

DOI: doi.org/10.21009/03.1201.FA28

# SINTESIS DAN ANALISIS STRUKTUR KRISTAL NANOPARTIKEL ZNO MENGGUNAKAN METODE PRESIPITASI PH-12

Nia Tiawati<sup>1, a)</sup>, Iwan Sugihartono<sup>1, b)</sup>, Akhmad Futukhillah Fataba Alaih<sup>2)</sup>,  
Djoko Triyono<sup>2)</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Jakarta, Jalan Rawamangun Muka, Rawamangun, Jakarta Timur 13220, Indonesia

<sup>2</sup>Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia

Email: <sup>a)</sup>niatiawati26@gmail.com, <sup>b)</sup>iwan-sugihartono@unj.ac.id

## Abstrak

Nanopartikel ZnO telah disintesis melalui metode presipitasi dengan pH-12 dan larutan prekursor dipanaskan pada suhu 60°C selama proses pengadukan. Selanjutnya sampel yang diperoleh, diberi perlakuan *annealing* selama 4 jam dengan suhu 400°C. Karakterisasi menggunakan teknik Difraksi Sinar-X (XRD) pada sampel telah dilakukan untuk mengetahui fase yang terbentuk dan struktur kristal. Berdasarkan *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD) nomor 98-018-0050, pola Difraksi Sinar-X (XRD) dari nanopartikel ZnO memiliki struktur wurtzit heksagonal polikristalin dengan *space group* P6<sub>3</sub>mc. Ukuran kristalit pada bidang (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201) berturut-turut adalah 33.04 nm, 32.73 nm, 34.41 nm, 30.46 nm, 26.89 nm, 26.06 nm, 25.01 nm, 25.46 nm, 25.70 nm. Rata-rata ukuran kristalit dari sampel nanopartikel ZnO ini adalah 28.86 nm. Sementara itu, parameter kisi  $a = b = 3.25 \text{ \AA}$  dan  $c = 5.21 \text{ \AA}$  dengan volume unit sel sebesar  $47.61 \text{ \AA}^3$ .

**Kata-kata kunci:** nanopartikel ZnO, presipitasi, XRD, pH, ukuran kristalit.

## Abstract

ZnO nanoparticles were synthesized by precipitation method with a pH of 12 and the precursor solution was heated at 60°C during the stirring process. Furthermore, the samples obtained were annealed for 4 hours at 400°C. Characterization using X-Ray Diffraction (XRD) technique on the sample has been carried out to determine the phase formed and the crystal structure. Based on the Inorganic Crystal Structure Database (ICSD) number 98-018-0050, the X-Ray Diffraction (XRD) pattern of ZnO nanoparticles has a polycrystalline hexagonal wurtzite structure with the space group P6<sub>3</sub>mc. The crystallite size in (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201) plane are 33.04 nm, 32.73 nm, 34.41 nm, 30.46 nm, 26.89 nm, 26.06 nm, 25.01 nm, 25.46 nm, 25.70 nm, respectively. The average crystallite size of the ZnO nanoparticle samples was 28.86 nm. Meanwhile, lattice parameters  $a = b = 3.25 \text{ \AA}$  and  $c = 5.21 \text{ \AA}$  with a unit cell volume of  $47.61 \text{ \AA}^3$ .

**Keywords:** ZnO nanoparticles, precipitation, XRD, pH, crystallite size.

## PENDAHULUAN

Partikel berukuran 1–100 nm biasa disebut dengan nanopartikel [1]. Secara umum nanopartikel memiliki karakteristik ringan dan kecil [2]. Nanopartikel merupakan material penelitian yang sangat menarik, material berukuran nano biasanya memiliki partikel dengan sifat kimia atau fisika yang lebih unggul dari material berukuran besar [3]. Nanopartikel dapat terjadi secara alami atau buatan dan dapat dibawa dalam fase padat, cair, atau gas [4].

Nanopartikel dari berbagai material seperti GaN, AlN, Si, InN, ZnO, BN, dan lain-lain telah dipelajari secara eksperimental dan teoritis [5]. Diantara material-material ini, ZnO termasuk semikonduktor oksida logam golongan II-VI karena seng dan oksigen berada pada tabel periodik ke-2 dan ke-6 [6]. Struktur kristal ZnO terdiri dari 3 bentuk, yaitu: *hexagonal wurtzite*, *cubic zincblende*, dan *cubic rocksalt* [7]. ZnO memiliki aplikasi yang luas seperti disinfektan air [8], fotokatalis [9], sel surya [10], sensor [11], dan lain-lain. Hal ini disebabkan ZnO memiliki energi ikat eksitasi yang besar (60 meV) [12] pada suhu kamar dan celah pita lebar (3.37 eV) [13].

