2022).
 - Saha, J., Begum, A., Mukherjee, A. & Kumar, S., A novel green synthesis of silver nanoparticles and their catalytic action in reduction of Methylene Blue dye. *Sustain. Environ. Res.*, **27(5)**: 245–250 (2017).
 - Zhou, J., Xu, W., You, Z., Wang, Z., Luo, Y., Gao, L., Yin, C., *et al.*, A new type of power energy for accelerating chemical reactions: the nature of a microwave-driving force for accelerating chemical reactions. *Sci. Rep.*, **6(1)**: 25149 (2016).
 - Lew, A., Krutzik, P. O., Hart, M. E. & Chamberlin, A. R., Increasing Rates of Reaction: Microwave-Assisted Organic Synthesis for Combinatorial Chemistry. *J. Comb. Chem.*, **4(2)**: 95–105 (2002).
 - Punuri, J. B., Sharma, P., Sibyala, S., Tamuli, R. & Bora, U., Piper betle-mediated green synthesis of biocompatible gold nanoparticles. *Int. Nano Lett.*, **2(18)**: 1–9 (2012).
 - Aadil, K. R., Pandey, N., Mussatto, S. I. & Jha, H., Green synthesis of silver nanoparticles using acacia lignin, their cytotoxicity, catalytic, metal ion sensing capability and antibacterial activity. *J. Environ. Chem. Eng.*, **7(5)**: 103296 (2019).
 - Mlalila, N. G., Swai, H. S., Hilonga, A. & Kadam, D. M., Antimicrobial dependence of silver nanoparticles on surface plasmon resonance bands against *Escherichia coli*. *Nanotechnol. Sci. Appl.*, **10**: 1–9 (2017).
 - Ariyanta, H. A., Preparasi Nanopartikel Perak dengan Metode Reduksi dan Aplikasinya sebagai Antibakteri Penyebab Luka Infeksi. *J. Mkmn*, 36–42 (2014).
 - Sambhy, V., MacBride, M. M., Peterson, B. R. & Sen, A., Silver Bromide Nanoparticle/Polymer Composites: Dual Action Tunable Antimicrobial Materials. *J. Am. Chem. Soc.*, **128(30)**: 9798–9808 (2006).
 - Balamurugan, M., Saravanan, S. & Soga, T., Coating of green-synthesized silver nanoparticles on cotton fabric. *J. Coatings Technol. Res.*, **14(3)**: 735–745 (2017).
 - Franci, G., Falanga, A., Galdiero, S., Palomba, L., Rai, M., Morelli, G. & Galdiero, M., Silver nanoparticles as potential antibacterial agents. *Molecules*, **20(5)**: 8856–8874 (2015).
 - Novarini, E. & Wahyudi, T., Synthesis of Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticles using Surfactant as a Stabilizing Agent and Its Application in Antibacterial Textiles Fabrication. *Arena Tekst.*, **26(2)**: 81–87 (2011).
 - Haji, A., Barani, H. & Qavamnia, S. S., In situ synthesis of silver nanoparticles onto cotton fibers modified with plasma treatment and acrylic acid grafting. *Micro Nano Lett.*, **8(6)**: 315–318 (2013).
 - Ramachandran, T., Kumar, R. & Rajendran, R., Antimicrobial textiles - An overview. *J. Inst. Eng. (India), Part TX Text. Eng. Div.*, **84(2)**: 42–47 (2004).
 - Caro, C., Castillo, P. M., Klippstein, R., Pozo, D. & Zaderenko, A. P., in *Silver Nanoparticles*, (ed. Perez, D. P.) IntechOpen, (2010). doi:<https://doi.org/10.5772/8513>
 - Paramelle, D., Sadovoy, A., Gorelik, S., Free, P., Hopley, J. & Fernig, D. G., A rapid method to estimate the concentration of citrate capped silver nanoparticles from UV-visible light spectra. *Analyst*, **139(19)**: 4855–4861 (2014).
 - Geethalakshmi, R. & Sarada, D. V. L., Gold and silver nanoparticles from *Trianthema decandra*: Synthesis, characterization, and

- antimicrobial properties. *Int. J. Nanomedicine*, **7**: 5375–5384 (2012).
24. Yang, X., Yu, Y. & Gao, Z., A Highly Sensitive Plasmonic DNA Assay Based on Triangular Silver Nanoprism Etching. *ACS Nano*, **8(5)**: 4902–4907 (2014).
