

DOI: doi.org/10.21009/03.1201.FA27

STUDI AWAL BIOSINTESIS NANOPARTIKEL ZNO MENGGUNAKAN EKSTRAK DAUN *MORINGA OLEIFERA* DENGAN TEKNIK PRESIPITASI

Ridha Octa Alhuriyyah Azzahra^{1, a)}, Iwan Sugihartono^{1, b)}, Nurfina Yudasari²⁾, Akhmad Futukhillah Fataba Alaih³⁾, Djoko Triyono³⁾

¹Program Studi Fisika, FMIPA Universitas Negeri Jakarta, Jl. Rawamangun Muka No. 01, Rawamangun 13220, Indonesia

²Center For Photonic National Research and Innovation Agency, Banten 15314, Indonesia

³Departemen Fisika, FMIPA UI, Kampus Baru UI Depok, Jawa Barat 16426, Indonesia

Email: ^{a)}ridhaocta26@gmail.com, ^{b)}iwan-sugihartono@unj.ac.id

Abstrak

Biosintesis nanopartikel ZnO telah dilakukan menggunakan teknik presipitasi dengan melarutkan 2 gram seng nitrat tetrahidrat [$Zn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$] ke dalam 20 ml ekstrak daun kelor (*Moringa oleifera*) pada pH 9 dan suhu 60°C selama 20 menit. Serbuk nanopartikel ZnO diperoleh setelah endapan dikalsinasi pada suhu 400°C selama 2 jam. Pola difraksi dari hasil karakterisasi menggunakan teknik difraksi sinar-x dan pencocokan dengan standar *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD) nomor #98-018-0050 mengkonfirmasi bahwa struktur kristal dari nanopartikel ZnO adalah polikristal heksagonal wurtzite dengan *space group* $P6_3mc$. Selanjutnya, hasil analisis pola difraksi memberikan parameter struktur kristal berupa parameter kisi $a = 3.253 \text{ \AA}$, $c = 5.210 \text{ \AA}$, serta rata-rata *Full Width at Half Maximum* (FWHM) sebesar 0.6494° . Mengacu pada nilai FWHM, ukuran kristalit pada bidang (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112), (201), dan (202) berturut-turut adalah 41.32, 41.6, 49.47, 16.34, 13.88, 8.98, 8.72, 11.7, dan 10.71 nm yang menghasilkan rata-rata ukuran kristalit sebesar 22.524 nm.

Kata-kata kunci: biosintesis, nanopartikel ZnO, moringa oleifera, struktur kristal, ukuran kristalit.

Abstract

Biosynthesis of ZnO nanoparticles was carried out using the precipitation technique by dissolving 2 gram of Zinc Nitrate Tetrahydrate [$Zn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$] in 20 ml of *Moringa oleifera* leaf extract at pH 9 and temperature 60°C for 20 minutes. ZnO nanoparticles powder was obtained after the precipitate was calcined at 400°C for 2 hours. The diffraction pattern from the results of the characterization using the X-Ray Diffraction (XRD) technique and matching with the Inorganic Crystal Structure Database (ICSD) standard number #98-018-0050 confirmed that the crystal structure of the ZnO nanoparticles is hexagonal wurtzite polycrystalline with a $P6_3mc$ space group. Furthermore, the results of the diffraction pattern analysis provide crystal structure parameters in the form of lattice parameters $a = 3.253 \text{ \AA}$, $c = 5.210 \text{ \AA}$, and average Full Width at Half Maximum (FWHM) of 0.6494° . According to the FWHM value, the crystallite sizes in fields (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112), (201), and (202) respectively are 41.32, 41.6, 49.47, 16.34, 13.88, 8.98, 8.72, 11.7, and 10.71 nm which resulted in an average crystallite size of 22.524 nm.

Keywords: biosynthesis, ZnO nanoparticles, moringa oleifera, crystal structure, crystallite sizes.

