

A review: Biosintesis Nanopartikel dari Limbah Minyak Jelantah untuk Aplikasi Lingkungan dan Kesehatan

Muhammad Nur Hadi¹, Rizal Irfandi^{2*}

¹Program Sarjana Departemen Kimia, Universitas Negeri Makassar, Makassar, Indonesia

²Program Studi Kimia, Departemen Kimia, Universitas Negeri Makassar, Makassar, Indonesia

ARTICLE INFORMATION

Received: 24, Januari, 2025
Accepted: 16, Februari, 2025
Online Published: 27, Februari, 2025

KEYWORD

Keywords: Vanadium, Senyawa Kompleks, Koordinasi, Agen Terapeutik

CORRESPONDING AUTHOR

E-mail: permatindra89@gmail.com

A B S T R A C T

Degradasi lingkungan merupakan isu yang terus berkembang, mendorong para peneliti untuk mengembangkan metode sintesis nanopartikel (NP) yang ramah lingkungan untuk berbagai aplikasi. Dalam konteks ini, pemanfaatan limbah minyak jelantah (UCO) sebagai sumber hijau dalam sintesis NP telah muncul sebagai alternatif yang menjanjikan dibandingkan teknik konvensional. Industri makanan menghasilkan limbah minyak jelantah dalam jumlah besar, yang sebagian besar tidak dapat dibuang begitu saja tanpa pengolahan lebih lanjut. Tinjauan ini mengevaluasi sintesis hijau NP berbasis UCO serta potensi aplikasinya dalam bidang lingkungan dan kesehatan, dengan mengidentifikasi tantangan utama serta prospek penelitian masa depan. Prinsip dan metode sintesis NP hijau turut dianalisis, dengan penekanan pada sifat unik UCO sebagai agen reduksi dan stabilisasi yang efektif, serta teknik karakterisasi yang digunakan untuk menganalisis NP yang dihasilkan. NP berbasis UCO memiliki berbagai aplikasi lingkungan, termasuk dalam pemurnian air, degradasi polutan, dan remediasi area yang terkontaminasi. Dalam sektor kesehatan, NP ini berperan dalam sistem penghantaran obat, memiliki aktivitas antimikroba, serta digunakan dalam terapi kanker. NP berbasis UCO telah terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi penghantaran obat ke sel kanker, sehingga dapat meningkatkan keberhasilan terapi sekaligus mengurangi potensi efek samping. Namun, diperlukan evaluasi toksisitas yang komprehensif, terutama dalam penggunaan NP pada konsentrasi tinggi, guna memastikan keamanannya dalam berbagai aplikasi.

PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, kekhawatiran terhadap degradasi lingkungan semakin meningkat, mendorong para peneliti untuk mencari pendekatan inovatif guna menerapkan praktik yang lebih berkelanjutan, termasuk sintesis nanopartikel (NP), yang mendapat perhatian luas karena potensinya dalam mengatasi tantangan di bidang lingkungan dan kesehatan [1,2]. Perpaduan antara nanoteknologi dan prinsip kimia hijau telah memungkinkan pemanfaatan sumber daya terbarukan untuk menghasilkan nanomaterial berteknologi tinggi dengan berbagai aplikasi [3,4], melalui suatu metode yang dikenal sebagai "sintesis hijau." Proses ini memanfaatkan senyawa organik serta jalur biologis untuk membentuk material berstruktur nano tanpa menghasilkan limbah beracun, sehingga menawarkan berbagai keuntungan, seperti pengurangan dampak lingkungan, efisiensi biaya, serta sifat biokompatibel, menjadikannya sebagai alternatif yang menjanjikan dalam produksi nanomaterial yang berkelanjutan [5,6].

Industri minyak sawit, khususnya di wilayah tropis, menghasilkan limbah dalam jumlah besar. Diperkirakan bahwa untuk setiap liter minyak sawit yang diproduksi, dihasilkan sekitar 1,1–1,3 liter air limbah pabrik kelapa sawit (POME) serta 0,5–1 kg limbah padat berupa serat dan cangkang [7,8]. Limbah ini memberikan tekanan terhadap lingkungan akibat tingginya kandungan organik serta potensi toksisitasnya. Namun, minyak jelantah (UCO) yang berasal dari minyak sawit dapat dimanfaatkan sebagai sumber hijau dalam sintesis nanopartikel [4,9–11]. Limbah ini mengandung berbagai senyawa bernilai tinggi, seperti polifenol, lipid, serta komponen

bioaktif lainnya, yang berperan sebagai agen pereduksi dan penstabil yang efektif dalam proses pembentukan nanopartikel [12–14].

