JURNAL KIMIA MULAWARMAN
Vol 24, No. 1, Jun - Des 2026 pp. 35-42
https://jurnal.kimia.fmipa.unmul.ac.id/index.php/JKM
P-ISSN 1693-5616 E-ISSN 2476-9258

Synthesis and Characterization of Hydroxyapatite/Poly(vinyl alcohol)/Silver Nanoparticles (nHA/PVA/AgNPs) Composite Membranes and Evaluation of Their Antibacterial Activity

Moh Syaiful Arif [a*], Nurdahlia [a], Alimuddin [a], Ika Yekti [a], Nanang Tri Widodo [a], Saibun Sitorus [a], Abdul Aziz [a], Ritbey Ruga [a]

[a] Department of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Mulawarman University, Jalan Barong Tongkok No. 4 Gunung Kelua, Samarinda 75123, East Kalimantan, Indonesia
* Corresponding Author :mohsyaifularif@fmipa.unmul.ac.id

ABSTRACT

This study investigates the fabrication and preliminary evaluation of the antibacterial activity of hydroxyapatite/poly(vinyl alcohol)/silver nanoparticles((nHA/PVA/AgNPs) composite membranes. Silver nanoparticles were synthesized by citrate-mediated chemical reduction, while hydroxyapatite was prepared through electrolysis at voltages of 4, 5, and 6 V. AgNPs formation was monitored using UV-Vis spectrophotometry, and nHA was characterized using X-ray diffraction (XRD) and dynamic light scattering (DLS). Composite membranes with nominal AgNPs additions of 10%, 15%, and 20% were fabricated using the solution casting method and tested against Streptococcus mutans ATCC 25175 and Streptococcus sorinus KCCM 11898 using a modified agar diffusion method. The AgNPs dispersion exhibited a surface plasmon resonance peak at a wavelength of 440 nm. XRD patterns primarily displayed phases corresponding to the hexagonal hydroxyapatite structure, with estimated crystallite size of 12.1, 10.7, and 11.3 nm at voltage of 4, 5, and 6 V. DLS measurments yielded hydrodiynamic diameters of 577.5, 517.4, and 456.3 nm, indicating that the crystalline domains existed as dispersed entities or larger aggregates. The membranes with a nominal 20% AgNPs addition produced the largest average inhibition zones: 11.3 ± 2.49 mm for S.Mutans and 8.00 ± 0.816 mm for S. sobrinus. However, phase purity, membrane structure, AG content/release, and statistical significance require further verification before conclusions regarding biomedical performance can be drawn.

This is an open-access article under the CC–BY-SA license.

OPEN ACCESS

Article History
Received 2026-09-02
Revised 2026-11-11
Accepted 2026-11-16
Published 2026-11-23

Keywords
oral pathogens
electrochemical synthesis
biomaterial
cariogenic bacterial
hydroxyapatite

1. Pendahuluan

Pengembangan biomaterial untuk aplikasi medis terus dilakukan seiring meningkatnya kebutuhan terhadap material yang memiliki biokompatibilitas, bioaktivitas, dan kemampuan untuk mendukung proses regenerasi jaringan [1]. Hidroksiapatit (HA) merupakan biomaterial yang sering digunakan dalam bidang biomedis karena memiliki komposisi kimia yang menyerupai komponen mineral jaringan keras serta memiliki sifat biokompatibel dan bioaktif. Meskipun demikian, HA memiliki sifat mekanik yang relatif rendah dan rapuh sehingga penggunaannya sebagai material tunggal masih memiliki keterbatasan [2].

Hidroksiapatit juga memiliki aktivitas antibakteri yang relatif rendah sehingga diperlukan modifikasi untuk meningkatkan kemampuannya dalam menghambat pertumbuhan bakteri [3]. Nanopartikel perak (AgNPs) merupakan bahan yang dapat digunakan sebagai sebagai agen antibakteri. AgNPs memiliki sifat aktivitas antibakteri melalui beberapa mekanisme, antara lain pelepasan ion Ag^+, interaksi dengan permukaan sel bakteri, gangguan integritas membran sel, serta pembentukan *reactive oxygen species* (ROS) [4].

Selain penambahan AgNPs, HA dapat dikombinasikan dengan polimer untuk menghasilkan material komposit dengan sifat mekanik dan kemampuan pembentukan membran yang lebih baik. Polivinil alkohol (PVA) merupakan polimer yang bersifat hidrofilik dan banyak digunakan dalam bidang biomedis dan dapat berfungsi sebagai matriks pembentuk membran [5]. Kombinasi nHA, PVA, dan AgNPs diharapkan dapat menggabungkan sifat bioaktif nHA, kemampuan pembentukan membran PVA, dan aktivitas antibakteri AgNPs.

