Quimica: Jurnal Kimia Sains dan Terapan **ISSN 2716-0963**
Volume 8, Nomor 2, Oktober 2026 **e-ISSN 2716-1218**

Nanopartikel Perak Berbasis Sintesis Hijau: Prinsip Sintesis, Karakterisasi, Mekanisme Antimikroba, Aplikasi Biomedis, Toksisitas, dan Arah Pengembangan

Rizki Damayanti[1]*, Rahayu[1] , Tisna Harmawan[1], dan Arissa Sabilla[2]

[1]Program Studi Kimia Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Samudra
Jl. Meurandeh, Langsa Aceh 24416, Indonesia
[2]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Samudra
Jl. Meurandeh, Langsa Aceh 24416, Indonesia

* Corresponding author: rizki.damayanti@unsam.ac.id

ABSTRAK

Nanopartikel perak (AgNPs) merupakan nanomaterial multifungsi yang menarik perhatian luas karena kombinasi sifat plasmonik, luas permukaan tinggi, dan aktivitas antimikroba yang kuat. Artikel ulasan ini merangkum prinsip sintesis AgNPs secara fisika, kimia, dan sintesis hijau, dengan penekanan pada sintesis hijau berbasis ekstrak tumbuhan yang memanfaatkan senyawa fenolik dan flavonoid sebagai agen pereduksi sekaligus penstabil (*capping agent*). Karakterisasi AgNPs dibahas secara multidimensional melalui UV–Vis, TEM/SEM, DLS, zeta potential, XRD, dan FTIR/XPS untuk mengungkap ukuran, morfologi, struktur kristal, dan kimia permukaan nanopartikel. Kajian menunjukkan bahwa aktivitas antibakteri AgNPs bersifat multitarget, meliputi interaksi dan kerusakan membran sel, pembentukan *reactive oxygen species* (ROS), pelepasan ion Ag^+, serta gangguan protein dan DNA, yang secara bersamaan berkontribusi terhadap efek bakterisidal terhadap mikroorganisme patogen maupun *multidrug-resistant*. Ulasan ini juga membahas aplikasi biomedis AgNPs, khususnya sebagai *wound dressing* dan agen antiinflamasi, serta pemanfaatannya dalam kemasan antimikroba dan pengolahan air. Namun, potensi toksisitas terhadap sel mamalia dan risiko munculnya resistensi mikroba terhadap perak menegaskan bahwa AgNPs bukan solusi tunggal dan memerlukan pendekatan berbasis risiko. Tantangan utama dalam sintesis hijau adalah variabilitas komposisi ekstrak tumbuhan yang memengaruhi reproduktibilitas nanopartikel yang dihasilkan. Ulasan ini menyimpulkan bahwa pengembangan AgNPs ke depan perlu mengintegrasikan standardisasi sintesis, karakterisasi multidimensional, dan analisis *structure–activity relationship* agar diperoleh material dengan aktivitas biologis tinggi, keamanan, dan stabilitas yang dapat dikendalikan.

Kata Kunci: Nanopartikel, AgNPs, Sintesis Hijau, Antibakteri

PENDAHULUAN

Nanoteknologi memungkinkan material direkayasa pada skala nanometer sehingga muncul sifat yang berbeda dibandingkan material dalam bentuk bulk. Pada ukuran tersebut, peningkatan rasio luas permukaan terhadap volume menyebabkan perubahan interaksi permukaan, sifat optik, reaktivitas kimia, dan karakteristik biologis. Nanopartikel perak merupakan salah satu contoh penting karena kombinasi sifat plasmonik, konduktivitas, reaktivitas permukaan, dan aktivitas biologisnya menjadikan AgNPs menarik untuk berbagai aplikasi [1].

Pemanfaatan perak sebagai agen antimikroba sebenarnya telah berlangsung jauh sebelum perkembangan nanoteknologi modern. Perkembangan AgNPs memberikan dimensi baru karena perak dapat direkayasa menjadi partikel berukuran nanometer dengan luas permukaan tinggi dan karakteristik permukaan yang dapat dimodifikasi. Studi awal menunjukkan bahwa AgNPs dapat menghambat pertumbuhan bakteri, sedangkan penelitian lebih lanjut memperlihatkan bahwa ukuran partikel dan interaksi langsung nanopartikel dengan permukaan sel berpengaruh terhadap efektivitas bakterisidal [2].

Perkembangan penggunaan AgNPs semakin cepat seiring meningkatnya perhatian terhadap resistensi antimikroba. Berbeda dengan antibiotik yang umumnya memiliki target molekuler tertentu, AgNPs dapat memberikan beberapa tekanan biologis secara simultan, termasuk kerusakan membran, gangguan protein, stres oksidatif, dan gangguan DNA. *Multitarget activity* tersebut menjadi salah satu alasan mengapa AgNPs terus diteliti terhadap bakteri patogen dan bakteri yang memiliki resistensi terhadap berbagai antibiotik. Namun, munculnya mekanisme resistensi

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

terhadap perak juga telah dilaporkan sehingga penggunaan AgNPs tetap memerlukan pendekatan berbasis risiko dan tidak dapat dianggap sebagai solusi tunggal terhadap resistensi antimikroba [3].

Metode sintesis menjadi faktor penting karena menentukan karakteristik akhir AgNPs. Secara umum, sintesis dapat dibagi menjadi metode fisik, kimia, dan biologis atau hijau. Metode fisik dapat menghasilkan nanopartikel dengan kemurnian tinggi tetapi sering memerlukan energi tinggi, sedangkan metode kimia memungkinkan kontrol yang baik tetapi dapat menggunakan reduktor dan stabilisator yang berpotensi memberikan residu. Pendekatan biologis memanfaatkan mikroorganisme, biomolekul, atau ekstrak tumbuhan sebagai sistem reduksi dan stabilisasi. Di antara pendekatan tersebut, ekstrak tumbuhan menarik karena relatif mudah diperoleh, prosesnya sederhana, dan mengandung berbagai metabolit aktif [1].