 25. Gao, C., Lu, Z., Liu, Y., Zhang, Q., Chi, M., Cheng, Q. & Yin, Y., Highly Stable Silver Nanoplates for Surface Plasmon Resonance Biosensing. *Angew. Chemie Int. Ed.*, **51(23)**: 5629–5633 (2012).
 26. Chaloupka, K., Malam, Y. & Seifalian, A. M., Nanosilver as a new generation of nanoparticle in biomedical applications. *Trends Biotechnol.*, **28(11)**: 580–588 (2010).
 27. Huang, J., Li, Q., Sun, D., Lu, Y., Su, Y., Yang, X., Wang, H., *et al.*, Biosynthesis of Silver and Gold Nanoparticles by Novel Sundried *Cinnamomum camphora* Leaf. *Nanotechnology*, **18(10)**: (2007).
 28. Tompsett, G. A., Conner, W. C. & Yngvesson, K. S., Microwave synthesis of nanoporous materials. *Chemphyschem*, **7(2)**: 296–319 (2006).
 29. Kappe, C. O., Pieber, B. & Dallinger, D., Microwave effects in organic synthesis: myth or reality? *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, **52(4)**: 1088–1094 (2013).
 30. Dudley, G. B., Richert, R. & Stiegman, A. E., On the existence of and mechanism for microwave-specific reaction rate enhancement. *Chem. Sci.*, **6(4)**: 2144–2152 (2015).
 31. Gusrizal, G., Santosa, S. J., Kunarti, E. S. & Rusdiarso, B., Synthesis of Silver Nanoparticles by Reduction of Silver Ion with m-Hydroxybenzoic Acid. *Asian J. Chem.*, **29(7)**: 1417–1422 (2017).
 32. Sutanti, F., Silvia, D., Putri, M. A. & Fabiani, V. A., Pengaruh Konsentrasi AgNO₃ pada Sintesis Nanopartikel Perak Menggunakan Bioreduktor Ekstrak Pucuk Idat (*Cratogeomys glaucum* KORTH). *Pros. Semin. Nas. Penelit. dan Pengabd. pada Masyarakat*, **1**: 175–178 (2018).
 33. Gusrizal, G., Santosa, S. J., Kunarti, E. S. & Rusdiarso, B., Two Highly Stable Silver Nanoparticles: Surface Plasmon Resonance Spectra Study of Silver Nanoparticles Capped with m-Hydroxybenzoic Acid and p-Hydroxybenzoic Acid. *Molekul*, **13(1)**: 30 (2018).
 34. Ridwan, R. N., Gusrizal, G., Nurlina, N. & Santosa, S. J., Sintesis dan Studi Stabilitas Nanopartikel Perak Tertudung Asam Salisilat. *J. Pure Appl. Chem. Res.*, **7(1)**: 45–52 (2018).
 35. Zeta potential measurement using laser Doppler electrophoresis (LDE).
 36. Shah, R., Eldridge, D., Palombo, E. & Harding, I., Optimisation and Stability Assessment of Solid Lipid Nanoparticles using Particle Size and Zeta Potential. *J. Phys. Sci.*, **25(1)**: 59–75 (2014).
 37. El-Rafie, M. H., Ahmed, H. B. & Zahran, M. K., Characterization of Nanosilver Coated Cotton Fabrics and Evaluation of its Antibacterial Efficacy. *Carbohydr. Polym.*, **107(1)**: 174–181 (2014).
 38. McBirney, S. E., Trinh, K., Wong-Beringer, A. & Armani, A. M., Wavelength-Normalized Spectroscopic Analysis of *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa* Growth Rates. *Biomed. Opt. Express*, **7(10)**: 4034 (2016).
 39. Raffi, M., Hussain, F., Bhatti, T. M., Akhter, J. I., Hameed, A. & Hasan, M. M., Antibacterial Characterization of Silver Nanoparticles against *E. coli* ATCC-15224. *J. Mater. Sci. Technol.*, **24(2)**: 192–196 (2008).
 40. Rori, B. N. D., Khoman, J. A. & Supit, A. S. R., Uji Konsentrasi Hambat Minimum Ekstrak Daun Gedi (*Abelmoschus manihot* L. Medik) terhadap Pertumbuhan *Streptococcus mutans*. *e-GIGI*, **6(2)**: 83–90 (2018).
 41. Dewi, F. K., Aktivitas Antibakteri Ekstrak Etanol Buah Mengkudu (*Morinda citrifolia*, linnaeus) terhadap Bakteri Pembusuk Daging Segar. Universitas Sebelas Maret, (2010).