

DOI: doi.org/10.21009/03.1201.FA26

# ANALISIS STRUKTUR KRISTAL DAN ABSORBANSI LAPISAN TIPIS ZNO BERSTRUKTUR NANO DI ATAS SUBSTRAT KACA BERPELAPIS INDIUM TIN OXIDE

Nada Alfi Aliyah<sup>1, a)</sup>, Iwan Sugihartono<sup>1, b)</sup>, Rahmat Setiawan Mohar<sup>2)</sup>, Tan Swee Tiam<sup>3)</sup>, Akhmad Futukhillah Fataba Alaih<sup>3)</sup>, Djoko Triyono<sup>4)</sup>

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

<sup>2</sup>Center For Photonic National Research and Innovation Agency, Banten 15314, Indonesia

<sup>3</sup>Xiamen University Malaysia, School of Energy and Chemical Engineering, 43900, Selangor Darul Ehsan, Malaysia

<sup>4</sup>Departemen Fisika, FMIPA UI, Kampus Baru UI Depok, Jawa Barat 16426, Indonesia

Email: <sup>a)</sup>nadaalfi0284@gmail.com, <sup>b)</sup>iwan-sugihartono@unj.ac.id

## Abstrak

Pada penelitian ini telah dilakukan deposisi lapisan tipis ZnO berstruktur nano dengan menggunakan teknik *Ultrasonic Spray Pyrolysis* (USP) di atas substrat kaca *Indium Tin Oxide* (ITO) selama 15 menit pada suhu 450°C. *Zinc Acetate Dyhydrate* [Zn(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>] digunakan sebagai prekursor Zn dengan variasi konsentrasi prekursor 0.1M dan 0.4M. Lapisan tipis ZnO telah dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffractometer* (XRD), *Uv-Vis Spectrofotometer*, dan *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk menganalisis struktur kristal, absorbansi, dan struktur morfologi. Berdasarkan *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD) nomor #98-003-1060 dan #98-005-7478, pola *X-Ray Diffraction* (XRD) dari lapisan tipis ZnO memiliki struktur polikristal hexagonal wurtzite dengan *space group* P6<sub>3</sub>mc. Uji Uv-Vis untuk sampel dengan konsentrasi 0.4M menunjukkan adanya peningkatan intensitas absorbansi paling dominan pada ~320 nm. Sehingga dapat diprediksikan sampel memiliki besar celah energi sebesar 3.2 eV.

**Kata-kata kunci:** lapisan tipis ZnO, ultrasonic spray pyrolysis, struktur kristal, absorbansi, celah energi.

## Abstract

In this study, we have deposited nanostructured ZnO thin films using the *Ultrasonic Spray Pyrolysis* (USP) method on an *Indium Tin Oxide* (ITO) glass substrate for 15 minutes at 450°C. *Zinc Acetate Dyhydrate* [Zn(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>] was used as a Zn precursor with various precursor concentrations of 0.1M and 0.4M. The ZnO thin film has been characterized using an *X-Ray Diffractometer* (XRD), *Uv-Vis Spectrophotometer*, and *Scanning Electron Microscope* (SEM) to obtain a crystal structure, absorbance, and morphology structure. Based on the *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD) number #98-003-1060 and #98-005-7478, the *X-Ray Diffraction* (XRD) pattern of ZnO thin film has a polycrystalline hexagonal wurtzite structure with *space group* P6<sub>3</sub>mc. Uv-Vis characterization for samples with a concentration of 0.4M showed that there was an increase in absorbance intensity that was most dominant at ~320 nm. Hence, it can be predicted that the sample has an energy gap of 3.2 eV.