Metode konvensional dalam sintesis nanopartikel (NP) umumnya melibatkan proses kimia dan fisika, seperti pengendapan uap kimia (CVD), metode sol-gel, serta penggilingan bola. Meskipun teknik ini terbukti efektif, penggunaannya sering kali membutuhkan energi tinggi, melibatkan bahan kimia berbahaya, serta menghasilkan limbah dalam jumlah besar, yang berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan [15,16]. Sebagai alternatif, sintesis hijau menawarkan pendekatan yang lebih berkelanjutan dengan memanfaatkan reagen yang lebih aman, sumber daya terbarukan, serta metode yang hemat energi, sehingga dapat meminimalkan dampak lingkungan yang merugikan dan mendukung prinsip keberlanjutan [17,18].

Meskipun potensi minyak jelantah (UCO) yang berasal dari minyak sawit dalam sintesis NP cukup menjanjikan, masih terdapat kesenjangan dalam pemahaman menyeluruh mengenai mekanisme yang mendasari peran senyawa bioaktifnya dalam pembentukan NP. Selain itu, diperlukan pengembangan protokol standar serta metode yang dapat diterapkan dalam skala besar guna memastikan hasil sintesis yang konsisten dan dapat direproduksi. Studi ini bertujuan untuk mengatasi kesenjangan tersebut dengan memberikan analisis mendalam terhadap mekanisme sintesis, mengoptimalkan proses produksi, serta mengeksplorasi berbagai aplikasi potensial dari NP berbasis UCO. Fokus utama tinjauan ini adalah menyajikan gambaran komprehensif mengenai sintesis hijau NP berbasis UCO serta mengeksplorasi penerapannya dalam bidang lingkungan dan kesehatan. Dengan mengkaji prinsip dan metode sintesis hijau, sifat unik UCO sebagai agen reduksi dan penstabil, serta teknik karakterisasi yang digunakan untuk menganalisis NP yang dihasilkan, penelitian ini berupaya menyoroti keunggulan serta tantangan dalam pemanfaatan UCO untuk sintesis NP. Selain itu, penelitian ini juga membahas aplikasi praktis NP berbasis UCO, termasuk dalam pemurnian air, degradasi polutan, sistem penghantaran obat, aktivitas antimikroba, dan terapi kanker.

METODE

Metode penelitian yang dilakukan adalah literature review mengenai kandungan fukosantin dari alga dan manfaatnya dibidang kesehatan. Artikel yang digunakan berasal dari berbagai database yaitu Google Scholar, MDPI, SciencDirect dan PubMed yang diterbitkan pada dalam kurun 10 tahun terakhir. Metode pengolahan data dilakukan dengan mengumpulkan hasil penelitian mengenai topik yang dibahas. Berbagai hal yang menyangkut kandungan kimia dan manfaatnya akan dijelaskan secara sederhana dengan analisis deskriptif.