PENDAHULUAN

Seng oksida (ZnO) merupakan semikonduktor anorganik tipe-n golongan II – VI yang memiliki fase heksagonal dan struktur *wurtzite* [1, 2]. ZnO memiliki lebar celah pita sebesar 3.37 eV dan energi ikat eksiton yang tinggi yaitu sebesar 60 meV [3]. Sehingga, apabila ZnO digunakan sebagai bahan baku untuk aplikasi optoelektronik pada suhu kamar akan memiliki efektivitas dan efisiensi yang tinggi [2, 3]. Secara umum, serbuk ZnO memiliki karakteristik tidak berbau, tidak beracun, biokompatibilitas, dan tahan terhadap perlakuan suhu tinggi [4, 5].

ZnO sebagai material semikonduktor mudah disintesis menjadi berbagai bentuk struktur nano, di antaranya *nanowires*, *nanotubes*, *nanorings*, *nanorods*, *nanoflowers*, dan *nanoparticles*. Nanopartikel ZnO (ZnO-NP) memiliki mobilitas elektron yang tinggi yaitu sebesar 200 cm²/Vs, stabilitas termal, dan absorbansi yang baik [2]. Ditinjau dari sifat absorbansi pada rentang panjang gelombang 300 – 350 nm (sinar ultraviolet), ZnO-NP dapat digunakan untuk aplikasi panel surya, perangkat penyimpanan elektrokimia, pelapisan material, dan industri cat [6, 7]. Selain itu, ZnO-NP juga dapat digunakan untuk aplikasi fotokatalis, antibakteri, antioksidan, sensor gas, industri farmasi, dan lain-lain [8].

Terdapat beberapa metode sintesis nanopartikel ZnO, di antaranya adalah hidrotermal [9], *ball milling* [10], solvotermal [11], sol-gel [12], elektrokimia [13], dan sonokimia [14]. Bila dibandingkan dengan metode sintesis hijau (biosintesis), biosintesis lebih menguntungkan karena hemat biaya dan ramah lingkungan [15].

Daun kelor (*Moringa oleifera*) termasuk ke dalam genus tunggal dari famili *Moringaceae* yang dilaporkan kaya akan β -karoten, protein, vitamin C, kalsium, dan potassium [16]. Daun kelor juga mengandung senyawa fenolik, flavonoid, asam askorbat, karotenoid, tanin, alkaloid, terpenoid, dan saponin yang mampu bertindak sebagai sumber antioksidan alami [16, 20]. Ekstrak tanaman mengandung senyawa metabolit sekunder seperti senyawa fenolik, flavonoid, flavonon, terpenoid, polifenol, alkaloid, dan tanin yang dapat bereaksi dengan ion logam serta dapat berperan sebagai bio-reduksi [17, 18]. Senyawa flavonoid mengandung gugus hidroksil seperti -OH yang dapat mereduksi ion logam Zn²⁺ menjadi ZnO [17, 18]. Gugus-gugus fungsi dari senyawa metabolit tanaman seperti hidroksil (-OH), karbonil (C=O), ester (-COO-), dan lain-lain juga dapat berperan sebagai agen *capping* dengan cara menyelubungi partikel Zn sehingga tidak menyebabkan agregasi antar partikel dan membentuk nanopartikel ZnO yang stabil [17, 19].

Penelitian yang dilakukan oleh Rhamdiyah & Maharani (2022) melaporkan bahwa ZnO-NP telah berhasil disintesis menggunakan ekstrak daun kelor dan menghasilkan rata-rata ukuran kristal yaitu sebesar 16.97 nm [1]. Ngom dkk., (2021) melaporkan bahwa ZnO-NP telah berhasil disintesis menggunakan ekstrak daun kelor dan menghasilkan rata-rata ukuran kristalit sebesar 10.8 nm [20]. Elumalai dkk., (2015) juga melaporkan bahwa ZnO-NP telah berhasil disintesis menggunakan ekstrak daun kelor dan menghasilkan ukuran partikel yaitu sebesar 24 nm [16].

Di dalam *paper* ini, telah dilakukan studi awal biosintesis nanopartikel ZnO menggunakan ekstrak daun kelor dengan teknik presipitasi. Selanjutnya, akan dilakukan analisis pola difraksi dan perhitungan parameter struktur kristal serta ukuran kristalit yang dihasilkan.