KARAKTERISTIK DAN SIFAT FISIKOKIMIA AgNPs

AgNPs umumnya didefinisikan sebagai material perak dengan setidaknya satu dimensi pada skala nanometer. Dalam penelitian eksperimental, ukuran yang dilaporkan dapat berada pada rentang beberapa hingga puluhan nanometer, tetapi ukuran hidrodinamik yang diperoleh melalui *dynamic light scattering* (DLS) dapat lebih besar daripada ukuran inti partikel yang diamati dengan TEM karena DLS juga mendeteksi lapisan permukaan dan solvasi. Oleh sebab itu, istilah "ukuran nanopartikel" harus selalu dikaitkan dengan teknik pengukurannya [4].

Salah satu karakteristik optik khas AgNPs adalah *localized surface plasmon resonance* (LSPR), yaitu osilasi kolektif elektron konduksi pada permukaan nanopartikel akibat interaksi dengan radiasi elektromagnetik. Posisi, intensitas, dan bentuk pita plasmon dipengaruhi oleh ukuran, bentuk, agregasi, kimia permukaan, serta lingkungan dielektrik di sekitar nanopartikel. Oleh sebab itu, spektroskopi UV–Vis dapat digunakan untuk memantau pembentukan AgNPs dan perubahan optiknya, tetapi hasilnya perlu ditafsirkan bersama teknik karakterisasi lain [5].

Perubahan warna larutan selama sintesis AgNPs juga sering digunakan sebagai indikator awal pembentukan nanopartikel. Namun, perubahan warna tidak cukup untuk membuktikan terbentuknya AgNPs secara definitif. Konfirmasi perlu dilakukan menggunakan kombinasi teknik seperti UV–Vis, TEM/SEM, DLS, XRD, FTIR, XPS atau teknik elemental lainnya. Pendekatan multimodal tersebut penting karena setiap teknik memberikan informasi yang berbeda mengenai ukuran, morfologi, struktur kristal, kimia permukaan *(surface chemistry)*, dan stabilitas koloid [4].

SINTESIS NANOPARTIKEL PERAK SECARA FISIKA DAN KIMIA

Sintesis kimia umumnya menggunakan garam perak, terutama $AgNO_3$, sebagai prekursor dan reduktor seperti natrium borohidrida, sitrat, atau senyawa organik lainnya. Agen stabilisasi atau agen penyalut *(capping agent*) kemudian digunakan untuk mengurangi agregasi. Metode tersebut menawarkan kontrol yang relatif baik terhadap ukuran dan morfologi, tetapi penggunaan bahan kimia tertentu dapat meningkatkan beban lingkungan dan memerlukan tahap pemurnian sebelum aplikasi biologis [6].

Sintesis fisik dapat dilakukan melalui teknik seperti evaporasi-kondensasi, laser ablation, dan metode berbasis radiasi. Keuntungan pendekatan fisik adalah berkurangnya penggunaan reduktor kimia, tetapi beberapa teknik membutuhkan peralatan khusus, konsumsi energi tinggi, atau kondisi operasi yang relatif kompleks. Oleh karena itu, untuk aplikasi yang membutuhkan produksi sederhana berbasis sumber daya terbarukan, metode biologis menjadi salah satu alternatif yang terus berkembang [6].

SINTESIS HIJAU AgNPs MENGGUNAKAN EKSTRAK TUMBUHAN

Sintesis hijau berbasis tumbuhan pertama kali berkembang dari pengamatan bahwa biomolekul tumbuhan dapat mereduksi ion logam menjadi nanopartikel. Salah satu studi awal yang berpengaruh melaporkan biosintesis AgNPs menggunakan ekstrak daun *Pelargonium graveolens*, menghasilkan nanopartikel kristalin dengan ukuran sekitar 16–40 nm. Studi lain menggunakan *Azadirachta indica* menunjukkan bahwa ekstrak daun dapat menghasilkan AgNPs

secara cepat dari larutan $AgNO_3$. Penelitian tersebut menjadi fondasi penting bagi perkembangan sintesis nanopartikel berbasis ekstrak tumbuhan [7].

Dalam sistem sintesis hijau, metabolit tumbuhan dapat berfungsi melalui beberapa mekanisme sekaligus. Senyawa fenolik dan flavonoid dapat mendonorkan elektron sehingga Ag^+ direduksi menjadi Ag^0, sedangkan gugus hidroksil, karbonil, karboksil, protein, polisakarida, dan metabolit lainnya dapat berinteraksi dengan permukaan nanopartikel dan membantu stabilisasi. Dengan demikian, ekstrak tumbuhan bukan hanya berperan sebagai reduktor, tetapi juga sebagai sumber molekul permukaan yang dapat memengaruhi sifat biologis AgNPs [8].

Secara konseptual, pembentukan AgNPs berbasis ekstrak tumbuhan dapat dibagi menjadi tiga tahap, yaitu reduksi ion Ag^+, nukleasi dan pertumbuhan inti, serta stabilisasi permukaan. Pada tahap awal, ion Ag^+ berinteraksi dengan metabolit ekstrak dan mengalami reduksi menjadi atom Ag^0. Atom tersebut kemudian mengalami nukleasi dan pertumbuhan menjadi nanopartikel. Molekul organik yang teradsorpsi pada permukaan kemudian berperan sebagai *capping layer*, sehingga pertumbuhan lebih lanjut dan agregasi dapat dikendalikan [5].