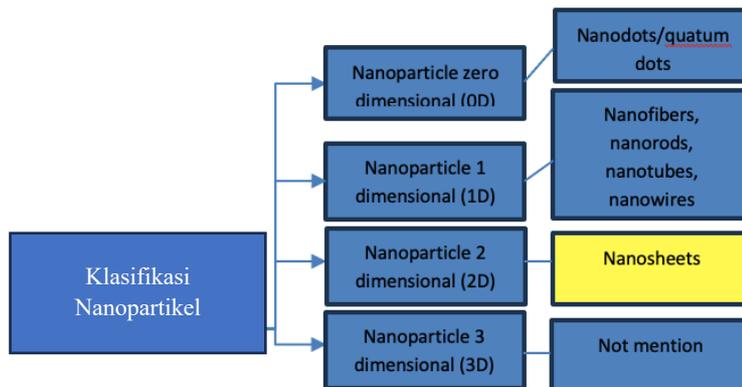
HASIL & PEMBAHASAN

Biosintesis Nanopartikel

Biosintesis nanopartikel merupakan pendekatan ramah lingkungan dalam sintesis nanomaterial yang memanfaatkan makhluk hidup seperti mikroorganisme, tumbuhan, dan enzim sebagai agen pereduksi dan stabilisasi. Metode ini selaras dengan prinsip kimia hijau, yang bertujuan untuk mengurangi penggunaan bahan kimia beracun dan menekan dampak lingkungan akibat sintesis nanopartikel secara konvensional (Irvani et al., 2014; Kharissova et al., 2013). Dalam biosintesis, biomolekul seperti protein, polisakarida, alkaloid, dan flavonoid berperan sebagai agen bioreduktor yang mengubah ion logam menjadi nanopartikel melalui proses redoks (Mittal et al., 2013). Biosintesis nanopartikel tidak hanya lebih aman dan hemat energi tetapi juga menghasilkan partikel dengan stabilitas tinggi serta biokompatibilitas yang baik, menjadikannya ideal untuk aplikasi di bidang kesehatan, lingkungan, dan industri (Parveen et al., 2016).

Mekanisme biosintesis nanopartikel bervariasi tergantung pada sumber biologis yang digunakan, tetapi secara umum melibatkan tiga tahap utama: reduksi ion logam, nukleasi, dan stabilisasi (Singh et al., 2018). Reduksi Ion Logam, Dalam tahap ini, ion logam seperti Ag^+ , Au^{3+} , atau Fe^{3+} direduksi menjadi bentuk logamnya menggunakan enzim atau metabolit sekunder yang dihasilkan oleh organisme biologis (Sharma et al., 2019). Misalnya, ekstrak tumbuhan mengandung senyawa fenolik dan flavonoid yang berperan sebagai agen reduksi. Nukleasi, Setelah reduksi ion logam, atom-atom logam bebas mulai bergabung membentuk inti

nanopartikel (Ghosh et al., 2021). Proses ini menentukan ukuran dan morfologi nanopartikel yang dihasilkan. Stabilisasi, agar nanopartikel tetap stabil dan tidak mengalami agregasi, biomolekul seperti protein atau polisakarida berikatan dengan permukaan nanopartikel, memberikan stabilitas elektrostatis atau sterik (Narayanan & Sakthivel, 2011).

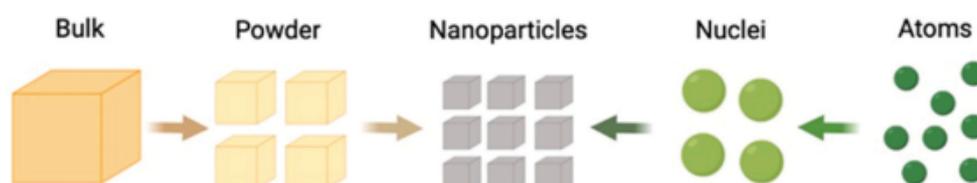


Gambar 1. Klasifikasi Nanopartikel

Metode Biosintesis Nanopartikel

Metode biosintesis nanopartikel merupakan pendekatan ramah lingkungan yang memanfaatkan organisme biologis seperti mikroorganisme, tumbuhan, dan enzim dalam reduksi ion logam menjadi nanopartikel. Proses ini dapat berlangsung melalui mekanisme ekstraseluler, di mana ion logam direduksi oleh senyawa bioaktif yang dilepaskan ke medium, atau mekanisme intraseluler, di mana nanopartikel terbentuk di dalam sel melalui interaksi dengan biomolekul seluler. Mikroorganisme seperti *Pseudomonas aeruginosa* dan *Bacillus subtilis* telah digunakan untuk mensintesis nanopartikel perak (AgNP), sementara fungi seperti *Fusarium oxysporum* telah dilaporkan mampu menghasilkan nanopartikel emas (AuNP) dengan morfologi yang seragam. Selain itu, biosintesis menggunakan ekstrak tumbuhan juga banyak digunakan karena mengandung senyawa polifenol dan flavonoid yang berperan sebagai agen reduksi dan stabilisasi. Misalnya, ekstrak daun *Azadirachta indica* telah berhasil digunakan untuk mensintesis AuNP dengan ukuran yang terkendali.