Berbagai metode telah didemonstrasikan untuk sintesis nanopartikel ZnO seperti *Metal Organic Chemical Vapor Deposition* (MOCVD) [14], *Ultrasonic Spray Pyrolysis* (USP) [15], *hydrothermal* [16], elektrodeposisi [17], *Chemical Bath Deposition* (CBD) [18], sol-gel [19], presipitasi [20], solvothermal [21], dan lain-lain. Bila dibandingkan dengan metode-metode tersebut, presipitasi memiliki beberapa keunggulan dalam sintesis nanopartikel ZnO yaitu kualitas yang lebih baik dan memiliki biaya yang efektif [22]. Penelitian Samanta dkk., 2018 melaporkan bahwa nanopartikel ZnO dengan ukuran pada kisaran 10-30 nm dapat diperoleh dengan metode presipitasi [23].

Dalam penelitian ini telah dilakukan sintesis nanopartikel ZnO menggunakan metode presipitasi. Selanjutnya, sampel hasil sintesis dikarakterisasi struktural dengan menggunakan Difraksi Sinar-X (XRD). Hasil Difraksi Sinar-X (XRD) menunjukkan tidak adanya impuritas atau fase kedua pada material nanopartikel ZnO.

## METODOLOGI

Sintesis nanopartikel ZnO dengan menggunakan metode presipitasi dilaksanakan di Laboratorium Fisika Material, Laboratorium Penelitian Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Jakarta. Tahapan sintesis yang dilakukan yaitu: pembuatan larutan prekursor, pengadukan larutan dengan *magnetic stirrer* dan penambahan natrium hidroksida [NaOH], pencucian dan penyaringan larutan menggunakan *centrifuge*, pengeringan endapan dan *annealing* sampel dengan *muffle furnace* serta karakterisasi sampel dengan Difraksi Sinar-X (XRD).

### Sintesis Nanopartikel ZnO

Dalam metode ini, 5.22 gram seng nitrat tetrahidrat [ $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ] 0.25 M dilarutkan ke dalam 80 ml air deionisasi dan diaduk terus menerus pada temperatur 60°C untuk mencapai larutan yang homogen. Setelah 5 menit, larutan natrium hidroksida [NaOH] ditambahkan ke dalam larutan tetes demi tetes hingga pH-12 untuk mendapatkan endapan ZnO. Setelah itu, larutan dibiarkan selama 12 jam tanpa diaduk agar endapan ZnO mengendap di dasar wadahnya. Selanjutnya, endapan dicuci dengan air deionisasi sebanyak 4 kali, dilanjutkan dengan proses sentrifugasi 1.000 rpm selama 10 menit untuk memisahkan endapan dari larutan. Endapan dikeringkan dengan temperatur 100°C selama 2 jam 30 menit. Setelah proses pengeringan, dianil selama 4 jam pada temperatur 400°C agar terbentuk nanopartikel ZnO.

### Karakterisasi Nanopartikel ZnO

Karakterisasi nanopartikel ZnO menggunakan XRD Malvern Panalytical pada tegangan 40 kV serta arus 30 mA di Laboratorium UPP Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia. Sampel diradiasi anoda Cu dengan panjang gelombang 1.5406 Å. Analisis Difraksi Sinar-X (XRD) untuk mengidentifikasi fasa dan mengetahui struktur nanopartikel ZnO.