Nanohidroksiapatit dapat disintesis melalui berbagai metode, salah satunya adalah metode elektrolisis. Metode ini memungkinkan pengaturan kondisi sintesis melalui parameter listrik, termasuk tegangan yang diberikan. Perubahan tegangan dapat mempengaruhi proses elektrokimia, transport ion, pembentukan inti kristal, serta pertumbuhan kristal sehingga dapat memengaruhi karakteristik nHA yang dihasilkan [6].

Karakterisasi nHA menggunakan XRD dapat memberikan informasi mengenai fase, struktur kristal ukuran ukuran hidrodinamik kristalit [7], sedangkan PSA dapat digunakan untuk menentukan diameter hidrodinamik partikel dalam medium cair [8]. Kedua karakterisasi tersebut memberikan informasi yang berbeda dan saling melengkapi mengenai karakteristik material yang dihasilkan.

Komposit berbasis hidroksiapatit/PVA telah dikembangkan untuk meningkatkan kemampuan pembentukan membrane dan sifatmekanis dari hidroksiapatit [5], AgNPs telah banyak dilaporkan mempunyai aktivitas antibakteri terhadap kariogenik [9], [10]. Namun, hubungan antara kondisi elektrostatik nHA, karakterisistik entitas yang terdispersi, komposisi AgNPs di dalam membrane, dan respons entibakteri belum dijelaskan secara memadai pada sistem yang diteliti ini. Oleh karena itu, penelitian ini mengevaluasi pengaruh variasi tegangan elektrolisis terhadap struktur kristal knHA dan ukuran hidrodinamik nHA serta menguji pengaruh variasi konsentrasi AgNPs terhadap performa antibakteri membran nHA/PVA/AgNPs terhadap S. mutans ATCC 25175 dan S. sobrinus KCCM 11898.

2. Metodologi

2.1. Alat

Gelas kimia, oven, power supply DC, magnetic stirrer, neraca analitik, batang pengaduk, hot plate, spatula, kaca arloji, pipet volume, bulp, spektrofotometer UV-Vis, XRD (X-Ray Diffraction) Bruker D6 Phaser, PSA (Particle Size Analyzer) Zetasizer ZS, vacuum filtration, mikropipet, tube, pinset, jarum ose, cawan petri, laminar airflow cabinet, labu Erlenmeyer.

2.2. Bahan

$CaCl_2$, KH_2PO_4, $Na_2EDTA{\cdot}2H_2O$ elektroda karbon, Polivinil Alkohol (PVA), aquadest, NaOH , $Na_3C_6H_5O_7$ $AgNO_3$, pH universal, kloramfenikol, kertas cakram, media Nutrient Broth (NB), Nutrient Agar (NA), kapas swab, metanol, kain kasa, aluminium foil, Streptococcus mutans ATCC 25175 dan Streptococcus sobrinus KCCM 11898.

2.3. Prosedur Penelitian

2.3.1. Sintesis Nanopartikel Perak (AgNPs)

AgNPs disintesis menggunakan metode yang sebelumnya sudah dilaporkan [11]. Secara singkat AgNPs disintesis menggunakan metode reduksi kimia dengan $AgNO_3$ sebagai prekursor dan trisodium sitrat sebagai reduktor sekaligus penstabil. Larutan $AgNO_3$ 0,1 mM dipanaskan pada suhu 60 °C, kemudian ditambahkan larutan trisodium sitrat 1% secara perlahan sambil diaduk. Proses pemanasan dilanjutkan hingga terjadi perubahan warna larutan yang menunjukkan terbentuknya AgNPs. Suspensi AgNPs kemudian didinginkan dan disimpan untuk karakterisasi.

2.3.2. Sintesis nHA secara Elektrolisis Pada Berbagai Potensial

Sintesis nHA dilakukan menggunakan larutan $CaCl_2$ 0,2M, KH_2PO_4 0,2 M, dan $Na_2EDTA{\cdot}2H_2O$ 0,2 M. Proses elektrolisis dilakukan menggunakan elektroda karbon dengan variasi tegangan 4, 5, dan 6 V. Proses berlangsung sampai pH sistem mencapai kisaran 8–9. Endapan yang terbentuk kemudian dipisahkan, dicuci menggunakan akuades, dan dikeringkan dalam suhu ruang.