Sejumlah penelitian sebelumnya telah membuktikan efektivitas metode biosintesis dalam menghasilkan nanopartikel dengan berbagai aplikasi. Shankar et al. (2004) melaporkan bahwa ekstrak *Ocimum sanctum* dapat menghasilkan AuNP dengan diameter sekitar 20–40 nm, yang menunjukkan sifat antimikroba yang kuat. Sementara itu, Kalishwaralal et al. (2010) menemukan bahwa *Bacillus licheniformis* mampu mensintesis AgNP dengan aktivitas antibakteri yang signifikan terhadap *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus*. Dalam studi lain, Ghosh et al. (2021) menggunakan *Aspergillus niger* untuk mensintesis nanopartikel besi oksida (Fe_3O_4 NP), yang menunjukkan efektivitas tinggi dalam remediasi lingkungan. Selain itu, Iravani (2011) menyatakan bahwa biosintesis nanopartikel menggunakan tumbuhan memiliki keunggulan dibandingkan metode mikroba karena lebih cepat dan tidak memerlukan kondisi kultur yang kompleks. Secara keseluruhan, metode biosintesis nanopartikel terus berkembang dengan berbagai optimasi untuk meningkatkan efisiensi sintesis serta aplikasi dalam bidang kesehatan, lingkungan, dan industri.



Gambar 2. Pendekatan dalam sintesis nanopartikel

Biosintesis nanopartikel dari Limbah Minyak Jelantah

Biosintesis nanopartikel menggunakan minyak jelantah, khususnya yang berasal dari minyak sawit, merupakan pendekatan inovatif yang menggabungkan pengelolaan limbah dengan produksi material fungsional. Minyak jelantah mengandung senyawa organik seperti asam lemak bebas, trigliserida, dan senyawa polifenol yang dapat berfungsi sebagai agen pereduksi dan penstabil dalam sintesis nanopartikel. Penelitian mengenai pemanfaatan minyak jelantah dalam biosintesis nanopartikel masih terbatas. Namun, beberapa studi telah mengeksplorasi penggunaan produk samping dari proses transesterifikasi minyak jelantah. Misalnya, Gardini Nilasari dan timnya dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) memanfaatkan crude glycerol, produk samping dari sintesis biodiesel menggunakan minyak jelantah, untuk aplikasi lebih lanjut.

Selain itu, penelitian lain telah memanfaatkan minyak jelantah sebagai bahan baku dalam sintesis surfaktan metil ester sulfonat (MES), yang kemudian digunakan bersama dengan nanopartikel ZnO untuk menghasilkan deterjen cair dalam bentuk nanofluida. Pendekatan ini menunjukkan potensi minyak jelantah dalam aplikasi nanoteknologi dan pengembangan produk ramah lingkungan. Meskipun penelitian langsung mengenai biosintesis nanopartikel menggunakan minyak jelantah masih jarang, studi-studi ini menunjukkan potensi besar dalam memanfaatkan limbah minyak goreng untuk aplikasi nanoteknologi. Pengembangan lebih lanjut di bidang ini dapat membuka peluang untuk produksi nanopartikel yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Biosintesis nanopartikel telah banyak dilakukan menggunakan berbagai sumber biologis, seperti ekstrak tumbuhan, mikroorganisme, dan biomaterial lainnya. Beberapa hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa metode biosintesis ini menghasilkan nanopartikel dengan ukuran yang bervariasi serta memiliki sifat fungsional yang dapat diterapkan dalam berbagai bidang, termasuk biomedis, lingkungan, dan industri.

Salah satu studi yang dilakukan oleh Shankar et al. (2004) menggunakan ekstrak daun *Azadirachta indica* untuk mensintesis nanopartikel emas (AuNP). Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa nanopartikel yang terbentuk memiliki ukuran berkisar antara 20–40 nm dengan stabilitas yang baik serta aktivitas antibakteri yang signifikan. Studi serupa dilakukan oleh Prasad et al. (2012), yang memanfaatkan ekstrak daun *Ocimum sanctum* dalam biosintesis AuNP. Nanopartikel yang dihasilkan menunjukkan morfologi seragam serta memiliki potensi dalam aplikasi biomedis, seperti pengobatan kanker dan agen antimikroba. Selain tumbuhan, mikroorganisme juga banyak digunakan dalam biosintesis nanopartikel. Kalishwaralal et al. (2010) melaporkan bahwa *Bacillus licheniformis* mampu mensintesis nanopartikel perak (AgNP) dengan ukuran berkisar antara 10–50 nm. AgNP yang dihasilkan memiliki aktivitas antimikroba yang kuat terhadap *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus*. Sementara itu, Gade et al. (2008) berhasil memanfaatkan *Fusarium oxysporum* dalam biosintesis nanopartikel emas dan perak, yang menunjukkan efisiensi tinggi dalam proses sintesis serta kestabilan yang baik dalam medium biologis.