Data yang diperoleh kemudian diolah menggunakan *software HighScore Plus* dengan *Inorganic Crystal Structure Database (ICSD)* untuk mengkonfirmasi fase yang terbentuk adalah seng oksida.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

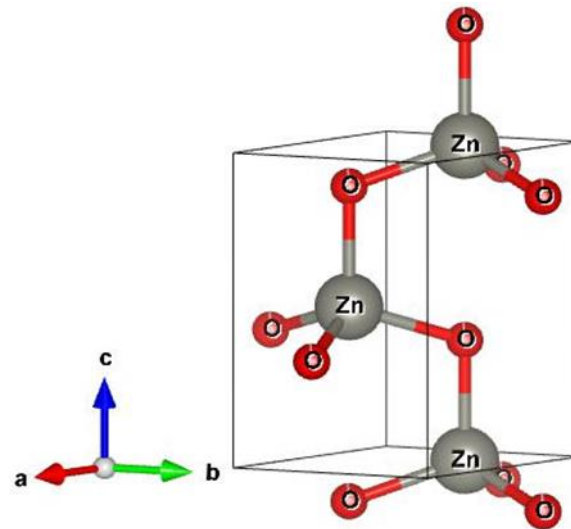
### Hasil Sintesis Nanopartikel ZnO

Selama proses pembentukan nanopartikel ZnO melalui metode presipitasi melibatkan beberapa reaksi kimia antara ion-ion  $Zn^{2+}$  dengan natrium hidroksida [NaOH] [24]. Penambahan natrium hidroksida [NaOH] ke dalam larutan seng nitrat tetrahidrat [ $Zn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ ] akan membentuk endapan  $Zn(OH)_2$ . Selanjutnya  $Zn(OH)_2$  akan teroksidasi menjadi ion  $Zn^{2+}$ . Proses pembentukan ikatan Zn-O dan kristalisasi ZnO terjadi selama proses *annealing* yang dipengaruhi oleh temperatur anil. Dalam hal ini dapat dikatakan bahwa suhu pengeringan  $100^\circ C$  belum menghasilkan nanopartikel ZnO dengan sempurna. Berbeda dengan pola Difraksi Sinar-X (XRD) untuk suhu *annealing*  $400^\circ C$ , tidak terlihat adanya puncak yang bersesuaian dengan unsur lain. Dengan demikian, temperatur *annealing*  $400^\circ C$  mendorong terbentuknya ikatan Zn-O antar unsur penyusun ZnO [25]. Fenomena ini juga diamati dalam studi Umar dkk., 2015 [26].

Terbentuknya ukuran kristal yang kecil sangat dipengaruhi oleh penambahan NaOH selama sintesis. Kemampuan mereduksi berbagai gugus fungsi menurun dengan adanya konsentrasi  $H^+$  yang tinggi pada kondisi pH rendah. Namun, ketika pH dinaikkan, kemampuan berbagai gugus fungsi sebagai zat pereduksi meningkat sehingga meningkatkan stabilitas dan mencegah aglomerasi seiring dengan peningkatan ion  $OH^-$  [27]. Semakin tinggi nilai pH maka akan semakin banyak terbentuk ion  $OH^-$  yang akan mengakibatkan peningkatan jumlah radikal hidroksil ( $\bullet OH$ ) yang terbentuk. Banyaknya radikal hidroksil yang terbentuk mengakibatkan semakin kecil ukuran kristalit nanopartikel ZnO [28]. Penelitian Nagarajan dan Arumugam Kuppusamy, 2013 menyatakan bahwa pada pH rendah agregasi nanopartikel ZnO mengarah pada pembentukan nanopartikel yang lebih besar di sekitar nukleasi [29]. Oleh karena itu, sampel pada pH rendah memiliki ukuran kristal besar dibandingkan dengan pH tinggi [30].