2.3.3. Pembuatan Membran Komposit nHA/PVA/AgNPs

Membran komposit dibuat menggunakan metode *solution casting*. Larutan100mL PVA 7%, 3 mL nHA 2%, dan AgNPs hingga diperoleh campuran yang homogen. Variasi AgNPs yang digunakan adalah 10%, 15%, dan 20% (v/v). Campuran kemudian dicetak dan dikeringkan hingga terbentuk membran komposit nHA/PVA-AgNPs.

2.3.4. Karakterisasi

AgNPs dikarakterisasi menggunakan spektrofotometer UV-Vis untuk mengidentifikasi keberadaan puncak *surface plasmon resonance* (SPR).

nHA dikarakterisasi menggunakan XRD untuk menentukan fase, struktur kristal, ukuran kristalit, dan indeks kristalinitas relatif. Identifikasi fase dilakukan dengan membandingkan pola difraksi sampel dengan standar JCPDS 03-0747.

Karakterisasi PSA dilakukan menggunakan prinsip *Dynamic Light Scattering* (DLS) untuk menentukan diameter hidrodinamik, polydispersity index (PDI), koefisien difusi, dan *transmittance* partikel nHA.

2.3.5. Uji Aktivitas Antibakteri

Aktivitas antibakteri membran diuji menggunakan metode *modified agar diffusion assay* terhadap *S. mutans* ATCC 25175 dan *S. sobrinus* KCCM 11898. Membran dengan variasi AgNPs 10%, 15%, dan 20% ditempatkan pada media agar yang telah diinokulasi bakteri. Kloramfenikol digunakan sebagai kontrol positif dan akuades sebagai kontrol negatif. Setelah inkubasi, diameter zona hambat yang terbentuk di sekitar membran diukur.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakterisasi nanopartikel perak

Karakterisasi AgNPs secara spektrofotometer UV-Vis dilakukan untuk mengetahui telah terbentuknya AgNPs berdasarkan karakteristik serapan optiknya. Hasil pengukuran menunjukkan adanya puncak serapan pada panjang gelombang maksimum 440 nm. Selain perubahan spektrum, secara visual terjadi perubahan warna dari bening menjadi kuning kecokelatan. Perubahan tersebut merupakan indikasi terbentuknya AgNPs selama proses reduksi kimia [11].

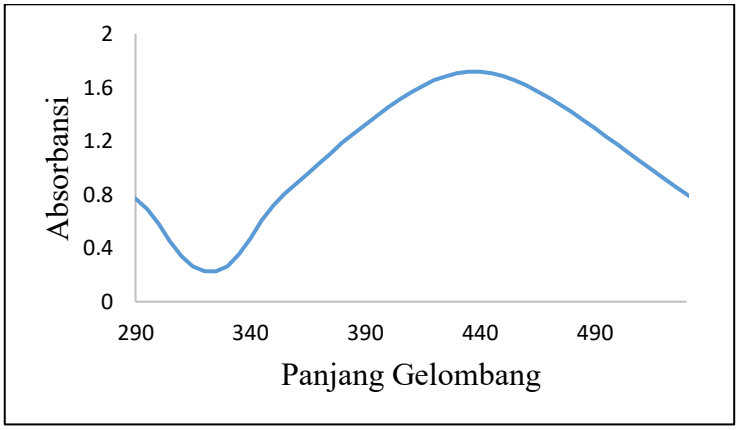

Fig 1. Spektrum UV-Vis nanopartikel perak (AgNPs)

Munculnya puncak pada panjang gelomabng 440 nm berkaitan dengan fenomena *surface plasmon resonance* (SPR), yaitu terjadinya osilasi kolektif elektron konduksi pada permukaan nanopartikel ketika berinteraksi dengan radiasi elektromagnetik [12]. Karakteristik AgNPs

dipegaruhi oleh puncak SPR, yaitu bentuk nanopartikel , distribusi ukuran, serta kondisi permukaan partikel [13]. Dengan demikian, keberadaan puncak pada 440 nm menunjukkan respons optik yang khas dari AgNPs dan mendukung keberhasilan pembentukan nanopartikel perak dalam sistem sintesis yang digunakan.

Pada sintesis ini, prekursor $AgNO_3$ berperan sebagai penyedia ion Ag^+, sedangkan trisodium sitrat berperan sebagai reduktor sekaligus penstabil [14]. Selama proses pemanasan, ion Ag^+ mengalami reduksi menjadi Ag^0 yang kemudian mengalami nukleasi dan pertumbuhan membentuk nanopartikel perak. Selain sebagai reduktor Trisodium sitrat juga berperan membantu menstabilkan partikel yang terbentuk sehingga dapat mencegah terjadinya agregasi yang berlebihan [14]. AgNPs hasil sintesis selanjutnya digunakan sebagai komponen aktif antibakteri dalam pembuatan membran komposit.