Keunggulan utama metode ini adalah penggunaan air sebagai pelarut, kondisi reaksi yang relatif sederhana, dan pemanfaatan biomassa tumbuhan sebagai sumber molekul fungsional. Namun, ekstrak tumbuhan memiliki komposisi yang tidak selalu konstan karena dipengaruhi spesies, bagian tanaman, umur tanaman, kondisi geografis, musim, metode pengeringan, pelarut, suhu, dan waktu ekstraksi. Variasi tersebut dapat menyebabkan perubahan ukuran, bentuk, distribusi ukuran, stabilitas, dan aktivitas biologis AgNPs yang dihasilkan [5].

Tabel 1. Perbandingan pendekatan sintesis AgNPs

Metode	Keunggulan	Keterbatasan
Fisika	Residu kimia relatif sedikit; kemurnian produk dapat tinggi	Membutuhkan energi atau peralatan khusus
Kimia	Ukuran dan morfologi relatif mudah dikendalikan	Berpotensi meninggalkan residu reduktor atau penstabil
Mikroorganisme	Memanfaatkan sistem biologis sebagai agen sintesis	Proses dapat lebih lambat dan memerlukan kondisi kultur terkontrol
Ekstrak Tumbuhan	Proses relatif sederhana dan berbasis air; biomolekul dapat mereduksi serta menstabilkan partikel	Komposisi ekstrak bervariasi sehingga reproduktibilitas perlu dikendalikan
Sintesis hijau berbantuan gelombang mikro	Waktu reaksi relatif singkat dan pembentukan partikel dapat dipercepat	Memerlukan optimasi daya, waktu, suhu, dan kondisi proses

Sumber sintesis hijau dan perbandingan pendekatan dirangkum dari literatur sintesis biologis dan perkembangan terbaru [1].

FAKTOR YANG MEMENGARUHI SINTESIS AgNPs

Konsentrasi prekursor $AgNO_3$

Konsentrasi $AgNO_3$ menentukan jumlah ion Ag^+ yang tersedia untuk proses reduksi dan pertumbuhan nanopartikel. Peningkatan konsentrasi prekursor dapat meningkatkan jumlah material yang terbentuk, tetapi pada kondisi tertentu dapat mempercepat pertumbuhan dan meningkatkan peluang agregasi. Oleh sebab itu, konsentrasi $AgNO_3$ perlu dioptimasi bersama konsentrasi ekstrak, pH, temperatur, dan waktu reaksi [5].

Konsentrasi ekstrak

Konsentrasi ekstrak menentukan jumlah molekul pereduksi dan agen penyalut (*capping agent*). Ekstrak yang terlalu rendah dapat menghasilkan proses reduksi yang lambat atau nukleasi yang tidak mencukupi, sedangkan konsentrasi yang terlalu tinggi dapat meningkatkan jumlah molekul organik pada permukaan dan memengaruhi agregasi, ukuran hidrodinamik, serta aktivitas biologis. Oleh karena itu, rasio ekstrak terhadap

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

$AgNO_3$ merupakan salah satu variabel penting dalam desain eksperimen [5]

pH

pH memengaruhi ionisasi gugus fungsional fitokimia, kemampuan reduksi, dan proses nukleasi. Perubahan pH juga dapat memengaruhi muatan permukaan (*surface charge*) dan stabilitas koloid. Banyak sistem sintesis berbasis tumbuhan menunjukkan bahwa kondisi netral hingga sedikit basa dapat mempercepat pembentukan nanopartikel, tetapi nilai optimum tidak bersifat universal karena sangat bergantung pada komposisi ekstrak dan kondisi sintesis [9].

Temperatur dan waktu reaksi

Temperatur dapat mempercepat kinetika reduksi dan pembentukan inti. Peningkatan temperatur umumnya mempercepat pembentukan AgNPs, tetapi temperatur yang terlalu tinggi dapat mengubah atau mendegradasi sebagian metabolit tumbuhan yang berperan sebagai reduktor dan stabilisator. Waktu reaksi juga menentukan tahap pertumbuhan dan stabilisasi, sehingga perubahan spektrum UV–Vis terhadap waktu dapat digunakan untuk menentukan waktu reaksi optimum [5].

KARAKTERISASI AgNPs

Karakterisasi AgNPs harus dilakukan secara multidimensional karena tidak ada satu teknik yang mampu menjelaskan seluruh karakteristik nanopartikel. UV–Vis terutama memberikan informasi mengenai sifat plasmonik; TEM dan SEM memberikan informasi morfologi dan ukuran; DLS memberikan ukuran hidrodinamik; zeta potential memberikan informasi mengenai karakteristik permukaan dan stabilitas koloid; XRD memberikan informasi struktur kristal; sedangkan FTIR/XPS membantu mengidentifikasi interaksi antara molekul permukaan dengan nanopartikel [10].