**Keywords:** ZnO thin film, ultrasonic spray pyrolysis, crystal structure, absorbance, bandgap.

## PENDAHULUAN

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi terus berjalan seiring berkembangnya zaman, salah satu buktinya adalah nanoteknologi [1]. Produk nanoteknologi tidak terlepas dari material berukuran nano (nanomaterial) sebagai dasar berkembangnya nanoteknologi [2]. Material nano berbasis seng oksida (ZnO) banyak dipelajari karena memiliki potensi aplikasi yang baik dalam *dye-sensitized solar cells* [3], sensor [4], perangkat piezoelektrik [5], aplikasi konduktor transparan dan lapisan tipis [6]. ZnO merupakan material semikonduktor tipe-n golongan II-VI dengan karakteristik unik dan menguntungkan, seperti mobilitas elektron tinggi [7], memiliki besar celah pita energi 3.37 eV (pada suhu kamar), energi ikat eksiton sebesar 60 meV [8], stabilitas dan transparansi yang baik [9], ketersediaan yang berlimpah, serta memiliki kemampuan fotokatalis yang baik [10].

Sifat optik dari ZnO dapat diketahui dari spektrum refleksi, transmisi dan absorpsinya. Spektrum absorpsi menunjukkan fungsi koefisien absorpsi terhadap energi foton cahaya. Dari kurva pada grafik absorbansi ini dapat ditentukan lebar celah pita energi [11]. ZnO mampu menyerap sinar UV yang kuat dari spektrum matahari [12]. Hal tersebut menjadikan lapisan tipis ZnO sangat baik digunakan untuk aplikasi di bidang elektronik, fotoelektronik, sensor dan fotokatalis [13]. Lapisan tipis adalah lapisan material di atas substrat dengan ketebalan kurang dari 10 $\mu$ m [14]. Lapisan tipis ZnO pada dasarnya memiliki struktur kristal heksagonal wurtzite dengan tipe polikristalin [15].

Terdapat beberapa metode yang biasa digunakan untuk mendeposisikan lapisan tipis ZnO di antaranya metode kimiawi basah, *sputtering* (Dave dkk., 2016), *Chemical Vapor Deposition* (CVD) (Liang, 2019), sol gel, *spray pyrolysis*, *physical vapor deposition*, *solvothetmal* dan *hydrothermal* (Lee dkk., 2008) *Ultrasonic Spray Pyrolysis* merupakan sebuah teknik deposisi dengan cara mengatomisasi larutan secara ultrasonik hingga menghasilkan partikel tipis yang memiliki distribusi ukuran kecil untuk pelapisan pada substrat [16]. Metode ultrasonic spray pyrolysis merupakan metode yang sudah lama dipakai untuk membuat lapisan tipis. Untuk menghasilkan lapisan berstruktur nano, diperlukan nozel yang cukup halus serta laju aliran yang tinggi [17].

Pada penelitian ini, lapisan tipis ZnO berstruktur nano ditumbuhkan di atas substrat ITO menggunakan metode USP. *Zinc Acetate Dyhydrate* [ $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ] digunakan sebagai prekursor Zn dengan variasi konsentrasi prekursor 0.1M dan 0.4M. Pada *paper* ini, dilakukan karakterisasi struktur kristal lapisan tipis ZnO berstruktur nano menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD). Sifat optik yang dihasilkan dikarakterisasi menggunakan *Ultraviolet Visible Spectrophotometer* (UV-Vis) serta struktur morfologi lapisan dikarakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM).