3.2. Optimasi Sintesis nHA secara Elektrolisis Pada berbagai Potensial

Sintesis nHA dilakukan pada tegangan 4, 5, dan 6 V. Peningkatan tegangan menyebabkan waktu yang diperlukan untuk mencapai pH 8 menjadi lebih singkat. Tegangan 4 V membutuhkan waktu sekitar 26 jam, 5 V sekitar 18 jam, sedangkan 6 V hanya sekitar 6 jam. Percepatan tersebut berkaitan dengan meningkatnya beda potensial listrik yang dapat mempercepat proses elektrokimia dan transport ion dalam sistem [1]. Reaksi oskidasi terjadi pada anoda dan rekasi reduksi air yang menghasilkan ion OH^- terjadi pada katoda:

Anoda: $2H_2O_{(l)} \rightarrow 4H^+_{(l)} + O_{2(g)} + 4e^-$

Katoda: $2H_2O_{(l)} + 2e^- \rightarrow 2OH^-_{(l)} + H_{2(g)}$

Pembentukan OH^- menyebabkan peningkatan pH di sekitar katoda. Kondisi basa tersebut penting karena pembentukan hidroksiapatit memerlukan keberadaan ion kalsium, fosfat, dan hidroksida dalam kondisi yang sesuai. Dengan demikian, peningkatan tegangan mempercepat tercapainya kondisi pH yang mendukung pembentukan fase hidroksiapatit.

Dalam sistem sintesis ini, Ca^{2+} tidak sepenuhnya berada dalam bentuk ion bebas karena sebagian dikomplekskan oleh EDTA. Pembentukan kompleks Ca–EDTA berperan dalam mengontrol ketersediaan Ca^{2+} sehingga pelepasan ion kalsium berlangsung lebih terkendali. Kondisi tersebut penting untuk mencegah pembentukan kalsium fosfat secara terlalu cepat dan membantu mengarahkan proses menuju pembentukan fase hidroksiapatit.

Seiring berlangsungnya elektrolisis dan meningkatnya pH, spesies fosfat mengalami proses deprotonasi sehingga semakin tersedia dalam bentuk yang mendukung pembentukan kalsium fosfat. Secara sederhana, pembentukan hidroksiapatit dapat direpresentasikan melalui reaksi:

$$10Ca^{2+}_{(aq)} + 6PO_4^{3-}{}_{(aq)} + 2OH^-_{(aq)} \rightarrow Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_{2(s)}$$

Reaksi tersebut merupakan representasi keseluruhan pembentukan hidroksiapatit. Berdasarkan hasil optimasi. Sampel 6 V dipilih untuk pembuatan membran karena memberikan waktu sintesis paling singkat dan diameter hidrodinamik terkecil. Meskipun demikian, sampel 5 V menunjukkan PDI lebih rendah; karena itu, pemilihan kondisi optimum harus mempertimbangkan secara bersama-sama waktu sintesis, kemurnian fase, ukuran, PDI, dan signifikansi statistic.

3.3. Karakterisasi XRD nHA

Pola difraksi XRD pada seluruh variasi tegangan menunjukkan puncak-puncak karakteristik hidroksiapatit. Hasil pencocokan dengan standar menunjukkan bahwa fase yang terbentuk merupakan hidroksiapatit yang mempunyai struktur kristal heksagonal dengan *space group* $P6_3/m$ [15]. Berdasarkan Gambar 2 seluruh sampel hasil elektrolisis menunjukkan puncak-puncak yang muncul pada daerah 2θ sekitar 25,9°, 31–34°, 46,7°, 49,5° dan 53,2°. Puncak-puncak tersebut telah diindeks sebagai bidang kristal (002), (211), (202), (222), (213) dan (004) sebagaimana ditunjukkan pada standar JCPDS 03-0747 hidroksiapatit.