METODOLOGI

Nanopartikel ZnO disintesis menggunakan ekstrak daun kelor dengan metode presipitasi pada pH 9. Adapun tahapan eksperimen biosintesis nanopartikel ZnO adalah membuat bubuk daun kelor, membuat ekstrak daun kelor, menyiapkan prekursor, membuat larutan, mengatur pH larutan menjadi 9, proses pengendapan, kalsinasi pada suhu 400°C, dan karakterisasi sampel.

Pembuatan Ekstrak Daun Kelor

Langkah awal pembuatan ekstrak daun kelor adalah mencuci daun menggunakan air deionisasi lalu mengeringkan daun pada suhu kamar selama 3-5 hari. Daun yang telah kering dihaluskan menggunakan *blender* hingga menjadi bubuk. Sebanyak 20 gram bubuk daun kelor dimasukkan ke dalam 100 ml air deionisasi dan dipanaskan pada suhu 60°C selama 20 menit dengan pengadukan

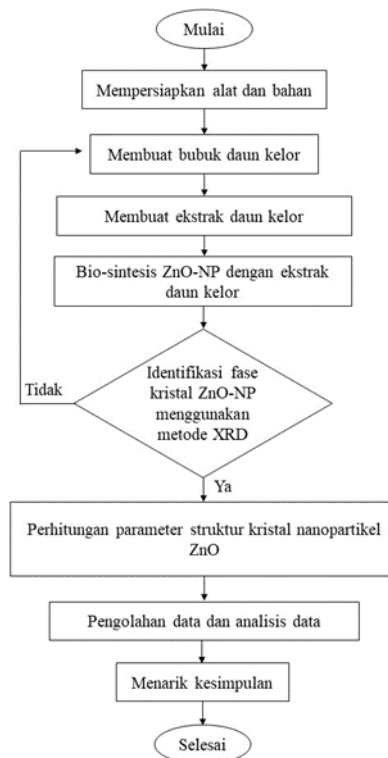
konstan. Hasil campuran didinginkan pada suhu ruang dan disaring menggunakan kertas saring hingga menghasilkan ekstrak daun kelor.

Biosintesis Nanopartikel ZnO

Sebanyak 2 gram seng nitrat tetrahidrat [$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$] dilarutkan ke dalam 20 ml ekstrak daun kelor dan dipanaskan di atas *hotplate magnetic stirrer* pada suhu 60°C dengan pengadukan konstan. Kemudian, larutan NaOH ditambahkan setetes demi tetes ke dalam campuran untuk mengubah pH larutan menjadi 9. Seluruh campuran tersebut dipanaskan dan diaduk konstan hingga campuran berubah warna dari coklat keemasan menjadi kuning tua. Selanjutnya, campuran didiamkan selama 1 jam untuk mendapatkan endapan berwarna kuning tua. Endapan yang dihasilkan dicuci bersih menggunakan air deionisasi dan disentrifugasi dengan kecepatan 1000 rpm selama 10 menit. Kemudian, endapan yang telah dicuci didiamkan selama 18 jam dan dikalsinasi menggunakan *furnace* pada suhu 400°C selama 2 jam untuk menghasilkan serbuk ZnO-NP.

Karakterisasi

Karakterisasi sampel menggunakan teknik *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan di Gedung UPP IPD FMIPA, Universitas Indonesia, Depok. Instrumen yang digunakan adalah Malven Panalytic dengan memberikan tegangan sebesar 40 kV dan arus sebesar 30 mA. Pengujian dilakukan dengan radiasi $\text{CuK}\alpha$ pada panjang gelombang 1.54 \AA (PAN-analytical). Selanjutnya, karakterisasi sampel menggunakan teknik XRD dapat menganalisis pola difraksi, parameter struktur kristal, dan ukuran kristalit.



