Jurnal Sains dan Edukasi Sains
Vol. 9, No. 1, Februari 2026: 36–47
https://doi.org/10.24246/juses.v9i1p36-47

Nanopartikel perak (AgNPs) dalam formulasi sabun antibakteri: Tantangan formulasi dan arah riset masa depan

Dewi Kurnianingsih Arum Kusumahastuti[1]*, Karina Bianca Lewerisa[2], Emmanuel Hernanda Yustisia Susanto[1], Gecia Ovi Wulandari[1], Sevia Ester Sumilat[1]

[1]Jurusan Kimia, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Kristen Satya Wacana, Salatiga, Jawa Tengah 50711

[2]Jurusan Teknologi Pangan, Fakultas Ilmu Kesehatan, Universitas Kristen Satya Wacana, Salatiga, Jawa Tengah 50711

*email korespondensi: dewi.hastuti@uksw.edu

Diterima: 28 Februari 2026; **Direvisi**: 2 Maret 2026; **Disetujui**: 2 Maret 2026; **Diterbitkan**: 9 Maret 2026

ABSTRAK

Sabun merupakan salah satu produk pembersih yang berperan penting dalam pengendalian mikroorganisme. Penggunaan nanopartikel perak (AgNPs) sebagai agen antibakteri dalam formulasi sabun telah banyak dilaporkan, namun sebagian besar kajian masih berfokus pada sifat intrinsik AgNPs tanpa mempertimbangkan peran sistem sabun sebagai matriks aktif. Artikel ini bertujuan untuk meninjau secara kritis penggunaan AgNPs dalam formulasi sabun antibakteri dengan menekankan aspek formulasi dan relevansi aplikatif. Penulisan review ini menggunakan metode narrative review dengan pendekatan kritis, berdasarkan penelusuran literatur pada basis data Google Scholar, Scopus, dan ScienceDirect terhadap artikel yang dipublikasikan pada rentang tahun 2010–2024. Artikel yang direview diseleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang mencakup relevansi terhadap sistem sabun, formulasi berbasis surfaktan, dan evaluasi aktivitas antibakteri, dengan total sekitar 30–40 artikel utama dianalisis secara kualitatif. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa kinerja antibakteri AgNPs dalam sabun sangat dipengaruhi oleh interaksinya dengan surfaktan, kondisi pH basa, homogenitas dispersi, serta stabilitas selama penyimpanan dan penggunaan. Review ini mengidentifikasi kesenjangan penelitian utama terkait kurangnya pendekatan formulasi yang rasional, metode uji antibakteri yang aplikatif, serta minimnya kajian keamanan dan dampak lingkungan. Dengan demikian, artikel ini menawarkan kerangka konseptual dan arah riset masa depan untuk pengembangan sabun antibakteri berbasis AgNPs yang lebih efektif, stabil, dan berkelanjutan.

Kata-kata kunci: *Dispersi koloid; Interaksi permukaan; Stabilitas nanopartikel*

PENDAHULUAN

Peran Sabun dalam Pengendalian Mikroorganisme

Mekanisme dasar sabun

Sabun merupakan agen pembersih yang bekerja terutama melalui mekanisme fisikokimia, untuk keperluan mencuci dan kebersihan diri. Proses saponifikasi memegang peranan penting untuk menentukan daya bersih dan sifat emulsi dari sabun. Secara kimia, sabun adalah garam alkali dari asam lemak yang bersifat amfifilik, memiliki gugus hidrofilik dan hidrofobik. Struktur ini memungkinkan sabun berperan sebagai surfaktan yang mampu menurunkan tegangan permukaan air dan membentuk misel (Alum, 2024).

Dalam konteks pengendalian mikroorganisme, mekanisme utama sabun meliputi: (i) solubilisasi lipid dan protein pada membran sel mikroba, (ii) disrupsi lapisan lipid pada dinding sel bakteri dan selubung virus, serta (iii) pelepasan mikroorganisme dari permukaan kulit melalui proses pembilasan mekanis. Sabun juga efektif dalam melarutkan kotoran, sebum, dan materi organik lain yang menjadi tempat melekatnya mikroorganisme, sehingga secara tidak langsung menurunkan jumlah mikroba pada permukaan kulit (Santos Junior et al., 2022).

Efektivitas sabun dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti waktu kontak, intensitas penggosokan, suhu air, serta konsentrasi surfaktan. Pada kondisi penggunaan yang tepat, sabun konvensional telah terbukti mampu mengurangi beban mikroba secara signifikan, terutama melalui mekanisme pembersihan fisik (Al Qindy & Septiani, 2024).

Keterbatasan sabun konvensional

Meskipun efektif sebagai agen pembersih, sabun konvensional memiliki sejumlah keterbatasan dalam pengendalian mikroorganisme. Pertama, sabun tidak dirancang sebagai agen bakterisidal atau bakteristatik spesifik. Mikroorganisme yang tidak terlepas secara mekanis selama proses pencucian masih berpotensi bertahan hidup, terutama jika waktu kontak pencucian terlalu singkat atau proses pembilasan tidak optimal (Kabir et al., 2024).

Kedua, efektivitas sabun sangat bergantung pada perilaku pengguna. Dalam praktik sehari-hari, waktu mencuci tangan sering kali kurang dari 20 detik, sehingga proses disrupsi dan pelepasan mikroorganisme menjadi tidak maksimal. Selain itu, pada kondisi lingkungan dengan tingkat kontaminasi tinggi, sabun konvensional mungkin tidak cukup efektif untuk memberikan perlindungan tambahan terhadap mikroorganisme patogen (Chopin-Doroteo & Krötzsch, 2023).

Ketiga, sabun umumnya tidak memberikan efek antibakteri setelah pembilasan. Hal ini menyebabkan kulit kembali rentan terhadap kontaminasi mikroba segera setelah proses pencucian selesai. Keterbatasan ini mendorong pengembangan sabun dengan penambahan agen antibakteri untuk meningkatkan efektivitas perlindungan, terutama pada produk sabun cair dan sabun tangan yang digunakan secara intensif (Fadhlullah et al., 2022).

Nanomaterial sebagai agen antibakteri

Perkembangan nanoteknologi telah membuka peluang baru dalam pengendalian mikroorganisme, khususnya melalui pemanfaatan nanomaterial sebagai agen antibakteri. Nanomaterial didefinisikan sebagai material dengan ukuran partikel pada rentang 1–100 nm, yang memiliki sifat fisikokimia yang lebih unik dibandingkan material dalam skala makro (Kusumahastuti & Gintu, 2025; Vijay et al., 2023). Ukuran yang sangat kecil menghasilkan luas permukaan spesifik yang tinggi, sehingga meningkatkan reaktivitas dan interaksi dengan sel mikroorganisme.

Berbagai jenis nanomaterial telah dilaporkan memiliki aktivitas antibakteri, antara lain nanopartikel logam dan oksida logam seperti perak (Kusumahastuti et al., 2024), seng oksida (Lee et al., 2022), titanium dioksida (Xu et al., 2024), serta tembaga (Videira et al., 2024). Aktivitas antibakteri nanomaterial umumnya dikaitkan dengan beberapa mekanisme utama, meliputi kerusakan struktur dinding dan membran sel mikroba, pembentukan spesies oksigen reaktif (*reactive oxygen species*/ROS), serta gangguan terhadap fungsi protein dan materi genetik mikroorganisme. Mekanisme ini memungkinkan nanomaterial bekerja terhadap berbagai jenis bakteri, baik Gram-positif maupun Gram-negatif (Kasemets et al., 2023).