Biosintesis nanopartikel besi oksida (Fe_3O_4 NP) juga telah dilakukan menggunakan mikroorganisme. Ghosh et al. (2021) memanfaatkan *Aspergillus niger* untuk sintesis Fe_3O_4 NP yang kemudian diuji dalam aplikasi remediasi lingkungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nanopartikel tersebut efektif dalam mengadsorpsi logam berat dari limbah cair, menjadikannya material potensial untuk pengolahan air limbah industri. Dalam bidang medis, nanopartikel yang disintesis secara biologis telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam pengiriman obat dan terapi kanker. Misalnya, Mukherjee et al. (2014) berhasil mensintesis AuNP menggunakan ekstrak *Cymbopogon citratus*, yang digunakan untuk mengantarkan obat kemoterapi secara lebih spesifik ke sel kanker payudara. Studi ini menunjukkan bahwa biosintesis nanopartikel tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga dapat meningkatkan efisiensi pengobatan penyakit. Selain itu, biosintesis nanopartikel juga dapat diterapkan dalam bidang pertanian. Kumar et al. (2017) melaporkan bahwa nanopartikel seng oksida (ZnO NP) yang disintesis menggunakan ekstrak daun *Moringa oleifera* dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman serta melindungi tanaman dari infeksi patogen. Hal ini menunjukkan bahwa biosintesis nanopartikel tidak hanya terbatas pada aplikasi medis dan lingkungan tetapi juga dapat memberikan manfaat dalam sektor pertanian.

Secara keseluruhan, hasil-hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa biosintesis nanopartikel merupakan metode yang efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan dibandingkan dengan metode konvensional. Berbagai sumber biologis telah digunakan untuk menghasilkan nanopartikel dengan ukuran terkendali, stabilitas yang baik, serta aktivitas fungsional yang luas. Ke depan, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan metode sintesis dan mengeksplorasi lebih banyak aplikasi potensial dari nanopartikel yang dihasilkan secara biologis.

Keunggulan dan Tantangan Aplikasi Nanopartikel dalam Kesehatan

Penggunaan nanopartikel dalam aplikasi kesehatan telah mengalami perkembangan pesat, terutama dalam bidang pengobatan, diagnostik, dan terapi penyakit. Berkat ukurannya yang sangat kecil, nanopartikel mampu menembus membran sel dengan lebih mudah, meningkatkan efektivitas pengiriman obat, dan memungkinkan teknik pencitraan yang lebih akurat. Namun, meskipun memiliki banyak keunggulan, terdapat berbagai tantangan yang masih harus diatasi sebelum nanopartikel dapat diimplementasikan secara luas dalam praktik medis. Salah satu keunggulan utama nanopartikel adalah kemampuannya dalam penghantaran obat yang lebih efektif dan terarah. Dengan modifikasi permukaan, nanopartikel dapat dikendalikan agar hanya menargetkan sel atau jaringan tertentu, seperti sel kanker, sehingga mengurangi efek samping yang sering terjadi pada terapi konvensional (Peer et al., 2007). Teknologi ini dikenal sebagai drug delivery system yang memungkinkan pelepasan obat secara terkendali dan berkelanjutan dalam tubuh (Torchilin, 2006).

Selain itu, nanopartikel juga meningkatkan bioavailabilitas obat, terutama untuk senyawa yang sulit larut dalam air. Misalnya, nanopartikel polimer dapat meningkatkan kelarutan dan stabilitas obat dalam darah, memungkinkan efektivitas terapeutik yang lebih tinggi dibandingkan dengan bentuk obat konvensional (Wang et al., 2016). Keunggulan lainnya adalah dalam bidang diagnostik dan pencitraan medis. Nanopartikel seperti quantum dots dan nanopartikel emas dapat digunakan untuk mendeteksi keberadaan biomarker spesifik dengan sensitivitas yang lebih tinggi dibandingkan teknik konvensional (Jain, 2005). Penerapan dalam teknik magnetic resonance imaging (MRI) dan computed tomography (CT scan) juga semakin berkembang dengan penggunaan nanopartikel magnetik yang dapat meningkatkan kontras pencitraan, memungkinkan deteksi dini penyakit (Laurent et al., 2008). Selain itu, dalam terapi kanker, nanopartikel telah membuka jalan bagi teknik hipertermia magnetik, di mana nanopartikel magnetik disuntikkan ke dalam tumor dan dipanaskan menggunakan medan magnet eksternal untuk menghancurkan sel kanker tanpa merusak jaringan sehat di sekitarnya (Pankhurst et al., 2003).