Tabel 2. Teknik karakterisasi utama AgNPs

Teknik	Informasi yang diperoleh	Interpretasi
UV-Vis	Posisi, intensitas, dan bentuk pita LSPR	Memantau pembentukan serta perubahan optik/agregasi; bukan bukti tunggal identitas partikel
TEM	Ukuran dan bentuk inti partikel	Mengukur dimensi inti dan morfologi pada citra
SEM	Morfologi permukaan dan distribusi bentuk	Mengamati bentuk/agregat pada permukaan sampel
DLS	Diameter hidrodinamik dalam dispersi	Menilai ukuran efektif dalam medium, termasuk kontribusi lapisan solvasi/agregasi
Zeta Potential	Potensial elektrokinetik permukaan	Membantu menilai muatan permukaan dan kecenderungan kestabilan koloid
XRD	Pola difraksi dan struktur kristal	Mengidentifikasi fase kristalin serta parameter kristal yang dapat dianalisis
FTIR	Pita vibrasi gugus fungsi	Menunjukkan gugus organik yang mungkin terlibat dalam reduksi atau penyalutan
XPS	Komposisi dan keadaan kimia permukaan	Membedakan keadaan kimia unsur permukaan, termasuk kontribusi Ag^0/Ag^+ bila resolusi data memadai
EDX/EDS	Komposisi unsur lokal	Mendukung konfirmasi keberadaan unsur Ag; tidak berdiri sendiri untuk menentukan

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

Teknik	Informasi yang diperoleh	Interpretasi
		ukuran atau keadaan oksidasi

Kombinasi teknik tersebut direkomendasikan karena perbedaan hadsil antar-teknik dapat justru memberikan informasi penting mengenai lapisan organik, agregasi, dan lingkungan permukaan nanopartikel [4].

HUBUNGAN UKURAN, BENTUK, DAN AKTIVITAS ANTIMIKROBA

Ukuran merupakan salah satu parameter utama yang menentukan aktivitas biologis AgNPs. Partikel yang lebih kecil mempunyai luas permukaan relatif lebih besar dan dapat meningkatkan kontak dengan permukaan mikroba. Studi klasik menunjukkan bahwa partikel dengan ukuran sangat kecil memiliki kemampuan lebih tinggi untuk berinteraksi langsung dengan sel bakteri dibandingkan partikel yang lebih besar. Namun, hubungan ukuran–aktivitas tidak selalu linear karena efek *capping layer*, agregasi, pelepasan Ag^+, dan kondisi medium juga menentukan bioavailabilitas perak [11].

Bentuk nanopartikel juga berpengaruh terhadap aktivitas biologis. Studi terhadap *Escherichia coli* menunjukkan bahwa bentuk dan bidang kristal yang terekspos dapat memengaruhi aktivitas antibakteri. Oleh karena itu, pengembangan AgNPs sebaiknya tidak hanya menargetkan ukuran kecil, tetapi juga mempertimbangkan morfologi dan bidang permukaan kristal yang dominan [12].

Stabilitas koloid merupakan parameter penting lainnya. AgNPs yang mengalami agregasi akan memiliki luas permukaan efektif dan karakteristik interaksi biologis yang berbeda. Penambahan surfaktan atau polimer tertentu dapat mengubah stabilitas agregasi dan sekaligus memengaruhi aktivitas antibakteri. Hal ini menunjukkan bahwa *surface chemistry* merupakan bagian integral dari aktivitas biologis AgNPs, bukan sekadar karakteristik tambahan [13].

MEKANISME ANTIBAKTERI AgNPs

Mekanisme antibakteri AgNPs bersifat multifaktorial. Tahap awal dapat berupa interaksi dan adsorpsi nanopartikel pada dinding atau membran sel. Setelah kontak terjadi, perubahan permeabilitas membran dapat menyebabkan kebocoran komponen intraseluler dan gangguan keseimbangan ion. Pada saat yang sama, AgNPs dapat melepaskan Ag^+ yang berinteraksi dengan gugus sulfur dan nitrogen pada protein serta biomolekul penting [14].

Mekanisme berikutnya adalah pembentukan ROS dan peningkatan stres oksidatif. ROS dapat menyebabkan oksidasi lipid membran, kerusakan protein, perubahan sistem respirasi, dan kerusakan biomolekul lainnya. Namun, kontribusi ROS dapat berbeda tergantung jenis nanopartikel, ukuran, coating, kondisi medium, dan jenis mikroorganisme sehingga mekanisme tidak seharusnya disederhanakan menjadi “AgNPs bekerja hanya melalui ROS” [15].

Ag^+ yang dilepaskan dari AgNPs juga memiliki aktivitas biologis penting. Ion perak dapat berinteraksi dengan kelompok sulfihidril pada protein, mengganggu fungsi enzim dan metabolisme respirasi, serta berkontribusi terhadap gangguan DNA. Dengan demikian, efek antibakteri AgNPs dapat dipandang sebagai kombinasi antara efek partikel, efek ion perak, dan interaksi permukaan [16].

Tabel 3. Mekanisme utama antibakteri AgNPs

Mekanisme	Dampak mikroorganisme
Adsorpsi/interaksi permukaan	Meningkatkan kontak nanopartikel dengan dinding atau membran sel
Kerusakan/perubahan membran	Meningkatkan permeabilitas dan menyebabkan kebocoran komponen intraseluler
Pelepasan Ag+	Mengganggu protein, enzim, dan proses metabolik
Pembentukan ROS	Meningkatkan stres oksidatif dan merusak biomolekul
Gangguan respirasi	Mengurangi fungsi respirasi dan produksi energi
Kerusakan DNA	Mengganggu integritas DNA dan proses replikasi

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

Mekanisme	Dampak mikroorganisme
Gangguan Protein	Mengubah struktur atau fungsi protein seluler
Gangguan Biofilm	Menghambat pembentukan atau menurunkan viabilitas biofilm

Mekanisme tersebut dapat berlangsung secara bersamaan sehingga AgNPs memiliki aktivitas multitarget [15].