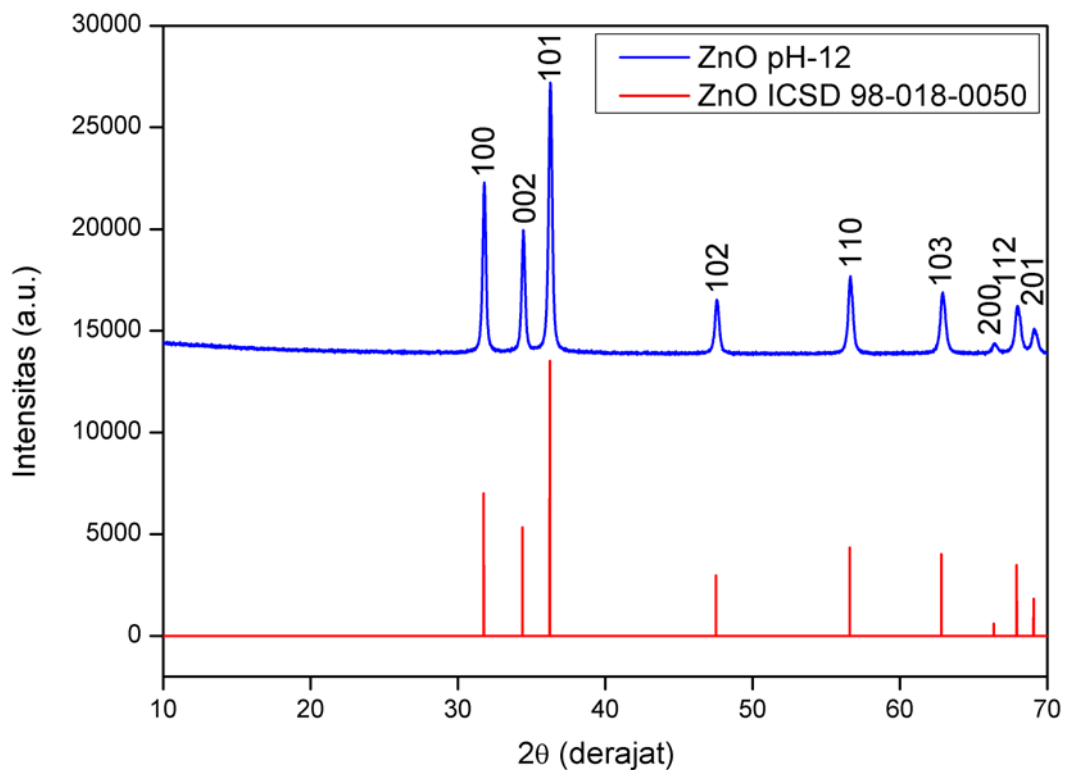
### Hasil Karakterisasi Nanopartikel ZnO

Analisis Difraksi Sinar-X (XRD) untuk mengidentifikasi fasa dan mengetahui struktur nanopartikel ZnO [31]. Seperti terlihat di gambar 1, hasil dari *software Vesta* menampilkan gambar 3D nanopartikel ZnO yang memiliki struktur wurtzit heksagonal polikristalin dengan *space group*  $P6_3mc$ . GAMBAR 1 merupakan struktur kristal nanopartikel ZnO yang diperoleh dari *software Vesta* untuk mensimulasikan hasil pengolahan data Difraksi Sinar-X (XRD) menggunakan *software HighScore Plus*.



GAMBAR 1. Struktur kristal dari sampel nanopartikel ZnO dengan pH-12

GAMBAR 2 menunjukkan analisis pola Difraksi Sinar-X (XRD) dari nanopartikel ZnO yang disintesis menggunakan metode presipitasi dengan suhu *annealing* 400°C selama 4 jam. Semua puncak karakteristik yang diamati untuk nanopartikel ZnO sesuai dengan yang diambil dari *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD) nomor 98-018-0050 [32]. Berdasarkan GAMBAR 2, pola Difraksi Sinar-X (XRD) dari nanopartikel ZnO memiliki 9 puncak yang mengindikasikan bidang hkl (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), dan (201). Puncak yang lebih tinggi dimiliki oleh bidang hkl (100), (002), dan (101). Berdasarkan *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD) nomor 98-018-0050, GAMBAR 2 menunjukkan bahwa sampel yang disiapkan adalah fasa tunggal ZnO dan tidak ada fasa tambahan atau pengotor dalam sampel nanopartikel ZnO [11].



GAMBAR 2. Pola Difraksi Sinar-X (XRD) nanopartikel ZnO dengan pH-12

TABEL 1 adalah parameter struktur kristal nanopartikel ZnO dengan pH-12. Seperti yang terlihat pada TABEL 1, dapat diperoleh informasi tentang nilai parameter struktur kristal yaitu  $2\theta$  ( $^\circ$ ), bidang hkl, *Full Width at Half Maximum* [FWHM] ( $^\circ$ ), ukuran kristalit (nm), d-jarak kisi ( $\text{Å}$ ), *strain* (%), volume ( $\text{Å}^3$ ), alpha ( $^\circ$ ), beta ( $^\circ$ ), gamma ( $^\circ$ ), parameter kisi a = b, dan c. Berdasarkan pada tabel 1, *Full Width at Half Maximum* [FWHM] dan  $2\theta$  untuk tiga puncak (100), (002), (101) adalah  $0.25^\circ$ ,  $0.26^\circ$ ,  $0.26^\circ$  dan  $31.86^\circ$ ,  $34.52^\circ$ ,  $36.35^\circ$ . Sedangkan untuk orientasi puncak (100), (002), (101) d-jarak kisi adalah  $2.81 \text{ Å}$ ,  $2.60 \text{ Å}$ ,  $2.48 \text{ Å}$ . Parameter kisi a = b =  $3.25 \text{ Å}$  dan c =  $5.21 \text{ Å}$  dengan volume unit sel sebesar  $47.61 \text{ Å}^3$ . Rasio antara parameter kisi c dan a = b sebesar 1.60 menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO memiliki struktur wurtzit heksagonal polikristalin [33].