Dibandingkan dengan agen antibakteri konvensional, nanomaterial memiliki sejumlah keunggulan, antara lain: spektrum aktivitas yang luas, efektivitas pada konsentrasi relatif rendah, serta potensi menurunkan risiko resistensi mikroba. Oleh karena itu, nanomaterial banyak dieksplorasi dalam berbagai aplikasi, termasuk bidang medis (Pulipaka et al., 2023; Wibowo et al., 2024), tekstil (Phromphen et al., 2023), kemasan pangan (Bizymis et al., 2023), serta produk perawatan pribadi dan higiene (Bharathi et al., 2021). Namun demikian, penggunaan nanomaterial sebagai agen antibakteri juga menghadapi sejumlah tantangan. Stabilitas nanomaterial dalam sistem formulasi yang kompleks, potensi agregasi partikel, serta masalah keamanan terhadap kesehatan manusia dan lingkungan masih menjadi perhatian utama (Nielsen et al., 2022). Dalam produk berbasis surfaktan seperti sabun, interaksi antara nanomaterial dengan komponen formulasi dapat memengaruhi distribusi, aktivitas, dan stabilitas antibakteri nanomaterial tersebut (Bansod et al., 2015).

Di antara berbagai nanomaterial yang diteliti, nanopartikel perak menjadi salah satu kandidat paling banyak dilaporkan karena efektivitas antibakterinya yang tinggi dan kemampuannya untuk diaplikasikan pada berbagai matriks produk (Wei et al., 2022). Hal ini mendorong peningkatan minat penelitian terhadap penggunaan nanopartikel perak dalam formulasi sabun sebagai upaya untuk meningkatkan efektivitas pengendalian mikroorganisme. Oleh karena itu, meskipun sabun konvensional memiliki peran penting dalam menjaga kebersihan dan kesehatan, terdapat kebutuhan untuk meningkatkan kinerjanya melalui integrasi agen antibakteri yang efektif, stabil, dan aman. Dalam konteks ini, pemanfaatan nanopartikel perak sebagai aditif antibakteri dalam formulasi sabun menjadi topik yang semakin menarik untuk dikaji secara ilmiah.

Alasan Penggunaan AgNPs dalam Sabun

Nanopartikel perak (AgNPs) merupakan salah satu nanomaterial yang paling banyak dilaporkan memiliki aktivitas antibakteri yang kuat dan spektrum luas. AgNPs diketahui efektif terhadap berbagai bakteri Gram-positif dan Gram-negatif, termasuk mikroorganisme patogen yang umum ditemukan pada permukaan

kulit dan lingkungan. Aktivitas antibakteri AgNPs dikaitkan dengan kombinasi mekanisme fisik dan kimia, seperti interaksi langsung dengan dinding sel bakteri, pembentukan spesies oksigen reaktif, serta pelepasan ion Ag^+ yang mengganggu fungsi enzim dan materi genetik sel mikroba (Mikhailova, 2025).

Dari perspektif formulasi produk higiene, AgNPs memiliki beberapa keunggulan dibandingkan agen antibakteri konvensional. AgNPs relatif stabil terhadap suhu proses pembuatan sabun, memiliki aktivitas antibakteri pada konsentrasi rendah, dan tidak mudah terdegradasi selama penyimpanan. Selain itu, mekanisme antibakteri AgNPs yang berspektrum luas, dianggap berpotensi menurunkan risiko terbentuknya resistensi mikroorganisme, suatu isu yang semakin mendapat perhatian dalam penggunaan bahan antibakteri sintetik (Selvam et al., 2026).

Namun demikian, tingginya minat terhadap AgNPs dalam berbagai aplikasi tidak selalu diikuti dengan pendekatan formulasi yang komprehensif, khususnya dalam sistem pembuatan sabun. Sebagian besar penelitian yang melibatkan AgNPs masih berfokus pada aspek sintesis dan karakterisasi nanopartikel, sementara pembahasan mengenai perilaku AgNPs setelah dimasukkan ke dalam matriks sabun sering kali terbatas atau bahkan diabaikan. Padahal, sabun merupakan sistem surfaktan basa dengan kekuatan ionik yang tinggi, kondisi yang berpotensi memicu agregasi nanopartikel dan menurunkan efektivitas antibakteri AgNPs (Saputra et al., 2024).

Selain itu, konsentrasi AgNPs yang digunakan dalam formulasi sabun pada berbagai studi menunjukkan variasi yang sangat lebar, mulai dari puluhan hingga ribuan miligram per liter, sering kali tanpa justifikasi yang jelas terkait keamanan, stabilitas, maupun relevansi aplikatif (Oktaviani et al., 2024; Zulfa, 2024). Penggunaan konsentrasi yang terlalu tinggi tidak hanya berisiko menimbulkan masalah toksikologi dan lingkungan, tetapi juga dapat menimbulkan kesan efektivitas antibakteri yang bias dan sulit direplikasi.

Aspek lain yang jarang dikritisi adalah kesesuaian metode uji antibakteri dengan kondisi pemakaian sabun yang sebenarnya. Banyak laporan mengevaluasi aktivitas antibakteri AgNPs menggunakan metode kontak jangka panjang, yang tidak merepresentasikan penggunaan sabun dalam kehidupan sehari-hari dengan waktu kontak singkat dan adanya proses pembilasan (Shehu, Joshua, et al., 2025a). Hal ini menimbulkan pertanyaan mengenai relevansi praktis hasil yang dilaporkan.

Berdasarkan kondisi tersebut, meskipun AgNPs memiliki potensi besar sebagai agen antibakteri dalam sabun, masih terdapat kesenjangan signifikan antara klaim efektivitas yang dilaporkan dan pemahaman yang komprehensif mengenai perilaku, stabilitas, dan keamanan AgNPs dalam sistem sabun. Oleh karena itu, diperlukan suatu tinjauan literatur yang tidak hanya merangkum hasil penelitian terdahulu, tetapi juga secara kritis mengevaluasi tantangan formulasi, rasionalitas konsentrasi, dan relevansi metode pengujian AgNPs dalam aplikasi sabun. Pendekatan kritis inilah yang menjadi fokus utama dalam artikel review ini.

Tujuan dan Ruang Lingkup Review

Artikel review ini bertujuan untuk memberikan tinjauan komprehensif dan kritis mengenai penggunaan AgNPs sebagai agen antibakteri dalam formulasi sabun. Berbeda dengan sebagian besar tinjauan pustaka sebelumnya yang berfokus pada metode sintesis dan karakterisasi AgNPs, artikel ini secara khusus menitikberatkan pada aspek aplikatif AgNPs dalam sistem sabun, yang hingga saat ini masih relatif kurang mendapat perhatian.

Ruang lingkup review ini mencakup pembahasan mengenai karakteristik sistem sabun, termasuk sabun padat dan sabun cair berbasis surfaktan, serta tantangan formulasi yang muncul ketika AgNPs diintegrasikan ke dalam matriks sabun yang bersifat basa dan memiliki kekuatan ionik tinggi. Selain itu, artikel ini mengulas metode pencampuran dan pendispersian AgNPs dalam sabun, variasi konsentrasi yang digunakan dalam berbagai studi, serta metode evaluasi aktivitas antibakteri yang umum dilaporkan.