Meskipun memiliki banyak manfaat, aplikasi nanopartikel dalam kesehatan menghadapi beberapa tantangan utama. Salah satunya adalah potensi toksisitas dan efek samping yang belum sepenuhnya dipahami. Karena ukurannya yang sangat kecil, nanopartikel dapat menembus berbagai jaringan tubuh, termasuk sistem saraf pusat, yang berpotensi menimbulkan dampak biologis yang tidak terduga (Nel et al., 2006). Oleh karena itu, diperlukan studi toksikologi yang lebih mendalam sebelum nanopartikel dapat digunakan secara klinis. Tantangan lainnya adalah stabilitas dan reaktivitas nanopartikel dalam lingkungan biologis. Beberapa jenis nanopartikel dapat mengalami agregasi atau interaksi yang tidak diinginkan dengan protein dalam darah, yang dapat mengurangi efektivitasnya atau memicu respons imun yang merugikan (Dobrovolskaia & McNeil, 2007). Oleh karena itu, modifikasi permukaan dan strategi pelapisan nanopartikel masih menjadi fokus utama penelitian. Dari segi produksi dan regulasi, biaya produksi yang tinggi dan tantangan dalam skala industri menjadi hambatan utama. Meskipun banyak nanopartikel telah menunjukkan efektivitas dalam penelitian laboratorium, memproduksinya dalam skala besar dengan kualitas yang konsisten masih menjadi tantangan. Selain itu, regulasi ketat dari badan pengawas obat dan makanan, seperti FDA dan EMA, memperlambat penerapan klinis karena diperlukan uji keamanan dan efektivitas yang ketat sebelum produk berbasis nanopartikel dapat dipasarkan (Fadeel et al., 2018). Tantangan lainnya adalah biodegradasi dan eliminasi nanopartikel dari tubuh. Beberapa nanopartikel berbasis logam, seperti nanopartikel perak atau emas, sulit terurai dan dapat terakumulasi dalam organ tubuh, yang berpotensi menyebabkan efek jangka panjang yang belum sepenuhnya dipahami (Elsaesser & Howard, 2012). Oleh karena

itu, pengembangan nanopartikel berbasis bahan biokompatibel, seperti polimer alami atau liposom, menjadi solusi yang banyak diteliti.

KESIMPULAN

Nanopartikel memiliki keunggulan luar biasa dalam aplikasi kesehatan, terutama dalam penghantaran obat, diagnostik, dan terapi penyakit seperti kanker. Kemampuannya untuk meningkatkan bioavailabilitas obat, menargetkan sel tertentu, dan meningkatkan efektivitas pencitraan medis menjadikannya salah satu inovasi paling menjanjikan dalam dunia kedokteran. Namun, masih terdapat tantangan yang perlu diatasi, termasuk isu toksisitas, stabilitas dalam tubuh, regulasi, serta biaya produksi. Dengan penelitian yang berkelanjutan dan pengembangan metode produksi yang lebih efisien, diharapkan nanopartikel dapat semakin dioptimalkan untuk aplikasi klinis yang lebih luas dan aman.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Ketua Program Studi DIII TLM dan mahasiswa yang telah membantu atas dalam penulisan artikel review ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, S., Ahmad, M., Swami, B. L., & Ikram, S. (2016). Green synthesis of silver nanoparticles using *Azadirachta indica* aqueous leaf extract. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 9(1), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.06.006>
- Amini, S. M. (2019). Gold nanoparticles for drug delivery systems. *Materials Science and Engineering: C*, 93, 392-400. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.08.061>
- Anandalakshmi, K., Venugobal, J., & Ramasamy, V. (2016). Characterization of silver nanoparticles by green synthesis method using *Pedalium murex* leaf extract and their antibacterial activity. *Applied Nanoscience*, 6(3), 399-408. <https://doi.org/10.1007/s13204-015-0449-z>
- Basavegowda, N., & Idhayadhulla, A. (2020). Plant-mediated green synthesis of metal nanoparticles and their biological applications. *New Journal of Chemistry*, 44(16), 6801-6810. <https://doi.org/10.1039/C9NJ06341C>
- Chen, X., & Schluesener, H. J. (2008). Nanosilver: A nanoparticle in medical application. *Toxicology Letters*, 176(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2007.10.004>
- Dhand, C., Dwivedi, N., Loh, X. J., Ying, A. N. J., Verma, N. K., Beuerman, R. W., & Lakshminarayanan, R. (2015). Methods and strategies for the synthesis of diverse nanoparticles and their applications: A comprehensive overview. *RSC Advances*, 5(127), 105003-105037. <https://doi.org/10.1039/C5RA19388E>
- El-Rafie, H. M., & Hamed, M. A. (2014). Antimicrobial activity of green synthesized silver nanoparticles using polysaccharides. *Carbohydrate Polymers*, 113, 86-93. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.06.077>
- Ghorbani, H. R. (2019). Biosynthesis of nanoparticles: Green synthesis of silver nanoparticles using extracts of wild plants. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 187(1), 56-79. <https://doi.org/10.1007/s12010-018-2830-z>
- Gopinath, V., Priyadarshini, S., Loke, M. F., Arunkumar, R., Marsili, E., MubarakAli, D., & Alharbi, N. S. (2020). Biogenic synthesis, characterization of antibacterial silver nanoparticles and evaluation of its toxicity in zebra fish embryos. *Microbial Pathogenesis*, 139, 103916. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2019.103916>