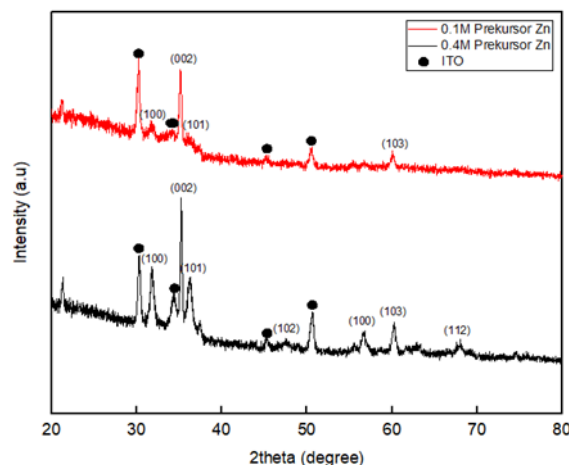
## METODOLOGI

Lapisan tipis ZnO berstruktur nano dideposisi di atas substrat berlapis Indium Tin Oxide (ITO) dengan konsentrasi larutan prekursor Zn yang berbeda menggunakan metode *ultrasonic spray pyrolysis* (USP). Prekursor Zn 0.1M disiapkan dengan melarutkan 1.095 gram *Zinc Acetate Dyhydrate* [ $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ] ke dalam 50ml air deionisasi. Kemudian prekursor Zn 0.4M disiapkan dengan melarutkan 4.38 gram *Zinc Acetate Dyhydrate* [ $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ] ke dalam 50ml air deionisasi. Selanjutnya membersihkan substrat ITO dengan isopropanol dan air deionisasi masing-masing selama 10 menit dengan menggunakan *ultrasonic cleaner*. Kemudian mempersiapkan alat *ultrasonic spray pyrolysis* dengan menuangkan larutan prekursor Zn ke dalam *container* pada *ultrasonic nebulizer* dan meletakkan substrat ITO yang telah dibersihkan di atas *hot plate* pada suhu 450°C. Substrat ITO di atas *hot plate* kemudian akan diupkan oleh *ultrasonic nebulizer* yang menyemprotkan larutan prekursor sedikit demi sedikit selama 15 menit hingga permukaan substrat terlihat berubah warna. Langkah ini dilakukan pada masing-masing substrat ITO dengan konsentrasi prekursor Zn yang berbeda. Setelah selesai deposisi lapisan tipis ZnO, dilakukan uji karakterisasi untuk menganalisa struktur kristal, morfologi, dan absorbansi pada lapisan tipis ZnO dengan menggunakan *X-Ray Diffractometer* (XRD), *Scanning Electron Microscope* (SEM), dan *UV-Vis*

*Spectrophotometer*. Untuk mengetahui pola difraksi pada kedua sampel, dilakukan karakterisasi menggunakan Philips PW 1710 *X-Ray Diffractometer* dengan radiasi monokromatik Cu K $\alpha$  ( $\lambda=1.54056 \text{ \AA}$ ) pada sudut  $2\theta$  dari  $20^\circ$ - $80^\circ$ . Untuk mendapatkan gambar dengan perbesaran hingga 50.000 kali digunakan *Scanning Electron Microscope (SEM)* JEOL JIB – 4610F *Multi Beam System*. Selanjutnya untuk mendapatkan nilai absorbansi dan *bandgap*, digunakan *Uv-Vis Spectrophotometer* detektor Maya Ocean dengan panjang gelombang 200-1200 nm.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, dilakukan karakterisasi dengan menggunakan *X-Ray Diffractometer (XRD)* dengan radiasi CuK $\alpha$  pada lapisan tipis ZnO berstruktur nano bervariasi konsentrasi prekursor Zn yang menunjukkan pola difraksi dengan puncak-puncak tertentu. Pola difraksi dari kedua sampel tersebut dianalisis lebih lanjut dengan aplikasi HighScore. GAMBAR 1 menunjukkan hasil pola difraksi lapisan tipis ZnO berstruktur nano yang memiliki struktur polikristal hexagonal wurtzite dengan *space group* P6 $_3$ mc.



GAMBAR 1. Pola difraksi lapisan tipis ZnO dengan variasi molar Zn (0.1M dan 0.4M)

Dapat dilihat pada GAMBAR 1, didapatkan bidang kristal (100), (002), (101), dan (103) sesuai dengan posisi ( $2\theta$ ) di sudut  $31.793^\circ$ ,  $34.337^\circ$ ,  $36.219^\circ$ ,  $62.582^\circ$  pada prekursor Zn 0.4M dan  $30.191^\circ$ ,  $34.278^\circ$ ,  $35.174^\circ$ ,  $61.537^\circ$  pada prekursor Zn 0.1M. Ukuran kristalit pada bidang (100), (002), (102), dan (103) berturut-turut yaitu 12.58 nm, 7.89 nm, 10.95 nm, dan 2.97 nm untuk prekursor Zn 0.4M dan 22.56 nm, 36.04nm, 45.16 nm, dan 137.40 nm untuk prekursor Zn 0.1M. Berdasarkan *Inorganic Crystal Structure Database (ICSD)* nomor #98-003-1060 (0.1M Zn) dan #98-005-7478 (0.4M Zn), pola *X-Ray Diffraction (XRD)* dari lapisan tipis ZnO memiliki struktur polikristal *hexagonal wurtzite* dengan *space group* P6 $_3$ mc.