GAMBAR 1. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

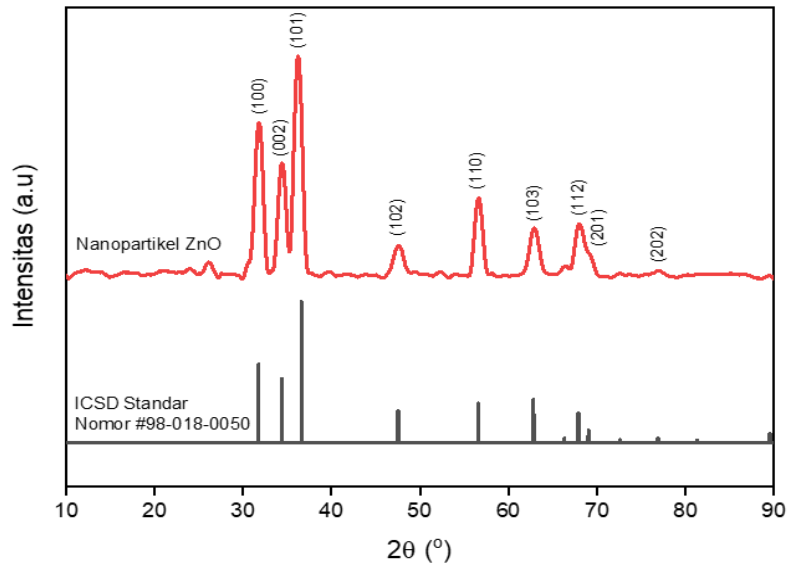
Mekanisme Biosintesis Nanopartikel ZnO

Pembentukan nanopartikel ZnO diawali dengan reaksi kimia antara ion-ion Zn^{2+} dengan senyawa-senyawa metabolit sekunder tanaman seperti senyawa fenolik dan flavonoid serta NaOH. Koloid terbentuk ketika ion Zn^{2+} dan OH^- mencapai angka kritikal larutan [17]. Kelebihan ion OH^- akan bereaksi dengan $Zn(OH)_2$ membentuk kompleks $Zn(OH)_4^{2-}$ kemudian $Zn(OH)_4^{2-}$ akan terdisosiasi kembali membentuk ion Zn^{2+} dan OH^- dan selanjutnya membentuk ZnO [17]. Dekomposisi Zn kompleks menjadi nanopartikel ZnO dilakukan dengan proses kalsinasi pada suhu 125 – 500°C. Temperatur tinggi memberikan energi pendorong untuk memutus ikatan antara Zn dan OH yang berada di permukaan atau interstisi ZnO untuk membentuk radikal $Zn^{2+} + OH^-$ yang selanjutnya terjadi penyusunan ulang dan pembentukan nanopartikel [17].

Senyawa flavonoid dan fenolik dengan bantuan NaOH dapat mereduksi ion-ion Zn^{2+} menjadi atom Zn^0 [17,19]. Kemudian, atom-atom Zn^0 akan membentuk kluster Zn^0 dan mengalami pertumbuhan partikel di mana laju pertumbuhan ini dapat mempengaruhi ukuran partikel [17]. Gugus-gugus fungsi dari senyawa metabolit tanaman seperti hidroksil (-OH), karbonil (C=O), ester (-COO-), dan lain-lain akan berinteraksi dengan permukaan Zn dan menyelubungi kluster Zn^0 (berperan sebagai *capping*) sehingga tidak terjadi agregasi antar kluster Zn^0 dan membentuk nanopartikel ZnO yang stabil [17, 19]. Penambahan NaOH dapat membantu dan meningkatkan proses reduksi sehingga mempermudah komponen biologi dalam mereduksi ion-ion Zn^{2+} menjadi Zn^0 [17, 21]. Selain itu, penambahan NaOH dapat mempercepat pertumbuhan nukleasi nanopartikel ZnO selama reaksi berlangsung [22].

Struktur Kristal Nanopartikel ZnO

GAMBAR 2 menampilkan pola difraksi nanopartikel ZnO yang disintesis menggunakan daun kelor. Analisis hasil XRD mengidentifikasi 9 bidang kristal yang terdiri dari bidang (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112), (201), dan (202) sesuai dengan posisi sudut 2θ masing-masing pada 31.841°, 34.542°, 36.179°, 47.603°, 56.659°, 62.847°, 67.929°, 69.037°, dan 77,005°. Pada gambar terlihat beberapa puncak difraksi lain yang menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO tidak memiliki kemurnian yang tinggi, hal ini dikarenakan nanopartikel ZnO mengandung sejumlah pengotor organik seperti karbon. Ditinjau dari standar *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD) nomor #98-018-0050 mengkonfirmasi bahwa struktur kristal dari nanopartikel ZnO adalah polikristal heksagonal *wurtzite* dengan *space group* $P6_3mc$. Hal ini juga terkonfirmasi dari nilai perbandingan c dan a dengan nilai $c/a \sim 1.62$ [23].