TABEL 1. Parameter struktur sampel nanopartikel ZnO dengan pH-12

No	$2\theta$ ( $^\circ$ )	h	k	l	FWHM ( $^\circ$ )	Ukuran Kristalit (nm)	d-jarak kisi ( $\text{Å}$ )	Strain (%)
1	31.86	1	0	0	0.25	33.04	2.81	0.43
2	34.52	0	0	2	0.26	32.73	2.60	0.40
3	36.35	1	0	1	0.26	34.41	2.48	0.36
Volume ( $\text{Å}^3$ )	Parameter Kisi			c/a	Alpha ( $^\circ$ )	Beta ( $^\circ$ )	Gamma ( $^\circ$ )	
47.61	a = b ( $\text{Å}$ )	c ( $\text{Å}$ )						
	3.25	5.21	1.60	90	90	120		

Mengacu pada nilai *Full Width at Half Maximum* [FWHM], ukuran kristalit (D) dari nanopartikel ZnO berdasarkan analisis Difraksi Sinar-X (XRD) dihitung dengan persamaan Debye–Scherrer sebagai berikut [34]:

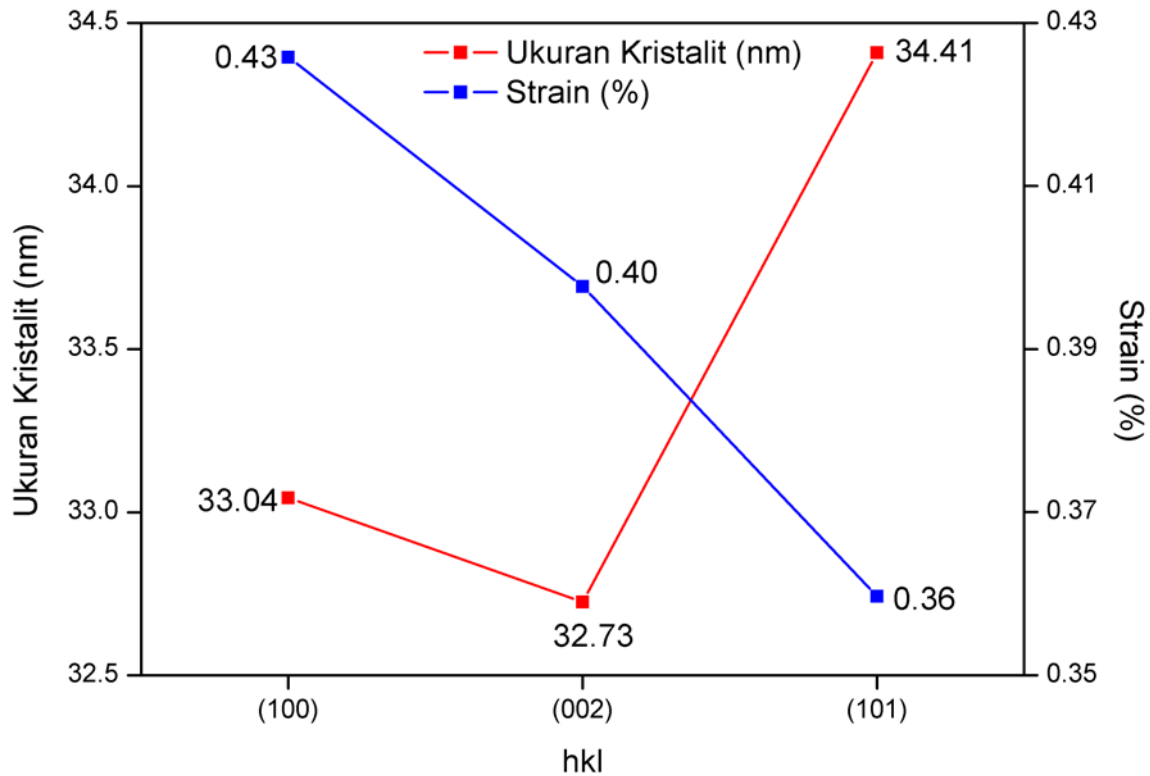
$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \tag{1}$$