- Gurunathan, S., Han, J. W., Kwon, D. N., & Kim, J. H. (2014). Enhanced antibacterial and anti-biofilm activities of silver nanoparticles against Gram-negative and Gram-positive bacteria. *Nanoscale Research Letters*, 9, 373. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-373>
- Hussein, M. Z., Zainal, Z., Yahaya, A. H., & Foo, D. W. (2005). Controlled release of a plant growth regulator, α -naphthaleneacetate, from the lamellar nanocomposite zinc-aluminium-layered double hydroxide. *Journal of Controlled Release*, 107(2), 299-308. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2005.06.016>
- Iravani, S. (2011). Green synthesis of metal nanoparticles using plants. *Green Chemistry*, 13(10), 2638-2650. <https://doi.org/10.1039/C1GC15386B>
- Jain, D., Daima, H. K., Kachhwaha, S., & Kothari, S. L. (2009). Synthesis of plant-mediated silver nanoparticles using papaya fruit extract and evaluation of their antimicrobial activities. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 4(3), 557-563.
- Jo, Y. K., Kim, B. H., & Jung, G. (2009). Antifungal activity of silver ions and nanoparticles on phytopathogenic fungi. *Plant Disease*, 93(10), 1037-1043. <https://doi.org/10.1094/PDIS-93-10-1037>
- Kharissova, O. V., Dias, H. V. R., Kharisov, B. I., Pérez, B. O., & Pérez, V. M. (2013). The greener synthesis of nanoparticles. *Trends in Biotechnology*, 31(4), 240-248. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.01.003>
- Kim, J. S., Kuk, E., Yu, K. N., Kim, J. H., Park, S. J., Lee, H. J., ... & Cho, M. H. (2007). Antimicrobial effects of silver nanoparticles. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 3(1), 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2006.12.001>
- Logeswari, P., Silambarasan, S., & Abraham, J. (2013). Synthesis of silver nanoparticles using plants extract and analysis of their antimicrobial property. *Journal of Saudi Chemical Society*, 17(2), 203-208. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2012.04.007>
- Mahapatra, O., Bhagat, M., & Gopalakrishnan, C. (2008). Green synthesis of silver nanoparticles using *Ocimum sanctum* (Tulsi) leaf extract and screening its antimicrobial activity. *Materials Letters*, 62(29), 4247-4250. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.06.051>
- Rai, M., Yadav, A., & Gade, A. (2009). Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials. *Biotechnology Advances*, 27(1), 76-83. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.09.002>
- Singh, M., Kalaivani, R., Manikandan, S., & Kumaraguru, A. K. (2013). Facile green synthesis of silver nanoparticles using aqueous extract of *Turbinaria ornata* and its antibacterial activity. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 106, 182-189. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2012.12.084>
- Sun, Q., Cai, X., Li, J., Zheng, M., Chen, Z., Yu, X., & Zhang, Y. (2014). Green synthesis of silver nanoparticles using tea leaf extract and evaluation of their stability and antibacterial activity. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 444, 226-231. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.12.036>