 ISSN 2476-9258

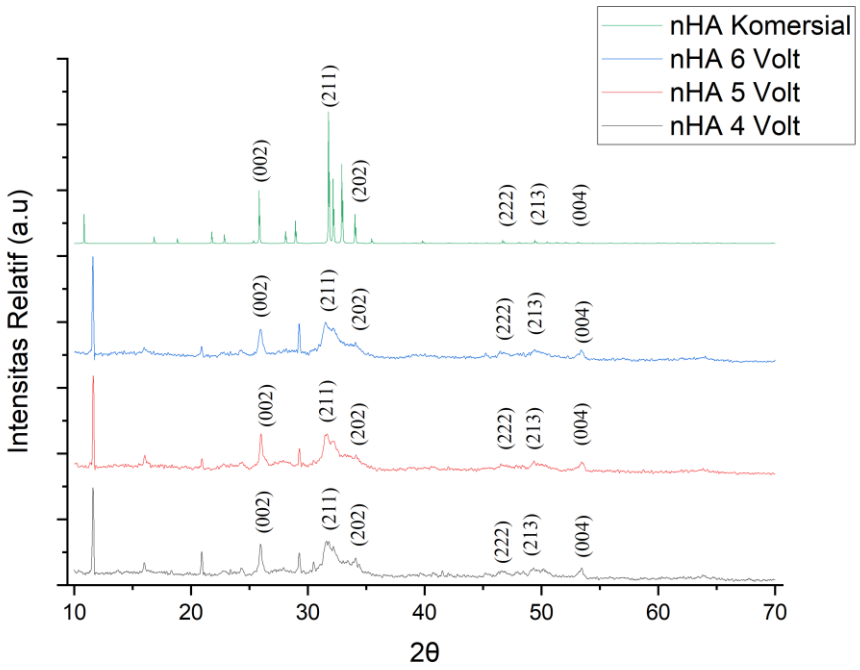

Fig 2. Pola difraksi nHA hasil elektrolisis

Kesesuaian posisi puncak difraksi dengan standar menunjukkan bahwa variasi tegangan 4–6 V tidak menyebabkan perubahan fase utama yang teridentifikasi. Seluruh sampel tetap menunjukkan fase hidroksiapatit dengan sistem kristal heksagonal. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun tegangan memengaruhi kondisi elektrokimia selama sintesis, variasi yang digunakan masih menghasilkan kondisi yang mendukung pembentukan fase hidroksiapatit.

Perbedaan antarsampel juga terlihat pada karakteristik ukuran kristalit dan indeks kristalinitas. Berdasarkan persamaan Scherrer, ukuran kristalit yang diperoleh adalah 12,1459 nm pada 4 V, 10,6963 nm pada 5 V, dan 11,2936 nm pada 6 V. Peningkatan tegangan dapat meningkatkan laju transport ion dan mempercepat pembentukan inti kristal. Apabila pembentukan inti berlangsung lebih dominan dibandingkan pertumbuhan kristal, kristalit yang dihasilkan cenderung berukuran lebih kecil. Namun, pada kondisi tertentu, peningkatan laju transport ion juga dapat meningkatkan ketersediaan spesies pembentuk kristal sehingga pertumbuhan kristal menjadi lebih dominan dan ukuran kristalit dapat kembali meningkat [16].

Indeks kristalinitas relatif juga menunjukkan perbedaan antarvariasi tegangan, yaitu 25,19% pada 4 V, 17,32% pada 5 V, dan 19,55% pada 6 V. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa perubahan kondisi elektrolisis memengaruhi tingkat keteraturan kristal yang terbentuk. Nilai kristalinitas yang berbeda dapat berkaitan dengan perubahan laju nukleasi dan pertumbuhan kristal selama proses elektrolisis [17].

3.4. Karakterisasi PSA nHA

Table 1. Hasil Karakterisasi Nanopartikel Hidroksiapatit dengan PSA

Sampel	*Kode Sampel*	*Parameter*	*Nilai*	*Standar Deviasi*	*Satuan*
nHA	4 V	Diameter Hidrodinamik	577,4	0,03529	nm
nHA	4 V	Polidispersitas	25,3	1,7	%
nHA	4 V	Transmitansi	79,4	0,1	%
nHA	4 V	Koefisien Difusi	0,7	0,0	$\mu m^2/s$
nHA	5 V	Diameter Hidrodinamik	517,4	0,04742	nm
nHA	5 V	Polidispersitas	19,8	3,0	%

Sampel	*Kode Sampel*	*Parameter*	*Nilai*	*Standar Deviasi*	*Satuan*
nHA	5 V	Transmitansi	88,0	0,1	%
nHA	5 V	Koefisien Difusi	0,8	0,1	$\mu m^2/s$
nHA	6 V	Diameter Hidrodinamik	456,3	0,03642	nm
nHA	6 V	Polidispersitas	21,7	2,5	%
nHA	6 V	Transmitansi	87,2	0,5	%
nHA	6 V	Koefisien Difusi	0,9	0,1	$\mu m^2/s$

Berdasarkan Tabel 1 hasil analisis menggunakan PSA menunjukkan diameter hidrodinamik sebesar 577,4 nm pada 4 V, 517,4 nm pada 5 V, dan 456,3 nm pada 6 V. Berbeda dengan ukuran kristalit berdasarkan analisis XRD, diameter hidrodinamik menunjukkan kecenderungan menurun seiring peningkatan tegangan.