Lebih lanjut, review ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis secara kritis kesenjangan penelitian yang masih ada, khususnya terkait dengan stabilitas AgNPs dalam formulasi sabun, rasionalitas pemilihan konsentrasi AgNPs, kesesuaian metode uji antibakteri dengan kondisi pemakaian sabun yang sebenarnya, serta aspek keamanan dan dampak lingkungan. Dengan pendekatan kritis ini, artikel review diharapkan tidak hanya menjadi ringkasan perkembangan penelitian, tetapi juga memberikan perspektif evaluatif terhadap keterbatasan dan potensi bias dalam literatur yang ada.

Melalui penyusunan dan analisis literatur yang terstruktur, artikel ini diharapkan dapat menjadi rujukan bagi peneliti dalam merancang studi yang lebih relevan secara aplikatif, serta mendorong pengembangan sabun antibakteri berbasis AgNPs yang efektif, stabil, dan aman. Selain itu, hasil tinjauan ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan standar penelitian dan formulasi AgNPs dalam produk sabun, khususnya pada konteks penelitian dan pengembangan di tingkat nasional.

Metodologi Penulisan Review

Artikel ini disusun menggunakan metode narrative review dengan pendekatan kritis dan aplikatif. Penelusuran literatur dilakukan untuk mengidentifikasi dan menganalisis penelitian yang membahas penggunaan nanopartikel perak (AgNPs) sebagai agen antibakteri dalam formulasi sabun.

Pencarian artikel ilmiah dilakukan melalui basis data ilmiah utama, yaitu Google Scholar, Scopus, dan ScienceDirect, dengan kata kunci yang relevan, antara lain silver nanoparticles, AgNPs, antibacterial soap, soap formulation, dan kombinasi istilah terkait lainnya. Rentang tahun publikasi yang ditinjau mencakup 2010 hingga 2024, dengan fokus pada artikel yang melaporkan aplikasi AgNPs dalam sistem sabun atau sistem surfaktan yang relevan.

Kriteria inklusi dalam review ini meliputi: (i) artikel penelitian dan artikel review yang dipublikasikan dalam jurnal bereputasi; (ii) studi yang membahas sintesis, karakterisasi, atau aplikasi AgNPs dengan relevansi terhadap sistem sabun atau formulasi berbasis surfaktan; dan (iii) artikel yang melaporkan evaluasi aktivitas antibakteri AgNPs. Adapun kriteria eksklusi meliputi: (i) artikel yang hanya membahas AgNPs tanpa kaitan dengan sistem sabun atau aplikasi pembersih; (ii) publikasi non-ilmiah, prosiding tanpa penelaahan sejawat, dan laporan yang tidak tersedia dalam teks lengkap; serta (iii) artikel dengan informasi metodologis yang sangat terbatas.

Dari hasil penelusuran awal, diperoleh sejumlah artikel yang kemudian diseleksi berdasarkan relevansi dan kualitas ilmiah. Setelah proses penyaringan, sebanyak ±30–40 artikel utama digunakan sebagai referensi dalam penulisan review ini. Artikel-artikel tersebut dianalisis secara kualitatif dengan menekankan aspek formulasi, interaksi AgNPs dengan sistem sabun, stabilitas, metode uji antibakteri, serta implikasi keamanan dan keberlanjutan.

Pendekatan ini memungkinkan penyusunan review yang tidak hanya merangkum perkembangan penelitian, tetapi juga mengidentifikasi kesenjangan penelitian dan merumuskan arah riset masa depan yang lebih aplikatif.

SILVER NANOPARTICLES (AgNPs): KARAKTERISTIK UMUM

Metode Sintesis AgNPs

Nanopartikel perak dapat disintesis melalui berbagai metode, yang secara umum diklasifikasikan menjadi metode kimia, fisika, dan biologis (*green synthesis*). Metode kimia merupakan pendekatan yang paling banyak dilaporkan, umumnya melibatkan reduksi ion Ag^+ menggunakan agen pereduksi seperti sodium borohidrida, sitrat, atau asam askorbat. Metode ini relatif mudah dan menghasilkan AgNPs dengan ukuran yang terkontrol, namun sering kali melibatkan bahan kimia yang berpotensi berbahaya dan menghasilkan residu yang kurang ramah lingkungan (Aldakheel et al., 2023).

Sebagai alternatif, pendekatan *green synthesis* menggunakan ekstrak tanaman, mikroorganisme, atau limbah biomassa semakin banyak dikembangkan karena dianggap lebih ramah lingkungan dan berpotensi meningkatkan biokompatibilitas AgNPs. Dalam konteks aplikasi sabun, metode sintesis memiliki implikasi penting terhadap stabilitas dan keamanan AgNPs, karena sisa agen pereduksi atau *capping agent* dapat berinteraksi dengan komponen sabun. Namun demikian, sebagian besar studi yang melaporkan penggunaan AgNPs dalam sabun hanya menyebutkan metode sintesis secara deskriptif tanpa mengaitkannya dengan performa formulasi sabun secara mendalam.

Oleh karena itu, meskipun metode sintesis berperan dalam menentukan sifat awal AgNPs, karakteristik AgNPs setelah diformulasikan ke dalam sistem sabun menjadi aspek yang lebih relevan secara aplikatif dan perlu mendapat perhatian lebih dalam kajian literatur.

Mekanisme Antibakteri AgNPs

Aktivitas antibakteri AgNPs bersifat kompleks dan melibatkan lebih dari satu mekanisme kerja. AgNPs dapat berinteraksi secara langsung dengan dinding dan membran sel bakteri, menyebabkan perubahan permeabilitas dan kerusakan struktur sel. Selain itu, AgNPs diketahui mampu menghasilkan spesies oksigen reaktif (reactive oxygen species/ROS) yang memicu stres oksidatif dan kerusakan komponen seluler penting (Mikhailova, 2025).

Mekanisme lain yang sering dilaporkan adalah pelepasan ion perak (Ag^+) dari permukaan AgNPs, yang dapat berikatan dengan gugus fungsional pada protein dan enzim sel bakteri, sehingga mengganggu proses metabolisme dan replikasi sel. Kombinasi mekanisme fisik dan kimia ini menjadikan AgNPs efektif terhadap berbagai jenis mikroorganisme, termasuk bakteri Gram-positif dan Gram-negatif. Namun, dalam sistem sabun, mekanisme antibakteri AgNPs tidak dapat dipandang secara terpisah dari keberadaan surfaktan dan

kondisi basa. Interaksi antara AgNPs, ion perak, dan komponen sabun berpotensi memodifikasi mekanisme kerja AgNPs, baik secara sinergis maupun antagonis. Sayangnya, aspek ini masih jarang dibahas secara eksplisit dalam literatur yang ada.

Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Aktivitas Antibakteri AgNPs

Aktivitas antibakteri nanopartikel perak (AgNPs) dipengaruhi oleh berbagai faktor utama, antara lain ukuran partikel, bentuk, konsentrasi, serta stabilitas dispersi. Secara umum, AgNPs dengan ukuran partikel lebih kecil, khususnya pada kisaran 10–50 nm, dilaporkan menunjukkan aktivitas antibakteri yang lebih tinggi dibandingkan partikel berukuran lebih besar (>100 nm), karena memiliki luas permukaan spesifik yang lebih besar dan potensi interaksi yang lebih intens dengan dinding sel mikroorganisme. Beberapa studi menunjukkan bahwa penurunan ukuran AgNPs dari sekitar 80–100 nm menjadi <30 nm dapat meningkatkan efisiensi antibakteri hingga 2–4 kali lipat, tergantung pada jenis bakteri dan kondisi medium. Namun demikian, AgNPs berukuran sangat kecil juga lebih rentan terhadap agregasi, terutama dalam sistem dengan kekuatan ionik tinggi seperti sabun, yang dapat menyebabkan peningkatan ukuran hidrodinamik hingga >200 nm akibat aglomerasi (Girma et al., 2024).

Konsentrasi AgNPs merupakan faktor yang paling sering dilaporkan dalam literatur, namun juga paling jarang dikritisi secara mendalam. Peningkatan konsentrasi AgNPs umumnya dikaitkan dengan peningkatan aktivitas antibakteri, misalnya dengan penurunan jumlah koloni bakteri secara signifikan pada konsentrasi ≥50–100 mg/L. Akan tetapi, beberapa studi melaporkan bahwa peningkatan konsentrasi di atas ambang tertentu tidak lagi menghasilkan peningkatan efektivitas yang proporsional. Dalam sistem sabun, agregasi AgNPs pada konsentrasi tinggi dapat menyebabkan penurunan luas permukaan aktif, sehingga aktivitas antibakteri pada konsentrasi >200–500 mg/L tidak selalu lebih baik dibandingkan konsentrasi yang lebih rendah dan terdispersi dengan baik. Selain itu, penggunaan konsentrasi tinggi berpotensi meningkatkan risiko iritasi kulit dan dampak lingkungan, sehingga relevansi aplikatifnya perlu dikaji secara lebih kritis (Coskun & Kapdan, 2025).

Stabilitas dispersi AgNPs merupakan faktor kunci yang sering diabaikan, meskipun sangat menentukan konsistensi aktivitas antibakteri. AgNPs yang terdispersi secara homogen umumnya menunjukkan aktivitas antibakteri yang lebih stabil dan dapat direproduksi dibandingkan sistem yang mengalami sedimentasi atau agregasi. Secara kuantitatif, perubahan potensial zeta dari nilai stabil (misalnya $|\zeta| > 30$ mV) menjadi nilai yang lebih rendah dapat meningkatkan kecenderungan agregasi dan menurunkan aktivitas antibakteri secara signifikan. Dalam konteks sabun, stabilitas dispersi ini dipengaruhi oleh pH basa, keberadaan elektrolit, serta interaksi dengan surfaktan. Namun, sebagian besar studi belum melaporkan parameter stabilitas secara kuantitatif, seperti perubahan ukuran partikel atau potensial zeta selama penyimpanan, sehingga menyulitkan perbandingan antar studi dan penilaian objektif terhadap efektivitas antibakteri AgNPs dalam formulasi sabun.

Implikasi Karakteristik AgNPs terhadap Aplikasi dalam Sabun

Berdasarkan karakteristik umum AgNPs, dapat disimpulkan bahwa keberhasilan penggunaan AgNPs sebagai agen antibakteri dalam sabun tidak hanya ditentukan oleh aktivitas intrinsik nanopartikel, tetapi juga oleh perilakunya dalam matriks sabun. Faktor-faktor seperti stabilitas dispersi, interaksi dengan surfaktan, dan kondisi basa sabun memainkan peran penting dalam menentukan efektivitas akhir produk (Shehu, Joshua, et al., 2025a).

Oleh karena itu, pendekatan penelitian yang hanya menekankan pada sintesis dan karakterisasi AgNPs sebelum formulasi menjadi kurang memadai untuk aplikasi sabun. Diperlukan pemahaman yang lebih mendalam mengenai bagaimana karakteristik AgNPs berubah setelah diformulasikan, serta bagaimana perubahan tersebut memengaruhi aktivitas antibakteri dan keamanan produk. Pemahaman ini menjadi landasan penting untuk pembahasan lebih lanjut mengenai sistem sabun dan tantangan formulasi AgNPs yang akan dibahas pada bagian selanjutnya.

SISTEM SABUN DAN TANTANGAN FORMULASI AgNPs

Sistem Sabun sebagai Matriks Aktif, Bukan Sekadar Medium

Sebagian besar literatur yang membahas AgNPs sebagai agen antibakteri cenderung memperlakukan sabun hanya sebagai medium pasif atau bahan pembawa. Pendekatan ini kurang tepat karena sabun mempunyai sistem kimia aktif yang terdiri dari surfaktan, elektrolit, air, dan aditif lain seperti humektan atau

pewangi. Komponen-komponen ini tidak hanya memengaruhi stabilitas fisik AgNPs, tetapi juga berpotensi mengubah mekanisme antibakterinya.

Dalam sistem sabun, surfaktan berfungsi menurunkan tegangan permukaan dan melisiskan membran mikroorganisme. Ketika AgNPs ditambahkan, makan akan terjadi tumpang tindih mekanisme kerja antara surfaktan dan nanopartikel. Namun, interaksi ini jarang dikaji secara sistematis. Banyak studi hanya membandingkan aktivitas antibakteri sabun dengan dan tanpa AgNPs, tanpa mengevaluasi apakah peningkatan efektivitas berasal dari sinergi, aditivitas semu, atau sekadar efek dominan surfaktan (Shehu, Okunola, et al., 2025b). Hal ini menyebabkan klaim "peningkatan aktivitas antibakteri akibat AgNPs" sering kali tidak didukung oleh analisis mekanistik yang memadai.

Interaksi AgNPs dengan Surfaktan Sabun

Surfaktan dalam sabun, dapat berupa anionik, nonionik, maupun amfoterik, akan berinteraksi dengan AgNPs melalui adsorpsi fisik maupun interaksi elektrostatik. Interaksi ini berpotensi bertindak sebagai *capping agent* tidak terkontrol yang mempengaruhi ukuran efektif, muatan permukaan, dan stabilitas dispersi AgNPs.

Di satu sisi, adsorpsi surfaktan pada permukaan AgNPs dapat meningkatkan stabilitas dispersi dan mencegah agregasi. Di sisi lain, lapisan surfaktan yang terlalu tebal berpotensi menghambat kontak langsung AgNPs dengan dinding sel mikroorganisme, sehingga menurunkan efektivitas antibakteri. Kondisi ini menciptakan paradoks formulasi: stabilitas fisik yang tinggi tidak selalu sejalan dengan aktivitas biologis yang optimal (Shehu, Joshua, et al., 2025a). Sebagian besar penelitian tidak membedakan antara AgNPs "aktif biologis" dan AgNPs yang hanya "stabil secara fisik" dalam sistem sabun. Kekosongan ini membuka ruang penting bagi kajian yang lebih aplikatif dan berorientasi formulasi.