sedangkan nilai *strain* ( $\epsilon$ ) telah dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut [34]

$$\epsilon = \frac{\beta \cos \theta}{4} \tag{2}$$

dengan  $\lambda$  merupakan panjang gelombang Difraksi Sinar-X (XRD) sebesar  $0.154 \text{ nm}$ ,  $\theta$  adalah sudut Difraksi Sinar-X (XRD),  $\beta$  merupakan *Full Width at Half Maximum* [FWHM] atau lebar puncak pada setengah intensitas maksimum dalam radian, k adalah konstanta Scherrer sebesar 0.89,  $\epsilon$  adalah *strain*, dan D adalah ukuran kristalit (nm) [34].

GAMBAR 3 adalah ukuran kristalit dan *strain* nanopartikel ZnO yang disintesis menggunakan metode presipitasi pH-12. Berdasarkan GAMBAR 3, *strain* nanopartikel ZnO mengalami penurunan seiring dengan peningkatan bidang hkl. Hal tersebut mengakibatkan ukuran kristalit bertambah besar. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan menggunakan persamaan Debye–Scherrer, *strain* berbanding terbalik dengan ukuran kristalit nanopartikel ZnO [35]. Rata-rata ukuran kristalit dari sampel nanopartikel ZnO ini adalah  $28.86 \text{ nm}$ .



GAMBAR 3. Ukuran kristalit dan strain nanopartikel ZnO dengan pH-12

### SIMPULAN

Nanopartikel ZnO telah berhasil disintesis dengan metode presipitasi pada nilai pH-12 menggunakan sentrifugasi. *Zinc nitrate* [ $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ ] dan *sodium hydroxide* [ $\text{NaOH}$ ] telah digunakan sebagai bahan baku dalam percobaan. Prekursor ZnO dibuat dengan mereaksikan larutan [ $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ ] dengan [ $\text{NaOH}$ ]. Nanopartikel ZnO disintesis melalui *annealing* pada temperatur  $400^\circ\text{C}$  selama 4 jam. Menurut *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD) nomor 98-018-0050, spektrum Difraksi Sinar-X (XRD) menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO yang diperoleh terdiri dari fasa ZnO dalam sistem wurtzit heksagonal polikristalin dengan *space group*  $P6_3mc$ .  $2\theta$  dan *Full Width at Half Maximum* [FWHM] untuk tiga puncak (100), (002), (101) adalah  $31.86^\circ$ ,  $34.52^\circ$ ,  $36.35^\circ$  dan  $0.25^\circ$ ,  $0.26^\circ$ ,  $0.26^\circ$ . Sedangkan untuk orientasi puncak (100), (002), (101) d-jarak kisi dan *strain* adalah  $2.81 \text{ \AA}$ ,  $2.60 \text{ \AA}$ ,  $2.48 \text{ \AA}$  dan  $0.43 \%$ ,  $0.40 \%$ ,  $0.36 \%$ . Hal ini juga menunjukkan bahwa rata-rata ukuran kristalit nanopartikel ZnO adalah  $28.86 \text{ nm}$  serta parameter kisi  $a = b = 3.25 \text{ \AA}$  dan  $c = 5.21 \text{ \AA}$  dengan volume unit sel sebesar  $47.61 \text{ \AA}^3$ .

### 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] D. E. El-Ghwas, "Short Communication: Characterization and biological synthesis of zinc oxide nanoparticles by new strain of *Bacillus foraminis*," *Biodiversitas*, vol. 23, no. 1, 2022, doi: 10.13057/biodiv/d230159.