Perbedaan antara ukuran kristalit dan diameter hidrodinamik terjadi karena kedua metode mengukur parameter yang berbeda. XRD menentukan ukuran domain kristal yang koheren. Pada analisis PSA, digunakan prinsip *Dynamic Light Scattering* (DLS) untuk menentukan diameter hidrodinamik partikel yang bergerak dalam medium cair [17]. Pada metode DLS, ukuran partikel tidak diukur secara langsung, melainkan dihitung berdasarkan koefisien difusi translasi yang diperoleh dari gerak Brown (*Brownian motion*) melalui persamaan Stokes–Einstein [18]. Oleh karena itu, satu partikel yang terdeteksi oleh PSA dapat tersusun atas beberapa kristalit dan dikelilingi oleh lapisan medium sehingga ukuran hidrodinamik yang diperoleh dapat jauh lebih besar daripada ukuran kristalit.

Nilai PDI yang diperoleh adalah 0,253 pada 4 V, 0,198 pada 5 V, dan 0,217 pada 6 V. Nilai PDI terendah pada 5 V menunjukkan bahwa sampel tersebut memiliki distribusi ukuran yang paling seragam dibandingkan variasi lainnya [9]. Sementara itu, koefisien difusi meningkat dari 0,7 $\mu m^2/s$ pada 4 V menjadi 0,8 $\mu m^2/s$ pada 5 V dan 0,9 $\mu m^2/s$ pada 6 V. Sesuai dengan prinsip DLS, dimana partikel yang memiliki ukuran hidrodinamik lebih kecil cenderung memiliki koefisien difusi lebih tinggi dalam medium cair. Peningkatan koefisien difusi sejalan dengan penurunan diameter hidrodinamik karena partikel yang lebih kecil memiliki gerak Brown yang lebih cepat dalam medium [9]. Dengan mempertimbangkan waktu sintesis, diameter hidrodinamik, dan koefisien difusi, sampel 6 V digunakan untuk pembuatan membran komposit.

3.5. Aktivasi Antibakteri Membran nHA/PVA/AgNPs

nHA hasil sintesis pada tegangan 6 V selanjutnya digunakan dalam pembuatan membran komposit bersama PVA dan AgNPs. Pembuatan dilakukan menggunakan metode *solution casting* dengan variasi AgNPs 10%, 15%, dan 20%.

Table 2. Hasil Uji Skrining Aktivitas Antibakteri

Membran nHA/PVA/AgNPS	**Diameter Zona Hambat ± (mm)**	
	S. mutans ATCC 25175	***S. sobrinus KCCM 11898***
AgNPs 10%	7,33 ± 0,471	7,33 ± 0,471
AgNPs 15%	9 ± 0,816	7,5 ± 0,4082
AgNPs 20%	11,33 ± 2,494	8,0 ± 0,816
Kloramfenikol	12,0 ± 0,0	11,3 ± 0,942
Aquadest	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0

Keterangan: diameter membran dan cakram 6 mm, kloramfenikol (kontrol positif), *aquadest* (kontrol negatif)

Pada Tabel 2 hasil uji aktivitas antibakteri menunjukkan adanya peningkatan diameter zona hambat seiring bertambahnya kandungan AgNPs dalam membran. Pada *S. mutans*, diameter zona hambat meningkat dari 7,33 ± 0,471 mm pada AgNPs 10% menjadi 9,00 ± 0,816 mm pada AgNPs 15% dan 11,33 ± 2,494 mm pada AgNPs 20%. Sementara itu, terhadap *S. sobrinus*, zona hambat meningkat dari 7,33 ± 0,471 mm menjadi 7,50 ± 0,4082 mm dan 8,00 ± 0,816 mm pada penambahan AgNPs masing-masing 10%, 15%, dan 20%.