AgNPs TERHADAP BIOFILM DAN MIKROORGANISME RESISTEN

Biofilm merupakan salah satu bentuk pertahanan mikroorganisme yang menyulitkan terapi antimikroba karena sel terlindungi oleh matriks ekstraseluler. AgNPs berpotensi menghambat pembentukan biofilm maupun mengganggu integritas biofilm melalui kombinasi interaksi permukaan, penetrasi, pelepasan Ag^+, dan stres oksidatif. Kajian proteomik terbaru memperlihatkan bahwa paparan AgNPs dapat mengubah ekspresi protein yang berkaitan dengan metabolisme, membran, stres oksidatif, dan respons terhadap kerusakan sel [17].

AgNPs juga banyak diteliti terhadap bakteri *multidrug-resistant* (MDR). Meskipun hasil laboratorium menunjukkan potensi luas, istilah "mengatasi resistensi antibiotik" perlu digunakan secara hati-hati karena bakteri juga dapat mengembangkan mekanisme resistensi terhadap perak. Mekanisme tersebut dapat mencakup pengurangan kontak dengan perak, perubahan agregasi, reduksi Ag^+, *efflux*, s*equestration*, dan peningkatan sistem perbaikan kerusakan sel [18].

APLIKASI BIOMEDIS.

Wound dressing

Wound dressing merupakan salah satu aplikasi AgNPs yang paling banyak diteliti. Luka kronis menghadapi risiko infeksi yang tinggi sehingga material dressing yang mampu menghambat pertumbuhan mikroba sangat menarik. AgNPs dapat dimasukkan ke dalam hidrogel, film, serat, nanofiber, membran, dan material komposit untuk menghasilkan pelepasan perak secara lokal [19].

Penelitian mengenai AgNPs untuk *wound healing* menunjukkan bahwa manfaat potensialnya tidak hanya berasal dari aktivitas antibakteri. Dalam beberapa sistem, AgNPs juga dikaitkan dengan modulasi inflamasi, proliferasi fibroblas, deposisi kolagen, dan angiogenesis. Namun, efek tersebut sangat tergantung pada dosis dan karakteristik nanopartikel karena konsentrasi perak yang terlalu tinggi dapat mengganggu viabilitas sel *host* [20].

Kajian klinis dan eksperimental menunjukkan bahwa balutan berbasis perak perlu mempertimbangkan keseimbangan antara pengendalian infeksi dan keamanan jaringan. Aktivitas antimikroba tidak selalu berbanding lurus dengan percepatan penyembuhan luka. Karena itu, AgNPs dalam balutan luka masih perlu dievaluasi melalui pengujian praklinis yang sesuai, termasuk profil pelepasan terkendali (*controlled release*), sitotoksisitas, dan respons jaringan; uraian potensi ini tidak dimaksudkan sebagai bukti efektivitas klinis AgNPs secara umum [21].

Aktivitas antiinflamasi.

Selain aktivitas antimikroba, AgNPs telah diteliti untuk mengetahui kemungkinan modulasi respons inflamasi, termasuk perubahan jalur NF-KB dan MAPK serta produksi sitokin proinflamasi pada model eksperimental. Temuan tersebut menunjukkan potensi untuk dikaji lebih lanjut sebagai komponen material biomaterial, terutama bila dikombinasikan dengan polimer biokompatibel atau senyawa bioaktif. Namun, bukti eksperimental tersebut belum dengan sendirinya membuktikan manfaat terapeutik atau efektivitas klinis; kesimpulan harus dibatasi pada model, dosis, dan kondisi yang benar-benar diuji [20].

Namun, aktivitas antiinflamasi tidak boleh disamakan dengan keamanan biologis. Pada kondisi dan dosis tertentu, AgNPs juga dapat memicu stres oksidatif dan respons inflamasi pada sel mamalia. Dengan demikian, karakterisasi dosis-respons, ukuran, permukaan lapisan penyalut, dan pelepasan Ag^+ merupakan persyaratan penting sebelum suatu AgNPs dikembangkan untuk aplikasi terapeutik [22].

APLIKASI SEBAGAI KEMASAN ANTIMIKROBA

AgNPs telah dikembangkan sebagai agen antimikroba dalam material kemasan makanan. Nanopartikel dapat dimasukkan ke dalam polimer atau biopolimer sehingga memberikan aktivitas

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

antimikroba pada permukaan atau melalui pelepasan terkendali. Penggunaan matriks biodegradable dan pendekatan sintesis hijau menjadi salah satu arah penelitian terbaru untuk meningkatkan keberlanjutan material kemasan berbasis AgNPs [23].

Meskipun demikian, aplikasi pangan memerlukan perhatian khusus terhadap migrasi Ag dari material kemasan ke makanan, stabilitas nanopartikel selama penyimpanan, dan batas keamanan paparan. Karena itu, pengembangan kemasan AgNPs tidak cukup hanya membuktikan aktivitas antibakteri, tetapi harus mencakup studi migrasi, stabilitas, toksikologi, dan karakteristik material selama penggunaan [24].

APLIKASI LINGKUNGAN DAN PENGOLAHAN AIR

AgNPs memiliki potensi dalam pengolahan air karena aktivitas antimikroba dan sifat permukaannya. AgNPs dapat digunakan sebagai material aktif atau dikombinasikan dengan material pendukung seperti silika, karbon, membran, dan komposit untuk meningkatkan stabilitas dan mengurangi pelepasan nanopartikel bebas ke lingkungan. Pendekatan tersebut menjadi penting karena nanopartikel bebas dapat mengalami agregasi, transformasi kimia, dan interaksi dengan komponen lingkunga [25].