- [2] T. Tarhan, B. Tural, S. Tural, "Synthesis and characterization of new branched magnetic nanocomposite for loading and release of topotecan anti-cancer drug," *J. Anal. Sci. Technol.*, vol. 10, no. 1, 2019, doi: 10.1186/s40543-019-0189-x.
- [3] S. B. Somvanshi, P. B. Kharat, K. M. Jadhav, "Surface Functionalized Superparamagnetic Zn-Mg Ferrite Nanoparticles for Magnetic Hyperthermia Application Towards Noninvasive Cancer Treatment," *Macromolecular symposia*, vol. 400, no. 1, 2021, doi: 10.1002/masy.202100124.
- [4] T. Wang *et al.*, "Stabilization mechanism of fly ash three-phase foam and its sealing capacity on fractured reservoirs," *Fuel*, vol. 264, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116832
- [5] J. Yang *et al.*, "Recent advances in optoelectronic and microelectronic devices based on ultrawide-bandgap semiconductors," *Progress in Quantum Electronics*, vol. 83, 2022, doi: 10.1016/j.pquantelec.2022.100397.
- [6] N. N. Jandow *et al.*, "Thickness effect of ZnO/PPC gas sensor on the sensing properties of NO<sub>2</sub> gas," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 2083, no. 1, 2019, doi: 10.1063/1.5094306.
- [7] E. Y. Shaba *et al.*, "A critical review of synthesis parameters affecting the properties of zinc oxide nanoparticle and its application in wastewater treatment," *Applied Water Science*, vol. 11, no. 2, 2021, doi: 10.1007/s13201-021-01370-z.
- [8] S. Aftab *et al.*, "Highly Efficient Visible Light Active Doped ZnO Photocatalysts for the Treatment of Wastewater Contaminated with Dyes and Pathogens of Emerging Concern," *Nanomaterials*, vol. 12, no. 3, 2022, doi: 10.3390/nano12030486.
- [9] F. H. Abdullah, N. H. H. A. Bakar, M. A. Bakar, "Current advancements on the fabrication, modification, and industrial application of zinc oxide as photocatalyst in the removal of organic and inorganic contaminants in aquatic systems," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 424, 2022, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127416.
- [10] A. Wibowo *et al.*, "ZnO nanostructured materials for emerging solar cell applications," *RSC Advances*, vol. 10, no. 70, 2020, doi: 10.1039/d0ra07689a.
- [11] U. Godavarti *et al.*, "Precipitated cobalt doped ZnO nanoparticles with enhanced low temperature xylene sensing properties," *Phys. B Condens. Matter*, vol. 553, 2019, doi: 10.1016/j.physb.2018.10.034.
- [12] S. Vyas, "A short review on properties and applications of zinc oxide based thin films and devices: ZnO as a promising material for applications in electronics, optoelectronics, biomedical and sensors," *Johnson Matthey Technology Review*, vol. 64, no. 2, 2020, doi: 10.1595/205651320X15694993568524.
- [13] I. Sugihartono *et al.*, "Ion-dependent electroluminescence from trivalent rare-earth doped n-ZnO/p-Si heterostructured light-emitting diodes," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 30, pp. 263-266, 2015, doi: 10.1016/j.mssp.2014.09.048.
- [14] V. S. Bhati, M. Hojamberdiev, M. Kumar, "Enhanced sensing performance of ZnO nanostructures-based gas sensors: A review," *Energy Reports*, vol. 6, 2020, doi: 10.1016/j.egy.2019.08.070.
- [15] D. Y. Özcelik *et al.*, "Mixed oxides NiO/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> synthesized in a single step via ultrasonic spray pyrolysis (USP) method," *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.3390/met12010073.
- [16] M. M. ElFaham, A. M. Mostafa, E. A. Mwafy, "The effect of reaction temperature on structural, optical and electrical properties of tunable ZnO nanoparticles synthesized by hydrothermal method," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 154, 2021, doi: 10.1016/j.jpcs.2021.110089.