Peningkatan zona hambat menunjukkan bahwa semakin besar kandungan AgNPs, semakin besar pula komponen aktif antibakteri yang tersedia dalam membran. Aktivitas tersebut terutama berkaitan dengan keberadaan AgNPs, dimana nHA berperan sebagai fase anorganik bioaktif, sedangkan PVA berfungsi sebagai matriks polimer pembentuk membran. Aktivitas antibakteri AgNPs dapat berlangsung melalui beberapa mekanisme. AgNPs dapat melepaskan Ag^+ yang berinteraksi dengan permukaan sel bakteri, mengganggu permeabilitas membran, serta berinteraksi dengan komponen intraseluler [10]. AgNPs juga dapat berkontribusi terhadap pembentukan ROS yang menyebabkan tekanan oksidatif pada sel bakteri [19].

Perbedaan diameter zona hambat antara kedua bakteri menunjukkan adanya perbedaan respons terhadap membran komposit. Pada kondisi penelitian ini, S. mutans menunjukkan zona hambat lebih besar dibandingkan S. sobrinus. Perbedaan tersebut diduga berkaitan dengan karakteristik permukaan sel dan komponen ekstraseluler masing-masing bakteri yang dapat mempengaruhi interaksi dengan AgNPs maupun Ag^+ [20]. Namun, mekanisme spesifik yang menyebabkan perbedaan sensitivitas kedua spesies tidak dapat dipastikan hanya berdasarkan hasil uji zona hambat.

Kesimpulan

Elektrolisis pada 4–6 V menghasilkan padatan dengan puncak XRD utama yang berkaitan dengan hidroksiapatit dan ukuran kristalit terestimasi 10,7–12,1 nm. DLS menunjukkan diameter hidrodinamik 456,3–577,4 nm, jauh lebih besar daripada ukuran kristalit, sehingga material terdispersi kemungkinan terdiri atas agregat beberapa domain kristal. Pada kondisi uji yang digunakan, membran dengan penambahan nominal AgNPs 20% menghasilkan rerata zona hambat terbesar terhadap S. mutans (11,33 ± 2,49 mm) dan S. sobrinus (8,00 ± 0,82 mm).

Referensi

[1] Supriyono, B. Poerwadi, D. Widhiyanuriyawan, N. Wildah, M. Ardyarum, et al., "Sintesis Hidroksiapatit secara Elektrolisis sebagai Bahan Baku Pembuatan Scaffold Tissue HA/PVA-AgCl untuk Aplikasi Penyembuhan Luka," *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, vol. 20, no. 2, pp. 206–217, 2024, https://doi.org/10.20961/alchemy.20.2.80273.206-217.

[2] M. Sadat-Shojai and H. Moghaddas, "How Geometry, Size and Surface Properties of Tailor-Made Particles Control the Efficiency of Poly(3-Hydroxybutyrate-Co-3-Hydroxyvalerate)/Hydroxyapatite Nanocomposites," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 137, no. 47, Art. no. e49810, 2020, https://doi.org/10.1002/app.49810.

[3] D. Radulescu, O. R. Vasile, E. Andronescu, and A. Ficai, "Latest Research of Doped Hydroxyapatite for Bone Tissue Engineering," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 24, no. 17, Art. no. 13157, 2023, https://doi.org/10.3390/ijms241713157.

[4] E. Urnukhsaikhan, B. E. Bold, A. Gunbileg, N. Sukhbaatar, and T. Mishig-Ochir, "Antibacterial Activity and Characteristics of Silver Nanoparticles Biosynthesized from *Carduus crispus*," *Scientific Reports*, vol. 11, Art. no. 21047, 2021, https://doi.org/10.1038/s41598-021-00520-2.

[5] F. Rashid, S. S. Soshi, and M. A. Gafur, "Development and Characterization of Hybrid Film Made of Hydroxyapatite, Poly Vinyl Alcohol and Gelatin for Biomedical Application," *Materials Science and Applications*, vol. 15, no. 9, pp. 320–335, 2024, https://doi.org/10.4236/msa.2024.159022.

[6] M. S. Safavi, F. C. Walsh, M. A. Surmeneva, R. A. Surmenev, and J. Khalil-Allafi, "Electrodeposited Hydroxyapatite-Based Biocoatings: Recent Progress and Future Challenges," *Coatings*, vol. 11, no. 1, Art. no. 110, 2021, https://doi.org/10.3390/coatings11010110.

[7] S. Alashi, I. Alkhouri, I. Alghoraibi, N. Kochaji, A. Houri, et al., "Evaluating Various Properties of Nanohydroxyapatite Synthesized from Eggshells and Dual-Doped with Si^{4+} and Zn^{2+}: An *In Vitro* Study," *Heliyon*, vol. 10, no. 16, Art. no. e35907, 2024, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35907.