Transformasi lingkungan merupakan faktor penting dalam menentukan nasib AgNPs. Ion klorida, sulfida, bahan organik, dan komponen air lainnya dapat mengubah bentuk kimia dan kelarutan perak. Sulfidasi, misalnya, dapat menghasilkan bentuk perak yang lebih rendah kelarutannya dan mengubah toksisitasnya. Oleh karena itu, evaluasi keamanan lingkungan harus mempertimbangkan bukan hanya AgNPs awal, tetapi juga produk transformasinya [26].

TOKSISITAS AgNPs

Potensi toksisitas merupakan salah satu isu utama dalam pengembangan AgNPs. Penelitian terhadap sel manusia menunjukkan bahwa paparan AgNPs dapat memengaruhi fungsi mitokondria, meningkatkan ROS, menurunkan ATP, dan menyebabkan kerusakan DNA pada kondisi eksperimental tertentu. Efek tersebut dipengaruhi oleh konsentrasi, ukuran partikel, lapisan penyalut, waktu paparan, dan karakteristik sel [22].

Toksisitas AgNPs juga tidak dapat dijelaskan hanya berdasarkan ukuran. Pelepasan Ag^+, protein corona, agregasi, kimia permukaan (*surface chemistry*), dan transformasi lingkungan dapat mengubah bioavailabilitas dan respons biologis. Karena itu, penelitian toksikologi modern perlu melaporkan karakteristik nanopartikel secara lengkap sebelum menginterpretasikan hubungan dosis dan respons biologis [27].

RESISTENSI MIKROBA TERHADAP AgNPs

Meskipun AgNPs memiliki mekanisme multitarget, penggunaan berulang dan pelepasan perak ke lingkungan dapat memberikan tekanan seleksi terhadap mikroorganisme. Resistensi terhadap perak dapat melibatkan sistem efflux, perubahan permeabilitas membran, pengikatan atau sequestration ion perak, reduksi Ag^+, serta mekanisme perbaikan kerusakan sel. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa penggunaan AgNPs harus mempertimbangkan prinsip *antimicrobial stewardship* [18].

Karena itu, arah penelitian tidak seharusnya hanya meningkatkan konsentrasi AgNPs untuk memperoleh zona hambat yang lebih besar. Pendekatan yang lebih rasional adalah mengoptimalkan ukuran, bentuk, kimia permukaan (*surface chemistry*), konsentrasi efektif, pola pelepasan Ag^+, dan kombinasi dengan material lain sehingga aktivitas antimikroba dapat dicapai pada paparan perak yang lebih terkendali [13].

TANTANGAN STANDARDISASI SINTESIS HIJAU

Salah satu masalah terbesar sintesis hijau adalah reproduktibilitas. Ekstrak tumbuhan merupakan sistem kompleks yang mengandung puluhan hingga ratusan metabolit, dan komposisinya dapat berubah tergantung kondisi biologis dan metode ekstraksi. Dua penelitian yang menggunakan nama tumbuhan yang sama belum tentu menghasilkan AgNPs dengan sifat yang sama apabila bahan baku dan prosedur ekstraksinya berbeda [5].

Untuk meningkatkan reproduktibilitas, penelitian AgNPs berbasis tumbuhan perlu melaporkan sumber bahan tanaman, bagian tanaman, kondisi pengeringan, ukuran serbuk, rasio bahan terhadap pelarut, temperatur ekstraksi, waktu ekstraksi, pH ekstrak, kandungan fenolik total,

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

kandungan flavonoid total, konsentrasi $AgNO_3$, rasio ekstrak:$AgNO_3$, temperatur reaksi, waktu reaksi, dan metode pemurnian. Pelaporan tersebut akan memungkinkan hubungan antara komposisi ekstrak dan karakteristik nanopartikel dianalisis secara lebih sistematis [9].

MODEL KONSEPTUAL PENGEMBANGAN AgNPs

Berdasarkan literatur, pengembangan AgNPs yang lebih rasional dapat digambarkan sebagai hubungan:

Sumber tanaman → ekstraksi → profil fitokimia → reduksi Ag^+ → nukleasi → pertumbuhan → capping → karakteristik nanopartikel → pelepasan Ag^+ → interaksi biologis → aktivitas → toksisitas.

Model tersebut menunjukkan bahwa aktivitas antibakteri bukan hanya fungsi dari "ukuran nanopartikel". Karakteristik permukaan dan kemampuan melepaskan Ag^+ dapat sama pentingnya atau bahkan lebih menentukan dalam kondisi biologis tertentu. Oleh karena itu, penelitian masa depan perlu mengintegrasikan analisis kimia ekstrak, karakterisasi nanomaterial, dan pengujian biologis dalam satu desain penelitian [28].

ARAH PENELITIAN MASA DEPAN

Arah pertama adalah standardisasi sintesis hijau. Penggunaan tanaman lokal atau tanaman endemik memiliki peluang besar, tetapi harus disertai karakterisasi fitokimia dan standardisasi ekstrak agar nanopartikel yang dihasilkan memiliki karakteristik yang konsisten. Penggunaan *design of experiment* seperti Box–Behnken atau *response surface methodology* dapat membantu mengidentifikasi kombinasi parameter sintesis yang menghasilkan ukuran dan aktivitas optimal [9].

Arah kedua adalah pengembangan AgNPs dengan pelepasan terkendali (*controlled release*). Alih-alih menggunakan nanopartikel bebas dalam konsentrasi tinggi, AgNPs dapat dimasukkan ke dalam hidrogel, film, nanofiber, alginat, kitosan, gelatin, atau matriks polimer lainnya. Strategi ini memungkinkan pelepasan Ag^+ lebih terkendali sekaligus meningkatkan stabilitas material dan mengurangi paparan sistemik [29].