GAMBAR 2. Pola Difraksi Nanopartikel ZnO Menggunakan Ekstrak Daun Kelor

Selanjutnya, analisis pola difraksi dapat mengidentifikasi parameter struktur kristal [23]. TABEL 1 menyajikan data parameter struktur kristal nanopartikel ZnO menggunakan ekstrak daun kelor berupa posisi sudut 2θ pada bidang (hkl) yang teramati, *Full Width at Half Maximum* (FWHM), jarak antar kisi (*d-space*), mikrostrain, dan ukuran kristalit. TABEL 2 menyajikan perbandingan data parameter kisi nanopartikel ZnO dengan standar nomor #98-018-0050 berupa nilai *a=b*, *c*, dan volume unit sel.

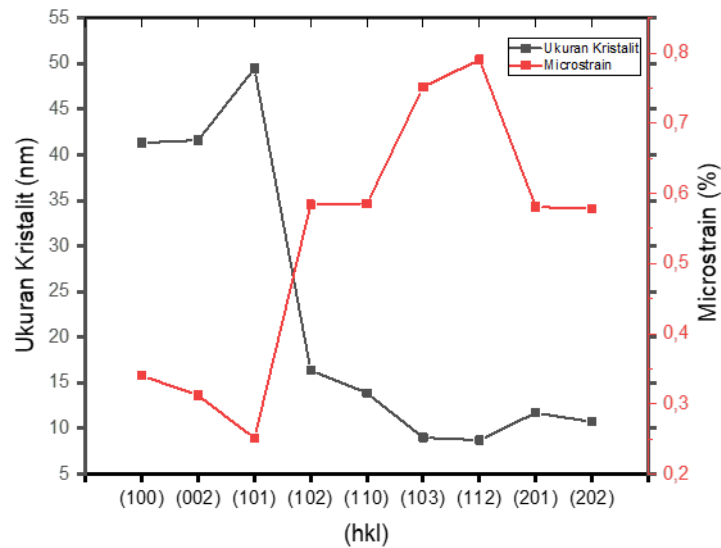
TABEL 1. Parameter Struktur Kristal Nanopartikel ZnO Menggunakan Ekstrak Daun Kelor

(hkl)	2θ (°)	FWHM (°)	<i>d-spacing</i> (Å)	Mikrostrain (%)	Ukuran Kristalit (nm)
(100)	31.841	0.2342	2.8105	0.34	41.316
(002)	34.542	0.2342	2.5967	0.3121	41.602
(101)	36.179	0.2007	2.4829	0.2509	49.469
(102)	47.603	0.6022	1.9103	0.5843	16.344
(110)	56.659	0.736	1.6246	0.5854	13.875
(103)	62.847	1.0735	1.4775	0.7515	8.977
(112)	67.929	0.8312	1.3788	0.7909	8.717
(201)	69.037	0.8622	1.3593	0.5807	11.703
(202)	77.005	1.0706	1.2384	0.5781	10.711

TABEL 2. Perbandingan Parameter Kisi Nanopartikel ZnO Menggunakan Ekstrak Daun Kelor dengan Standar Nomor #98-018-0050

	<i>a=b</i> (Å)	<i>c</i> (Å)	Volume (Å ³)
Standar	3.250	5.211	47.67
Nanopartikel ZnO	3.253	5.210	47.61

Berdasarkan TABEL 1, ukuran kristalit dan mikrostrain dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Debye-Scherrer dan Stoke-Wilson yang diilustrasikan oleh GAMBAR 3 [24]. GAMBAR 3 menunjukkan hubungan terbalik antara ukuran kristalit dan mikrostrain yang dapat dikaitkan dengan penurunan volume yang ditempati oleh konstituen di dalam struktur kristal [25]. Ukuran kristalit berbanding terbalik dengan nilai FWHM. Sehingga, berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan menggunakan persamaan Debye-Scherrer, rata-rata ukuran kristalit nanopartikel ZnO yang disintesis menggunakan ekstrak daun kelor yaitu sebesar 22.524 nm.