- [17] Y. Liu *et al.*, "Effect of electrodeposition temperature on the thin films of ZnO nanoparticles used for photocathodic protection of SS304," *J. Electroanal Chemical*, vol. 881, 2021, doi: 10.1016/j.jelechem.2020.114945.
- [18] I. Sugihartono *et al.*, "Morphology and optical properties of Cu–Al co-doped ZnO nanostructures," *Surfaces and Interfaces*, vol. 16, 2019, doi: 10.1016/j.surfin.2019.05.009.
- [19] S. Arya *et al.*, "Review-Influence of Processing Parameters to Control Morphology and Optical Properties of Sol-Gel Synthesized ZnO Nanoparticles," *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, vol. 10, no. 2, p. 023002, 2021, doi: 10.1149/2162-8777/abe095.
- [20] N. B. Mahmood *et al.*, "Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles via oxalate co-precipitation method," *Material Letters:X*, vol. 13, 2022, doi: 10.1016/j.mlblux.2022.100126.
- [21] I. Mohammadi *et al.*, "Solvothermal synthesis of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and ZnO nanoparticles on TiO<sub>2</sub> nanotube as photoanode in DSSC," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 38, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.277.
- [22] E. I. Naik *et al.*, "Influence of Cu doping on ZnO nanoparticles for improved structural, optical, electrochemical properties and their applications in efficient detection of latent fingerprints," *Chemical Data Collect*, vol. 33, 2021, doi: 10.1016/j.cdc.2021.100671.
- [23] A. Samanta, M. N. Goswami, P. K. Mahapatra, "Optical properties and enhanced photocatalytic activity of Mg-doped ZnO nanoparticles," *Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures*, vol. 104, 2018, doi: 10.1016/j.physe.2018.07.042.
- [24] R. Priyadarshi, B. Kumar, J. W. Rhim, "Green and facile synthesis of carboxymethylcellulose/ZnO nanocomposite hydrogels crosslinked with Zn<sup>2+</sup> ions," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 162, 2020, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.06.155
- [25] A. Hernowo *et al.*, "Kristalinitas Dan Ukuran Nanopartikel ZnO Yang Dikalsinasi Pada Temperatur 100°C dan 200°C," *Berkala Fisika*, vol. 22, no. 4, pp. 125-131, 2019
- [26] A. Umar *et al.*, "Effect of annealing temperature on the properties and photocatalytic efficiencies of ZnO nanoparticles," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 648, pp. 46-52, 2015, doi: 10.1016/j.jallcom.2015.04.236
- [27] T. U. Doan *et al.*, "Green synthesis of ZnO nanoparticles using orange fruit peel extract for antibacterial activities," *RSC Advance*, vol. 10, no. 40, 2020, doi: 10.1039/d0ra04926c.
- [28] M. C. Uribe-López *et al.*, "Photocatalytic activity of ZnO nanoparticles and the role of the synthesis method on their physical and chemical properties," *Journal Photochem Photobiol. A Chemicals*, vol. 404, p. 112866, 2021, doi: 10.1016/j.jphotochem.2020.112866.
- [29] S. Nagarajan, K. Arumugam Kuppusamy, "Extracellular synthesis of zinc oxide nanoparticle using seaweeds of gulf of Mannar, India," *Journal Nanobiotechnology*, vol. 11, no. 1, 2013, doi: 10.1186/1477-3155-11-39.
- [30] S. Mustapha *et al.*, "Comparative study of crystallite size using Williamson-Hall and Debye-Scherrer plots for ZnO nanoparticles," *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 10, no. 4, 2019, doi: 10.1088/2043-6254/ab52f7.
- [31] I. Sugihartono *et al.*, "The Effect of Al-Cu co-dopants on Morphology, Structure, and Optical Properties of ZnO Nanostructures," *Materials Research*, vol. 26, 2023.
- [32] I. Sugihartono *et al.*, "Morphological, structural, and optical properties of co-doped ZnO NPs prepared by precipitation method," *Journal of Ceramic Processing Research*, vol. 20, no. 5, pp. 518-521, 2019, doi: 10.36410/jcpr.2019.20.5.518.



- [33] A. Samanta, M. N. Goswami, P. K. Mahapatra, "Fe-doped ZnO nanoparticles as novel photonic and multiferroic semiconductor," *Mater. Chemicals Physics*, vol. 240, 2020, doi: 10.1016/j.matchemphys.2019.122180
- [34] J. Iqbal *et al.*, "Facile synthesis of Zn doped CuO hierarchical nanostructures: Structural, optical and antibacterial properties," *AIP Advance*, vol. 5, no. 12, 2015, doi: 10.1063/1.4937907.
- [35] Q. M. Al-Bataineh *et al.*, "Synthesis, crystallography, microstructure, crystal defects, optical and optoelectronic properties of ZnO:CeO<sub>2</sub> mixed oxide thin films," *Photonics*, vol. 7, no. 4, 2020, doi: 10.3390/photonics7040112.