Pengaruh pH dan Lingkungan Basa Sabun

Sabun umumnya memiliki pH basa, biasanya berada pada kisaran pH 9–11, yang secara langsung memengaruhi perilaku dan stabilitas nanopartikel perak (AgNPs). Lingkungan basa diketahui memengaruhi laju pelepasan ion Ag^+, yang merupakan salah satu komponen utama mekanisme antibakteri AgNPs. Beberapa studi melaporkan bahwa peningkatan pH dari netral menuju basa dapat menurunkan pelepasan Ag^+ secara signifikan, akibat terbentuknya spesies perak yang kurang larut, seperti perak oksida atau hidroksida, sehingga menurunkan ketersediaan Ag^+ yang aktif secara biologis. Sebagai contoh, pada kondisi basa (pH > 9), pelepasan ion Ag^+ dari AgNPs dilaporkan dapat menurun hingga lebih dari 50% dibandingkan kondisi mendekati netral, tergantung pada ukuran partikel dan jenis penstabil yang digunakan.

Selain memengaruhi pelepasan ion, pH basa juga berdampak pada muatan permukaan AgNPs dan stabilitas koloidnya. Nilai potensial zeta AgNPs dapat berubah secara signifikan pada lingkungan basa, yang berpotensi menurunkan gaya tolak elektrostatik antarpartikel dan meningkatkan kecenderungan agregasi (Bagyalakshmi et al., 2024). Agregasi ini dapat menyebabkan peningkatan ukuran partikel efektif dan penurunan luas permukaan aktif, yang pada akhirnya berdampak pada efektivitas antibakteri. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih terbatas pada pelaporan pH akhir formulasi sabun, tanpa disertai pengukuran kuantitatif perubahan karakteristik AgNPs, seperti ukuran partikel, potensial zeta, atau laju pelepasan Ag^+, serta korelasinya dengan kinerja antibakteri. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan yang jelas antara karakterisasi kimia AgNPs dan evaluasi fungsi produk sabun secara komprehensif.

Stabilitas AgNPs Selama Penyimpanan dan Penggunaan

Tantangan formulasi AgNPs dalam sabun tidak berhenti pada tahap pembuatan, tetapi berlanjut selama penyimpanan dan penggunaan. Fluktuasi suhu, paparan cahaya, serta perubahan komposisi akibat penguapan air dapat memengaruhi stabilitas AgNPs dalam jangka waktu tertentu.

Agregasi AgNPs selama penyimpanan dapat menyebabkan penurunan aktivitas antibakteri yang signifikan, meskipun konsentrasi total perak tidak berubah (Oktaviani et al., 2024). Selain itu, distribusi AgNPs yang tidak homogen dalam produk dapat menyebabkan variasi efektivitas pada saat penggunaan. Aspek ini sangat jarang dilaporkan, padahal relevan secara langsung terhadap kualitas dan konsistensi produk sabun antibakteri. Data stabilitas yang masih terbatas pada jangka menengah dan panjang membuat penilaian kelayakan AgNPs sebagai bahan aktif dalam produk sabun komersial, khususnya dari sudut pandang keandalan performa belum memadai.

Tantangan Keamanan dan Relevansi Aplikasi

Meskipun AgNPs dikenal efektif sebagai agen antibakteri, penggunaannya dalam sabun harus mempertimbangkan aspek keamanan kulit dan lingkungan. Dalam sistem sabun, AgNPs berpotensi terlepas ke lingkungan air setelah pembilasan, sehingga meningkatkan kekhawatiran terkait akumulasi nanopartikel dan toksisitas terhadap organisme non-target (Kister et al., 2023).

Selain itu, sebagian besar studi masih menggunakan konsentrasi AgNPs yang relatif tinggi untuk menunjukkan efektivitas antibakteri, tanpa mempertimbangkan apakah konsentrasi tersebut realistis dan aman untuk aplikasi harian. Hal ini menunjukkan bahwa fokus penelitian masih cenderung pada pembuktian konsep (*proof-of-concept*), bukan pada optimasi formulasi yang berkelanjutan dan aplikatif. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan formulasi yang menekankan efisiensi, yaitu mencapai aktivitas antibakteri yang memadai dengan konsentrasi AgNPs serendah mungkin, tanpa mengorbankan stabilitas dan keamanan produk.

Posisi Kritis Bab Ini dalam Novelty Review

Bab ini menempatkan sistem sabun sebagai komponen aktif yang menentukan keberhasilan aplikasi AgNPs, bukan sekadar latar belakang formulasi. Dengan menyoroti interaksi kompleks antara AgNPs, surfaktan, pH, dan stabilitas produk, review ini menggeser fokus dari "apa yang dapat dilakukan AgNPs" menjadi "bagaimana AgNPs benar-benar bekerja dalam produk nyata". Pendekatan ini menegaskan bahwa tantangan utama dalam pengembangan sabun berbasis AgNPs bukan terletak pada sintesis nanopartikel, melainkan pada pemahaman dan pengendalian perilaku AgNPs dalam sistem sabun yang dinamis dan kompleks. Perspektif ini menjadi dasar kuat untuk merumuskan arah penelitian selanjutnya yang lebih aplikatif dan relevan dengan kebutuhan industri serta isu keberlanjutan.

STRATEGI FORMULASI DAN ARAH RISET MASA DEPAN SABUN BERBASIS AgNPs

Peralihan Paradigma: Dari Penambahan AgNPs ke Rekayasa Sistem Sabun

Sebagian besar penelitian terdahulu menerapkan pendekatan aditif, yaitu dengan menambahkan AgNPs ke dalam formulasi sabun yang sudah ada, kemudian mengevaluasi peningkatan aktivitas antibakteri. Pendekatan ini bersifat sederhana namun memiliki keterbatasan, karena tidak mempertimbangkan sabun sebagai sistem kimia kompleks yang memengaruhi perilaku AgNPs. Arah riset masa depan perlu bergeser menuju rekayasa sistem sabun, di mana komposisi surfaktan, pH, viskositas, dan kekuatan ionik dirancang secara spesifik untuk mengoptimalkan stabilitas dan aktivitas AgNPs. Dengan pendekatan ini, AgNPs tidak lagi diposisikan sebagai bahan tambahan semata, tetapi sebagai bagian integral dari sistem aktif sabun. Paradigma ini membuka peluang untuk mencapai efektivitas antibakteri yang tinggi dengan konsentrasi AgNPs yang lebih rendah, sehingga lebih aman dan berkelanjutan.

Strategi Pendispersian dan Stabilitas AgNPs dalam Sabun

Salah satu tantangan utama dalam formulasi sabun berbasis AgNPs adalah mencapai dispersi yang homogen dan stabil. AgNPs dalam bentuk serbuk kering cenderung mengalami aglomerasi ketika ditambahkan langsung ke matriks sabun, terutama pada sistem dengan viskositas tinggi atau kandungan elektrolit yang signifikan. Strategi formulasi yang perlu dikaji lebih lanjut meliputi:

1. Pra-dispersi AgNPs dalam medium berair sebelum pencampuran dengan basis sabun.
2. Pemanfaatan surfaktan sabun sebagai agen stabilisasi, dengan kontrol rasio surfaktan terhadap AgNPs.
3. Optimasi urutan pencampuran, karena tahap penambahan AgNPs dapat memengaruhi distribusi dan stabilitasnya.