[8] F. S. Irwansyah, A. I. Amal, E. P. Hadisantoso, and A. R. Noviyanti, "How to Make and Characterize Hydroxyapatite from Eggshell Using the Hydrothermal Method: Potential Insights for Drug Delivery System," *Indonesian Journal of Science & Technology*, vol. 8, no. 3, pp. 469–486, 2023, https://doi.org/10.17509/ijost.v8i3.60825.

[9] N. Farkas and J. A. Kramar, "Dynamic Light Scattering Distributions by Any Means," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 23, no. 5, Art. no. 120, 2021, https://doi.org/10.1007/s11051-021-05220-6.

[10] H. Ghabban, S. F. Alnomasy, H. Almohammed, O. M. Al Idriss, S. Rabea, et al., "Antibacterial, Cytotoxic, and Cellular Mechanisms of Green Synthesized Silver Nanoparticles against Some Cariogenic Bacteria (*Streptococcus mutans* and *Actinomyces viscosus*)," *Journal of Nanomaterials*, vol. 2022, no. 1, Art. no. 9721736, 2022, https://doi.org/10.1155/2022/9721736.

[11] M. S. Arif, R. Ulfiya, Erwin, and A. S. Panggabean, "Synthesis Silver Nanoparticles Using Trisodium Citrate and Development in Analysis Method," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2360, no. 1, Art. no. 050007, 2021, https://doi.org/10.1063/5.0059493.

[12] F. Y. Alzoubi, A. A. Ahmad, I. A. Aljarrah, A. B. Migdadi, and Q. M. Al-Bataineh, "Localize Surface Plasmon Resonance of Silver Nanoparticles Using Mie Theory," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 34, no. 32, Art. no. 2128, 2023, https://doi.org/10.1007/s10854-023-11304-x.

[13] Y. J. Qiao, J. Kang, C. Q. Song, N. Zhou, P. Zhang, et al., "Further Study on Particle Size, Stability, and Complexation of Silver Nanoparticles under the Composite Effect of Bovine Serum Protein and Humic Acid," *RSC Advances*, vol. 14, no. 4, pp. 2621–2632, 2024, https://doi.org/10.1039/d3ra06159k.

[14] S. Das, K. Bandyopadhyay, and M. M. Ghosh, "Effect of Stabilizer Concentration on the Size of Silver Nanoparticles Synthesized Through Chemical Route," *Inorganic Chemistry Communications*, vol. 123, Art. no. 108319, 2021, https://doi.org/10.1016/j.inoche.2020.108319.

[15] N. D. Pinchuk, A. Piecuch, N. Charczuk, P. Sobierajska, S. Targonska, et al., "Effect of Silver Ion and Silicate Group on the Antibacterial and Antifungal Properties of Nanosized Hydroxyapatite," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, Art. no. 29339, 2024, https://doi.org/10.1038/s41598-024-80303-7.

[16] Supriyono, C. W. Kartikowati, B. Poerwadi, C. Wulandari, L. L. F. Hikma, et al., "The Formation Process of Hydroxyapatite Nanoparticles by Electrolysis and Their Physical Characteristics," *International Journal of Technology*, vol. 14, no. 2, pp. 330–338, 2023, https://doi.org/10.14716/ijtech.v14i2.4452.

[17] L. M. Cursaru, M. Iota, R. M. Piticescu, D. Tarnita, S. V. Savu, et al., "Hydroxyapatite from Natural Sources for Medical Applications," *Materials*, vol. 15, no. 15, Art. no. 5091, 2022, https://doi.org/10.3390/ma15155091.

[18] J. Rodriguez-Loya, M. Lerma, and J. L. Gardea-Torresdey, "Dynamic Light Scattering and Its Application to Control Nanoparticle Aggregation in Colloidal Systems: A Review," *Micromachines*, vol. 15, no. 1, Art. no. 24, 2024, https://doi.org/10.3390/mi15010024.

[19] I. X. Yin, J. Zhang, I. S. Zhao, M. L. Mei, Q. Li, et al., "The Antibacterial Mechanism of Silver Nanoparticles and Its Application in Dentistry," *International Journal of Nanomedicine*, vol. 15, pp. 2555–2562, 2020, https://doi.org/10.2147/IJN.S246764.

[20] C. C. González, L. I. González García, L. G. Burciaga Jurado, and A. Carrillo Castillo, "Bactericidal Activity of Silver Nanoparticles in Drug-Resistant Bacteria," *Brazilian Journal of Microbiology*, vol. 54, no. 2, pp. 691–701, 2023, https://doi.org/10.1007/s42770-023-00991-7.