Arah ketiga adalah pengembangan AgNPs multifungsi. Kombinasi aktivitas antibakteri, antibiofilm, antiinflamasi, dan regeneratif menjadi sangat menarik untuk *wound dressing*. Pada pendekatan ini, keberhasilan tidak lagi diukur hanya dari diameter zona hambat, tetapi dari kombinasi parameter seperti MIC/MBC, biofilm inhibition, sitotoksisitas, inflamasi, proliferasi fibroblas, migrasi sel, deposisi kolagen, dan angiogenesis [29].

Arah keempat adalah pengembangan *structure–activity relationship* (SAR) untuk AgNPs. Penelitian harus menghubungkan secara kuantitatif ukuran, morfologi, zeta potential, surface lapisan penyalut, Ag^+ release, ROS generation, dan aktivitas biologis. Pendekatan ini akan menggeser penelitian AgNPs dari pendekatan *trial-and-error* menuju desain nanomaterial yang lebih prediktif[30].

KESIMPULAN

AgNPs merupakan nanomaterial multifungsi yang berpotensi dimanfaatkan dalam bidang kesehatan, lingkungan, pangan, dan material fungsional. Aktivitas biologisnya ditentukan oleh keterkaitan ukuran dan morfologi, kimia permukaan, stabilitas, serta pelepasan Ag^+; mekanisme antimikroba dapat mencakup interaksi membran, stres oksidatif, dan gangguan protein serta metabolisme.

Sintesis hijau berbasis ekstrak tumbuhan menawarkan alternatif karena biomolekul dapat berperan sebagai reduktor dan penstabil. Namun, pendekatan ini tidak otomatis menjamin keamanan atau konsistensi produk. Standardisasi bahan tanaman dan proses sintesis perlu disertai karakterisasi multidimensional, pengendalian pelepasan Ag^+, serta evaluasi dosis–respons dan toksisitas.

Masa depan AgNPs terletak pada pengembangan material yang tidak hanya memiliki aktivitas biologis tinggi, tetapi juga memiliki profil keamanan, stabilitas, dan pelepasan yang dapat dikontrol. Integrasi sintesis hijau, *design of experiment*, karakterisasi multidimensional, analisis fitokimia, studi mekanistik, dan pengembangan prototipe seperti film antibakteri atau wound dressing dapat menjadi strategi penting untuk membawa AgNPs

dari tahap penelitian laboratorium menuju aplikasi yang lebih terstandar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pendanaan Hibah DIPA-UNSAM Skim Penelitian Asisten Ahli dalam pembiayaan penuh terhadap penelitian yang berkaitan dengan nanopartikel perak sehingga penulis dapat menghasilkan satu riview jurnal sebagai pondasi awal dalam melakukan penelitian (No Kontrak: 787/DST/UN54.6/PT.01.03/2026).

REFERENSI

[1] S. Iravani, "Green synthesis of metal nanoparticles using plants," *Green Chem.*, vol. 13, no. 10, pp. 2638–2650, Jan. 2011, doi: 10.1039/c1gc15386b.

[2] M. Rai, A. Yadav, and A. Gade, "Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials," *Biotechnol. Adv.*, vol. 27, no. 1, pp. 76–83, 2009, doi: https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.09.002.

[3] M. K. Rai, S. D. Deshmukh, A. P. Ingle, and A. K. Gade, "Silver nanoparticles: The powerful nanoweapon against multidrug-resistant bacteria," *J. Appl. Microbiol.*, vol. 112, no. 5, pp. 841–852, 2012, doi: 10.1111/j.1365-2672.2012.05253.x.

[4] A. F. Burlec *et al.*, "Current Overview of Metal Nanoparticles' Synthesis, Characterization, and Biomedical Applications, with a Focus on Silver and Gold Nanoparticles," *Pharmaceuticals*, vol. 16, no. 10, 2023, doi: 10.3390/ph16101410.

[5] C. Vanlalveni, S. Lallianrawna, A. Biswas, M. Selvaraj, B. Changmai, and S. L. Rokhum, "Green synthesis of silver nanoparticles using plant extracts and their antimicrobial activities: a review of recent literature," *RSC Adv.*, vol. 11, no. 5, pp. 2804–2837, 2021, doi: 10.1039/d0ra09941d.

[6] G. Magdy, E. Aboelkassim, S. M. Abd Elhaleem, and F. Belal, "A comprehensive review on silver nanoparticles: Synthesis approaches, characterization techniques, and recent pharmaceutical, environmental, and antimicrobial applications," *Microchem. J.*, vol. 196, p. 109615, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.10961 5.

[7] S. S. Shankar, A. Ahmad, and M. Sastry, "Geranium Leaf Assisted Biosynthesis of Silver Nanoparticles," *Biotechnol. Prog.*, vol. 19, no. 6, pp. 1627–1631, Jan. 2003, doi: https://doi.org/10.1021/bp034070w.

[8] R. Dhir *et al.*, "Plant-mediated synthesis of silver nanoparticles: unlocking their pharmacological potential–a comprehensive review," 2023, *Frontiers Media SA*. doi: 10.3389/fbioe.2023.1324805.

[9] S. S. Dos Santos *et al.*, "Green synthesis of silver nanoparticles mediated by plant extracts: a critical review and experimental insights on the integrated effects of pH, temperature, and concentration," *Biosci. Nanotechnol.*, vol. 2, no. 1, 2026, doi: 10.1186/s44331-026-00033-7.

[10] E. Abada, A. Mashraqi, Y. Modafer, M. A. Al Abboud, and A. El-Shabasy, "Review green synthesis of silver nanoparticles by using plant extracts and their antimicrobial activity," Jan. 01, 2024, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.sjbs.2023.103877.