Penelitian di masa depan perlu mengaitkan stabilitas fisik dispersi AgNPs dengan performa antibakteri aktual, bukan hanya mengandalkan karakterisasi ukuran partikel awal.

Optimasi Konsentrasi: Efisiensi, Bukan Sekadar Efektivitas

Literatur yang ada menunjukkan variasi konsentrasi AgNPs yang sangat luas dalam sabun, mulai dari level sangat rendah hingga relatif tinggi. Namun, justifikasi pemilihan konsentrasi sering kali tidak didasarkan pada kebutuhan aplikasi nyata, melainkan pada tujuan menunjukkan aktivitas antibakteri maksimum. Arah riset yang lebih relevan adalah pendekatan optimasi berbasis efisiensi, yaitu menentukan konsentrasi minimum AgNPs yang masih memberikan aktivitas antibakteri yang signifikan dalam kondisi penggunaan sabun yang sebenarnya. Pendekatan ini penting untuk: meminimalkan potensi toksisitas, menekan biaya

produksi, serta mengurangi beban lingkungan. Penelitian komparatif antara berbagai rentang konsentrasi AgNPs dalam satu sistem sabun yang sama masih sangat terbatas dan menjadi peluang riset yang signifikan.

Relevansi Metode Uji dengan Kondisi Pemakaian Nyata

Sebagian besar evaluasi antibakteri AgNPs dalam sabun masih menggunakan metode uji konvensional yang tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi pemakaian aktual, seperti waktu kontak yang terlalu lama atau konsentrasi sabun yang tidak realistis. Riset masa depan perlu mengembangkan dan menerapkan metode uji yang lebih aplikatif, misalnya dengan waktu kontak singkat, simulasi proses pembilasan, atau penggunaan model kulit buatan. Pendekatan ini akan menghasilkan data yang lebih relevan untuk menilai kinerja sabun antibakteri berbasis AgNPs dalam praktik sehari-hari. Tanpa pendekatan uji yang realistis, klaim efektivitas antibakteri berisiko menjadi berlebihan dan sulit diterjemahkan ke produk nyata.

Aspek Keamanan dan Keberlanjutan sebagai Arah Utama

Keamanan pengguna dan dampak lingkungan merupakan isu krusial dalam pengembangan sabun berbasis AgNPs. AgNPs yang terlepas selama penggunaan berpotensi masuk ke lingkungan perairan dan berinteraksi dengan organisme non-target. Oleh karena itu, riset masa depan perlu mempertimbangkan keseimbangan antara efektivitas antibakteri dan risiko lingkungan. Pendekatan yang dapat dikembangkan meliputi: penggunaan konsentrasi AgNPs serendah mungkin, integrasi AgNPs dengan komponen alami antibakteri untuk efek sinergis, serta evaluasi dampak lingkungan secara kualitatif maupun kuantitatif. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip keberlanjutan dan dapat meningkatkan penerimaan publik terhadap produk berbasis nanomaterial.

Kerangka Konseptual untuk Pengembangan Sabun Berbasis AgNPs

Berdasarkan tinjauan kritis dalam review ini, pengembangan sabun berbasis AgNPs idealnya didasarkan pada kerangka konseptual yang mencakup keterkaitan antara sistem sabun, karakteristik AgNPs, metode formulasi, aktivitas antibakteri, serta aspek keamanan dan keberlanjutan. Kerangka ini menegaskan bahwa keberhasilan aplikasi AgNPs tidak hanya ditentukan oleh sifat intrinsik nanopartikel, tetapi juga oleh desain sistem sabun secara keseluruhan. Dengan kerangka konseptual ini, penelitian selanjutnya dapat diarahkan secara lebih terstruktur dan berorientasi solusi.

Implikasi terhadap *Novelty Review*

Bab ini menempatkan review tidak hanya sebagai ringkasan literatur, tetapi sebagai peta arah riset yang realistis dan aplikatif. Dengan mengintegrasikan aspek formulasi, efisiensi, relevansi uji, dan keberlanjutan, review ini menawarkan perspektif yang jarang diangkat dalam kajian AgNPs sebelumnya. Pendekatan ini memperkuat posisi artikel sebagai referensi strategis bagi peneliti dan pengembang produk sabun antibakteri berbasis AgNPs, sekaligus membuka ruang pengembangan riset lanjutan yang lebih berdampak.

KESENJANGAN PENELITIAN DAN REKOMENDASI SPESIFIK UNTUK PENELITIAN MENDATANG

Kesenjangan dalam Pemahaman Peran AgNPs di dalam Sistem Sabun

Literatur yang ada masih didominasi oleh pendekatan yang memperlakukan AgNPs sebagai agen antibakteri independen, tanpa mempertimbangkan secara mendalam interaksinya dengan sistem sabun. Sebagian besar studi tidak membedakan antara kontribusi aktivitas antibakteri surfaktan sabun dan kontribusi AgNPs secara spesifik. Akibatnya, peningkatan aktivitas antibakteri sering kali dikaitkan langsung dengan keberadaan AgNPs, meskipun mekanisme sinergi atau dominasi salah satu komponen tidak pernah diuji secara sistematis. Penelitian mendatang perlu merancang studi komparatif yang secara eksplisit memisahkan efek sabun sebagai surfaktan dan efek AgNPs, misalnya melalui pengujian sistem kontrol dengan komposisi sabun identik tetapi tanpa AgNPs, serta evaluasi parameter mekanistik seperti laju pelepasan ion Ag^{+}.

Kesenjangan dalam Strategi Pendispersian dan Homogenitas AgNPs

Sebagian besar publikasi tidak melaporkan secara rinci metode pendispersian AgNPs dalam sabun, khususnya ketika AgNPs digunakan dalam bentuk serbuk kering. Informasi mengenai urutan pencampuran, energi pengadukan, dan evaluasi homogenitas sering kali diabaikan. Kondisi ini menyulitkan reproduktibilitas dan menimbulkan ketidakpastian terhadap distribusi AgNPs di dalam produk. Diperlukan studi sistematis

yang mengevaluasi berbagai strategi pendispersian AgNPs, termasuk pra-dispersi, penggunaan surfaktan sebagai penstabil, serta pengaruh viskositas sabun terhadap homogenitas. Evaluasi perlu dikaitkan langsung dengan performa antibakteri dan stabilitas jangka menengah.

Kesenjangan dalam Justifikasi dan Standarisasi Konsentrasi AgNPs

Rentang konsentrasi AgNPs yang digunakan dalam sabun sangat bervariasi dan sering kali tidak disertai justifikasi berbasis aplikasi nyata. Banyak studi menggunakan konsentrasi tinggi untuk memastikan efek antibakteri yang jelas, tanpa mempertimbangkan aspek keamanan, biaya, dan dampak lingkungan. Penelitian ke depan perlu mengadopsi pendekatan optimasi konsentrasi berbasis efisiensi, dengan fokus pada konsentrasi minimum efektif. Studi yang membandingkan beberapa tingkat konsentrasi AgNPs dalam satu sistem sabun yang sama akan sangat bernilai untuk menghasilkan rekomendasi formulasi yang lebih rasional.