GAMBAR 3. Variasi Ukuran Kristal dan *Microstrain* Nanopartikel ZnO Menggunakan Ekstrak Daun Kelor

SIMPULAN

Nanopartikel ZnO telah berhasil disintesis menggunakan ekstrak daun kelor dengan teknik presipitasi pada pH 9. Ekstrak daun kelor mengandung senyawa metabolit sekunder tanaman yang mampu berperan sebagai bio-reduksi dan penstabil nanopartikel ZnO. Pengujian teknik difraksi sinar-x mengidentifikasi bahwa struktur kristal nanopartikel ZnO adalah polikristal heksagonal *wurtzite* dengan *space group* $P6_3mc$. Analisis pola difraksi mengkonfirmasi bahwa parameter struktur kristal nanopartikel ZnO berupa $a = 3.253 \text{ \AA}$, $c = 5.210 \text{ \AA}$, $c/a = 1.602$, volume = 47.61 \AA^3 , dan rata-rata nilai FWHM pada 9 bidang hkl yaitu sebesar 0.6494° . Kurva variasi ukuran kristalit dengan *microstrain* memiliki hubungan terbalik yang berkaitan dengan pergeseran posisi bidang ketika luas permukaan meningkat. Rata-rata ukuran kristalit nanopartikel ZnO menggunakan ekstrak daun kelor yaitu sebesar 22.524 nm.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih kami ucapkan kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi melalui Direktorat Riset, Teknologi, dan Pengabdian kepada Masyarakat (DRTPM) yang telah memberikan pendanaan penelitian melalui Hibah Penelitian Fundamental tahun 2023.

REFERENSI

- [1] F. K. Rhamdiyah, D. K. Maharani, "Biosynthesis of ZnO Nanoparticles from Aqueous Extract of *Moringa Oleifera* L.: Its Application as Antibacterial and Photocatalyst," *Indonesian Journal of Chemical Science*, pp. 92-102, 2022.
- [2] J. V. González-Fernández *et al.*, "Green Method, Optical and Structural Characterization of ZnO Nanoparticles Synthesized Using Leaves Extract of *M. oleifera*," *Journal of Renewable Materials*, vol. 10, no. 3, pp. 1-16, 2022.
- [3] B. Gherbi *et al.*, "Effect of pH Value on the Bandgap Energy and Particles Size for Biosynthesis of ZnO Nanoparticles: Efficiency for Photocatalytic Adsorption of Methyl Orange," *Sustainability*, vol. 14, no. 18, pp. 1-14, 2022.
- [4] S. T. Karam, A. F. Abdulrahman, "Green Synthesis and Characterization of ZnO Nanoparticles by Using Thyme Plant Leaf Extract," *Photonics*, pp. vol. 9, no. 8, pp. 1-20, 2022.