[11] J. R. Morones *et al.*, "The bactericidal effect of silver nanoparticles," *Nanotechnology*, vol. 16, no. 10, p. 2346, 2005, doi: 10.1088/0957-4484/16/10/059.

[12] S. Pal, Y. K. Tak, and J. M. Song, "Does the antibacterial activity of silver nanoparticles depend on the shape of the nanoparticle? A study of the gram-negative bacterium Escherichia coli," *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 73, no. 6, pp. 1712–1720, 2007, doi: 10.1128/AEM.02218-06.

[13] L. Kvítek *et al.*, "Effect of Surfactants and Polymers on Stability and Antibacterial Activity of Silver Nanoparticles (NPs)," *J. Phys. Chem. C*, vol. 112, no. 15, pp. 5825–5834, Apr. 2008, doi: 10.1021/jp711616v.

[14] I. Sondi and B. Salopek-Sondi, "Silver nanoparticles as antimicrobial agent: a case study on E. coli as a model for Gram-negative bacteria," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 275, no. 1, pp. 177–182, 2004, doi: https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.02.012.

[15] J. A. Lemire, J. J. Harrison, and R. J. Turner, "Antimicrobial activity of metals: mechanisms, molecular targets and applications," *Nat. Rev. Microbiol.*, vol. 11, no. 6, pp. 371–384, 2013,

doi: 10.1038/nrmicro3028.

[16] M. Yamanaka, K. Hara, and J. Kudo, "Bactericidal actions of a silver ion solution on Escherichia coli, studied by energy-filtering transmission electron microscopy and proteomic analysis," *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 71, no. 11, pp. 7589–7593, 2005, doi: 10.1128/AEM.71.11.7589-7593.2005.

[17] A. S. Rodrigues *et al.*, "Advances in silver nanoparticles: a comprehensive review on their potential as antimicrobial agents and their mechanisms of action elucidated by proteomics," *Front. Microbiol.*, vol. 15, no. July, 2024, doi: 10.3389/fmicb.2024.1440065.

[18] H. Li and H. Xu, "Mechanisms of bacterial resistance to environmental silver and antimicrobial strategies for silver: A review," *Environ. Res.*, vol. 248, p. 118313, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118313.

[19] C. Rigo *et al.*, "Active silver nanoparticles for wound healing," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 14, no. 3, pp. 4817–4840, 2013, doi: 10.3390/ijms14034817.

[20] S. Nair, A. Ansari, S. Khan, A. Pratap, and S. N. Mali, "Anti-inflammatory activity of Silver Nanoparticles (AgNPs): An Updated Systematic review from in vivo, and in vitro studies," *Inflammopharmacology*, vol. 34, no. 4, pp. 2135–2174, 2026, doi: 10.1007/s10787-026-02167-9.

[21] B. S. Atiyeh, M. Costagliola, S. N. Hayek, and S. A. Dibo, "Effect of silver on burn wound infection control and healing: Review of the literature," *Burns*, vol. 33, no. 2, pp. 139–148, 2007, doi: https://doi.org/10.1016/j.burns.2006.06.010.

[22] P. V AshaRani, G. Low Kah Mun, M. P. Hande, and S. Valiyaveettil, "Cytotoxicity and Genotoxicity of Silver Nanoparticles in Human Cells," *ACS Nano*, vol. 3, no. 2, pp. 279–290, Feb. 2009, doi: 10.1021/nn800596w.

[23] S. Ali *et al.*, "Advancements and challenges in phytochemical-mediated silver nanoparticles for food packaging: Recent review (2021–2023)," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 141, p. 104197, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104197.

[24] T. Luo, T. Yao, Z. Zhan, B. Gan, X. Wu, and H. Xu, "Recent Progress on Silver-Based Antibacterial Food Packaging," *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 25, no. 1, p. e70366, Jan. 2026, doi: https://doi.org/10.1111/1541-4337.70366.

[25] B. Tessema, G. Gonfa, and S. M. Hailegiorgis, "Synthesis of modified silica gel supported silver nanoparticles for the application of drinking water disinfection: A review," *Results Eng.*, vol. 22, no. May, p. 102261, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102261.

[26] C. Levard, E. M. Hotze, G. V Lowry, and G. E. Brown Jr., "Environmental Transformations of Silver Nanoparticles: Impact on Stability and Toxicity," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 46, no. 13, pp. 6900–6914, Jul. 2012, doi: 10.1021/es2037405.

[27] B. Reidy, A. Haase, A. Luch, K. A. Dawson, and I. Lynch, "Mechanisms of silver nanoparticle release, transformation and toxicity: A critical review of current knowledge and recommendations for future studies and applications," *Materials (Basel).*, vol. 6, no. 6, pp. 2295–2350, 2013, doi: 10.3390/ma6062295.

[28] F. Eker, E. Akdaşçi, H. Duman, M. Bechelany, and S. Karav, "Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Plant Extracts: A Comprehensive Review of Physicochemical Properties and Multifunctional Applications," Jul. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/ijms26136222.

[29] R. Meenalotchani *et al.*, "Recent advances in silver nanoparticles for enhanced wound healing with mechanisms, formulations, and clinical insights," *J. Drug Deliv. Sci. Technol.*, vol. 114, p. 107437, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.jddst.2025.107437.

[30] P. N. Silva-Holguín, J. A. Garibay-Alvarado, and S. Y. Reyes-López, "Silver Nanoparticles: Multifunctional Tool in Environmental Water Remediation," *Materials (Basel).*, vol. 17, no. 9, 2024, doi: 10.3390/ma17091939.