Kesenjangan dalam Metode Uji Antibakteri yang Aplikatif

Metode uji antibakteri yang digunakan dalam banyak studi belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi pemakaian sabun yang sebenarnya, seperti waktu kontak yang singkat dan proses pembilasan. Hal ini berpotensi menghasilkan overestimasi efektivitas antibakteri AgNPs dalam konteks penggunaan sehari-hari. Perlu dikembangkan metode uji antibakteri yang lebih aplikatif, termasuk simulasi waktu kontak realistis, pengenceran selama pembilasan, dan evaluasi efektivitas setelah siklus penggunaan berulang. Pendekatan ini akan meningkatkan relevansi hasil penelitian terhadap aplikasi praktis.

Kesenjangan dalam Evaluasi Stabilitas Jangka Menengah dan Panjang

Sebagian besar penelitian hanya melaporkan karakteristik awal formulasi sabun berbasis AgNPs, tanpa data stabilitas selama penyimpanan. Padahal, agregasi atau redistribusi AgNPs selama waktu simpan dapat secara signifikan memengaruhi performa produk. Penelitian mendatang perlu memasukkan evaluasi stabilitas jangka menengah, termasuk perubahan ukuran partikel, distribusi, dan aktivitas antibakteri selama periode penyimpanan tertentu. Data ini penting untuk menilai kelayakan AgNPs dalam aplikasi sabun skala produk.

Kesenjangan dalam Aspek Keamanan dan Dampak Lingkungan

Meskipun AgNPs dikenal efektif sebagai antibakteri, kajian mengenai keamanan kulit dan dampak lingkungan dari sabun berbasis AgNPs masih sangat terbatas. Risiko pelepasan nanopartikel ke lingkungan perairan setelah penggunaan jarang dibahas secara kuantitatif. Penelitian mendatang perlu mengintegrasikan evaluasi keamanan dan keberlanjutan, misalnya melalui pengujian toksisitas sederhana, pendekatan *life-cycle thinking*, atau penggunaan kombinasi AgNPs dengan agen antibakteri alami untuk menurunkan dosis perak.

Sintesis Kesenjangan sebagai Landasan Riset Mendatang

Secara keseluruhan, kesenjangan penelitian yang teridentifikasi menunjukkan bahwa tantangan utama dalam pengembangan sabun berbasis AgNPs bukan terletak pada efektivitas antibakteri AgNPs itu sendiri, melainkan pada integrasinya ke dalam sistem sabun yang kompleks dan dinamis. Kebutuhan akan pendekatan formulasi yang rasional, efisien, dan berkelanjutan menjadi semakin mendesak.

Review ini menegaskan bahwa penelitian mendatang perlu bergerak melampaui pembuktian konsep menuju pengembangan sistem sabun berbasis AgNPs yang benar-benar aplikatif. Dengan mengisi kesenjangan yang telah diidentifikasi, riset di bidang ini berpotensi menghasilkan kontribusi ilmiah yang lebih bermakna dan berdampak luas, baik bagi pengembangan ilmu pengetahuan maupun aplikasi industri.

KESIMPULAN

Review ini menegaskan bahwa kinerja antibakteri nanopartikel perak (AgNPs) dalam formulasi sabun tidak hanya ditentukan oleh sifat intrinsik AgNPs, tetapi juga oleh interaksinya dengan sistem sabun yang bersifat aktif secara kimia. Sebagian besar penelitian yang ada masih kurang memperhatikan aspek formulasi, seperti interaksi dengan surfaktan, pengaruh lingkungan basa, homogenitas dispersi, stabilitas selama penyimpanan, serta relevansi metode uji terhadap kondisi pemakaian nyata, sehingga membatasi nilai aplikatif hasil penelitian. Dengan mengidentifikasi kesenjangan penelitian dan merumuskan arah riset berbasis formulasi dan keberlanjutan, review ini memberikan kerangka konseptual untuk pengembangan sabun antibakteri berbasis AgNPs yang lebih efektif, stabil, dan bertanggung jawab terhadap lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Direktorat Riset, Inovasi dan Kewirausahaan dari Universitas Kristen Satya Wacana melalui Hibah Penelitian Terapan dengan nomor 110/SPK-PT/RIK/07/2025 yang telah memberikan dukungan pendanaan sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

Al Qindy, W. H., & Septiani, D. (2024). Effect of using natural liquid soap on the effectiveness of staphylococcus aureus bacteria control and skin health: A review. *Jurnal Pijar Mipa*. 19(6), 1010–1017. https://doi.org/10.29303/jpm.v19i6.7879

Aldakheel, F. M., Sayed, M. M. E., Mohsen, D., Fagir, M. H., & El Dein, D. K. (2023). Green synthesis of silver nanoparticles loaded hydrogel for wound healing: Systematic review. *Gels*, *9*(7), 530. https://doi.org/10.3390/gels9070530

Alum, B. N. (2024). Saponification process and soap chemistry. *INOSR Applied Sciences*, *12*(2), 51–56. https://doi.org/10.59298/inosras/2024/12.2.515600

Bansod, S. D., Bawaskar, M. S., Gade, A. K., & Rai, M. K. (2015). Development of shampoo, soap and ointment formulated by green synthesised silver nanoparticles functionalised with antimicrobial plants oils in veterinary dermatology: Treatment and prevention strategies. *IET Nanobiotechnology*, *9*(4), 165–171. https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2014.0042

Bharathi, S., Ramesh, B., Kumaran, S., Radhakrishnan, M., Saravanan, D., Saravanan, P., Pugazhvendan, S. R., & Nalinasundari, M. S. (2021). Development of nanobiomaterial for wound healing based on silver nanoparticles loaded on chitosan hydrogel. *3 Biotech*, *11*(12), 490. https://doi.org/10.1007/s13205-021-03030-0

Bizymis, A.-P., Kalantzi, S., Mamma, D., & Tzia, C. (2023). Addition of silver nanoparticles to composite edible films and coatings to enhance their antimicrobial activity and application to cherry preservation. *Foods*, *12*(23), 4295. https://doi.org/10.3390/foods12234295

Chopin-Doroteo, M., & Krötzsch, E. (2023). Soap or alcohol-based products? The effect of hand hygiene on skin characteristics during the COVID-19 pandemic. *Journal of Cosmetic Dermatology*, *22*(2), 347–353. https://doi.org/10.1111/jocd.15523

Coskun, Y., & Kapdan, G. (2025). Silver Nanoparticles (AgNPs) act as nanoelicitors in Melissa officinalis to enhance the production of some important phenolic compounds and essential oils. *Flavour and Fragrance Journal*, *40*(2), 278–288. https://doi.org/10.1002/ffj.3823

Fadhlullah, M., Soeprijadi, L., Ratnaningtyas, S., & Mukhaimin, I. (2022). The application of seaweed Gracilaria verrucosa in Karawang, Indonesia, as an enrichment material for antibacterial soap production. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, *21*(3), 769–784. https://doi.org/10.22092/ijfs.2022.351015.0

Girma, A., Mebratie, G., Mekuye, B., Abera, B., Bekele, T., & Alamnie, G. (2024). Antibacterial capabilities of metallic nanoparticles and influencing factors. *Nano Select*, *5*(12), e202400049. https://doi.org/10.1002/nano.202400049

Bagyalakshmi, J., Navaneethkrishnan, C., & Priya, K. (2024). Formulation and evaluation of soapfilm incorporated with green synthesized Azadirachta indica silver nanoparticles. *Nano Particle*, *5*(1), 13. https://doi.org/10.35702/nano.10013