- [5] H. Sutanto, W. Singgih, "Semikonduktor Fotokatalis Seng Oksida dan Titania (Sintesis, Deposisi dan Aplikasi)," Semarang: Penerbit Telescope, 2015.
- [6] I. Ngom *et al.*, "On the Use of Moringa Oleifera Leaves Extract for the Biosynthesis of NiO and ZnO Nanoparticles," *Materials Research Society*, pp. 1-11, 2020.
- [7] M. A. Fagier, "Plant-Mediated Biosynthesis and Photocatalysis Activities of Zinc Oxide Nanoparticles: A Prospect towards Dyes Mineralization," *Journal of Nanotechnology*, pp. 1-15, 2021.
- [8] Z. S. Keskin, Ü. Açıke, "Biosynthesis, Characterization and Antioxidant Properties of ZnO Nanoparticles Using Punica Granatum Peel Extract as Reducing Agent," *Cumhuriyet Science Journal*, vol. 44, no. 1, pp. 90-98, 2023.
- [9] V. P. Lestari, Abrar, I. W. Fathona, "Sintesis Nanostruktur Zno Dengan Metode Hidrotermal Untuk Aplikasi Sensor Gas Butana," *e-Proceeding of Engineering*, vol. 6, no. 2, p. 5375, 2019.
- [10] S. Wirunchit, P. Gansa, W. Koetniyom, "Synthesis of ZnO nanoparticles by Ball-milling process for biological applications," *Materials Today: Proceedings*, 2021.
- [11] Y. Wang *et al.*, "Solvothetical Synthesis of ZnO Nanoparticles for Photocatalytic Degradation of Methyl Orange and p-Nitrophenol," *Water*, vol. 13, no. 22, p. 3224, 2021.
- [12] G. Singh, S. P. Singh, "Synthesis of zinc oxide by sol-gel method and to study its structural properties," *AIP Conference Proceedings*, 2020.
- [13] Y. Wu *et al.*, "Electrochemical Synthesis of ZnO Nanoparticles and preparation of Pea Starch/ZnO composite for Active Food Packaging Application," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 14, pp. 10745-10753, 2019.
- [14] M. T. Noman *et al.*, "One-Pot Sonochemical Synthesis of ZnO Nanoparticles for Photocatalytic Applications, Modelling and Optimization," *Materials*, vol. 13, 2020.
- [15] Y. Y. Chan *et al.*, "Facile green synthesis of ZnO nanoparticles using natural-based materials: Properties, mechanism, surface modification and application," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, pp. 1-22, 2021.
- [16] R. Verma *et al.*, "ZnO nanomaterials: Green synthesis, toxicity evaluation and new insights in biomedical applications," *Journal of Alloys and Compounds*, pp. 1-20, 2021.
- [17] K. Elumalai *et al.*, "Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using Moringa oleifera leaf extract and evaluation of its antimicrobial activity," *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 143, pp. 158-164, 2015.
- [18] R. Nurbayasari, E. Chasanah, Nurhayati, "Nanopartikel Seng Oksida (ZnO) dari Biosintesis Ekstrak Rumput Laut Coklat Sargassum sp. dan Padina sp.," *Jurnal Perikanan*, Universitas Gadjah Mada, vol. 19, no. 1, pp. 17-28, 2017.
- [19] M. Naseer *et al.*, "Green route to synthesize Zinc Oxide Nanoparticles using leaf extracts of Cassia fistula and Melia azadarach and their antibacterial potential," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, p. 9055, 2020.
- [20] Y. Nurlina, I. Syahbanu, "Sintesis Nanopartikel Zink Oksida (ZnO) dengan Penambahan Ekstrak Klorofil dari Daun Suji sebagai sumber Capping Agent," *POSITRON*, pp. 123-130, 2020.
- [21] I. Ngom *et al.*, "Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles using extracts of Moringa Oleifera: Structural & optical properties," *Materials Today: Proceedings*, vol. 36, no. 2, pp. 526-533, 2021.

- [22] D. Anggraheni, Isnaeni, I. Sugihartono, “Pengaruh Variasi PH terhadap Sifat Optik ZNO Nanopartikel dari hasil Biosintesis,” *Prosiding Seminar Nasional Fisika [E-Journal] SNF2020*, vol. 9, pp. 1-4, 2020.
- [23] V. Koutu, L. Shastri, M. M. Malik, “Effect of NaOH concentration on optical properties of zinc oxide nanoparticles,” *Materials Science-Poland*, vol. 34, no. 4, pp. 819-827, 2016.
- [24] I. Sugihartono *et al.*, “The Effect of Al-Cu Co-Dopant on Morphological, Structure, and Optical Properties of ZnO Nanostructures,” *Materials Research*, vol. 26, p. e20220499, 2023.
- [25] J. Iqbal *et al.*, “Facile synthesis of Zn doped CuO hierarchical nanostructures: Structural, optical and antibacterial properties,” *AIP ADVANCES*, vol. 5, no. 12, 2015.
- [26] Q. M. Bataineh *et al.*, “Synthesis, Crystallography, Microstructure, Crystal Defects, Optical and Optoelectronic Properties of ZnO:CeO₂ Mixed Oxide Thin Films,” *Photonics*, vol. 7, no. 4, p. 112, 2020.