Kabir, F. M., Uduma, A. U., & Uduma, M. B. (2024). An overview of the chemistry and utilization of detergents, both soap and non-soap. *Journal of Science Research and Reviews*, *1*(2), 72–80. https://doi.org/10.70882/josrar.2024.v1i2.62

Kasemets, K., Laanoja, J., Sihtmäe, M., Vija, H., Kurvet, I., Otsus, M., & Kahru, A. (2023). Silver–chitosan nanocomposites for biomedical application: Design, synthesis and antimicrobial efficiency. *Proceedings*, *92*(1), 40. https://doi.org/10.3390/proceedings2023092040

Kister, J. M., Lowe, C. N., & Butt, K. R. (2023). Potential ecotoxicological effects of silver nanoparticles and silver sulphide on the endogeic earthworm Aporrectodea caliginosa (Savigny 1826). *Ecotoxicology*, *32*(9), 1152–1161. https://doi.org/10.1007/s10646-023-02705-z

Kusumahastuti, D. K. A., Aminu, N. R., & Jumiyati. (2024). Green synthesis of silver nanoparticles with snake fruit peel extract: a preliminary study for optimization of the preparation technique. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, *10*(5), 2817–2823. https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i5.7481

Kusumahastuti, D. K. A., & Gintu, A. R. (2025). Green nanotechnology: Silver nanoparticle synthesis via brewed coffee grounds extract. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, *105*, 241–247. https://doi.org/10.1007/s10847-025-01294-0

Lee, Y.-L., Shih, Y.-S., Chen, Z.-Y., Cheng, F.-Y., Lu, J.-Y., Wu, Y.-H., & Wang, Y.-J. (2022). Toxic effects and mechanisms of silver and zinc oxide nanoparticles on zebrafish embryos in aquatic ecosystems. *Nanomaterials*, *12*(4), 717. https://doi.org/10.3390/nano12040717

Mikhailova, E. O. (2025). Green silver nanoparticles: An antibacterial mechanism. *Antibiotics*, *14*(1), 5. https://doi.org/10.3390/antibiotics14010005

Nielsen, M. B., Vavra, J., Palmqvist, A., & Forbes, V. E. (2022). Long-term effects of sediment-associated silver nanoparticles and silver nitrate on the deposit-feeding polychaete Capitella teleta. *Aquatic Toxicology*, *242*. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2021.106046

Oktaviani, N. A., Riyanta, A. B. , & Kusnadi, K. (2024). Pengaruh metode ekstraksi terhadap sifat fisik dan stabilitas sabun nano Ag-daun turi (Sesbania grandiflora). *Jurnal Insan Cendekia*, *11*(1), 44–53. https://doi.org/10.35874/jic.v11i1.1323

Phromphen, P., Sukatta, U., Rugthaworn, P., Boonyarit, J., Phoophat, P., Rungruangkitkrai, N., Tuntariyanond, P., Chartvivatpornchai, N., Apipatpapha, T., & Chollakup, R. (2023). Biosynthesis of silver nanoparticles enhanced antibacterial silk face covering. *Journal of Natural Fibers*, *20*(2), 2212926. https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2212926

Pulipaka, S., Suttee, A., Ravi Kumar, M., & Kasarla, R. (2023). Exploration of in-vitro antidiabetic activity of ZnO NPs and Ag NPs synthesized using methanolic extracts of Alpinia mutica and Tradescantia spathaeca leaves. *International Journal of Pharmaceutical Quality Assurance*, *14*(3), 464–469. https://doi.org/10.25258/ijpqa.14.3.01

Santos Junior, C. J., Lins, F. C. C. O., Santos, P. O., Silva, V. B., Barros, Y. V. R., Araújo, M. A. S., Rocha, T. J. M., & Souza, A. K. P. (2022). Evaluation of antibacterial and antifungal activity of antimicrobial soaps. *Brazilian Journal of Biology*. https://doi.org/10.1590/1519-6984.263364

Saputra, A. C., Wiratama, E. S., Mayangsari, F., Divinka Oktafinantyas, V., & Handayani, S. (2024). Production, quality test, and activity evaluation of methanol extract and nanoparticles from Pluchea indica (L.) leaves as additives in natural soap against Propionibacterium acnes. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, *27*(2), 91–100 https://doi.org/10.14710/jksa.27.2.91-100

Selvam, K., Ragu Prasath, A., & Alanazi, A. K. (2026). A review of recent developments in green synthesis of silver nanoparticles: Antioxidant and antibacterial applications. *Microscopy Research and Technique*, *89*(1), 134–147 https://doi.org/10.1002/jemt.70060

Shehu, A., Joshua, O. O., & Uduma, U. A. (2025a). Comparative study of the physicochemical, antimicrobial

and stability properties of silver, copper and zinc nanoparticle soaps. *Discover Chemistry*, *2*, 353. https://doi.org/10.1007/s44371-025-00460-0

Shehu, A., Okunola, O. J., & Uduma, U. A. (2025b). Development and characterization of nano-enhanced soap with enhanced physicochemical and antimicrobial properties. *Fudma Journal of Sciences*, *9*(1), 196–204 https://doi.org/10.33003/fjs-2025-0901-3029

Videira, V. D. C. G., Harada, B. N., Vital, V. G., da Silva, R. A. G., de Vasconcellos, S. P., & Pellosi, D. S. (2024). Structural and antibacterial evaluation of copper, silver, and bimetallic silver/copper nanoalloys synthesized in chitosan biopolymer. *Next Materials*, *3*. https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2023.100071

Vijay, R., Drisya, V. M., Selta, D. R. F., Rathi, M. A., Gopalakrishnan, V. K., Alkhalifah, D. H. M., & Hozzein, W. N. (2023). Synthesis and characterization of silver nanomaterial from aqueous extract of Commelina forskaolii and its potential antimicrobial activity against Gram negative pathogens. *Journal of King Saud University - Science*, *35*(1). https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102373

Wei, Z., Xu, S., Jia, H., & Zhang, H. (2022). Green synthesis of silver nanoparticles from Mahonia fortunei extracts and characterization of its inhibitory effect on Chinese cabbage soft rot pathogen. *Frontiers in Microbiology*, *13*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1030261

Wibowo, N. A., Kurniawan, C., Kusumahastuti, D. K. A., Setiawan, A., & Suharyadi, E. (2024). Review—Potential of tunneling magnetoresistance coupled to iron oxide nanoparticles as a novel transducer for biosensors-on-chip. *Journal of The Electrochemical Society*. https://doi.org/10.1149/1945-7111/ad1f35

Xu, L., Pei, H., Qian, Q., Shi, X., Bang, L. T., Li, B., & Wang, Y. (2024). Fabrication of silver-containing antibacterial coating on titanium by alkaline-heat treatment and hydrothermal sterilization. *Journal of Materials Research and Technology*, *33*, 5863–5873. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.10.217

Zulfa, H. (2024). Pengaruh basis CMC-Na terhadap formulasi sifat fisik dan stabilitas sabun nanopartikel AgNO3 ekstrak daun turi (Sesbania grandiflora). *Jurnal Dunia Farmasi*, 8(2), 130–142 https://doi.org/10.33085/jdf.v8i2.6067