Telah diketahui bahwa  $I(hkl)$  merupakan intensitas relatif yang terukur dari bidang (hkl), sementara  $I_0(hkl)$  merupakan intensitas sampel referensi standar, dan  $n$  adalah jumlah total puncak refleksi sampel [18]. Berdasarkan pada GAMBAR 1, kedua sampel memiliki puncak difraksi pada bidang (100), (002), (101), dan (103). Hasil yang diperoleh menunjukkan nilai intensitas ( $I$ ) terbesar berada pada bidang hkl (002) mengindikasikan bahwa kristal tumbuh, dengan sumbu  $c$  pada struktur heksagonal tegak lurus terhadap permukaan lapisan tipis dan berorientasi pada bidang (002) [19]. Dapat dilihat bahwa bidang (002) memiliki puncak difraksi yang lebih tinggi dibandingkan bidang (100), (101) dan (103). Selain itu, sampel dengan prekursor Zn 0.4M memiliki puncak difraksi yang lebih tinggi daripada prekursor Zn 0.1M. Dapat dilihat pada GAMBAR 1, pada sampel Zn 0.1M hanya didapatkan puncak difraksi di bidang (100), (002), (101), dan (103). Sementara pada sampel 0.4M Zn, didapatkan puncak difraksi di bidang (100), (002), (101), (102), (103), dan (112). Artinya, jumlah hkl lapisan tipis ZnO berstruktur nano bertambah seiring dengan bertambahnya besar molaritas prekursor Zn. Selain itu, tidak ditemukan fase lain kecuali ITO. Dengan menghitung koefisien  $2\theta$  [20], kedua sampel memiliki peningkatan pada orientasi bidang kristal (002).

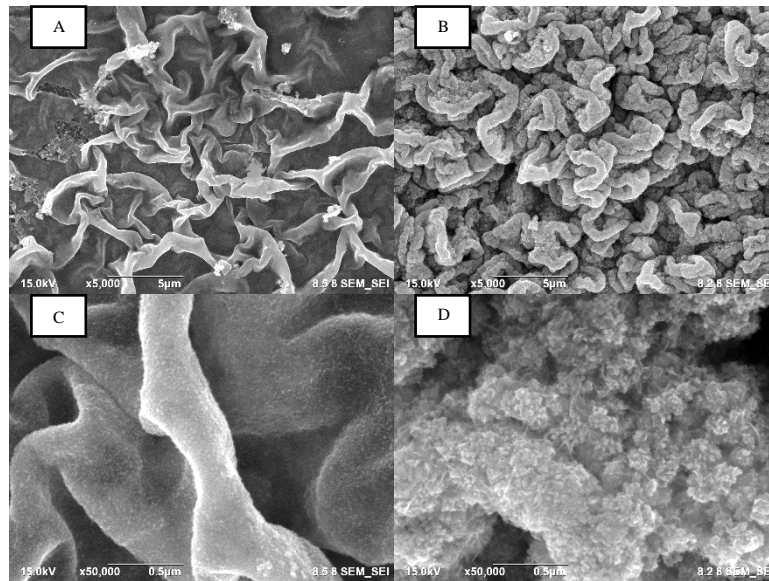
Selanjutnya, analisis pola difraksi dilakukan untuk mengidentifikasi parameter struktur kristal [21]. TABEL 1 menampilkan data parameter kisi  $a = b$  dan  $c$ , nilai *Full Width at Half Maximum* (FWHM), *d-spacing* (dhkl), ukuran kristalit, serta *micro-strain*.

**TABEL 1.** Parameter struktur kristal lapisan tipis ZnO (0.1M dan 0.4M)

Lapisan Tipis ZnO (0.1M)							
(hkl)	$2\theta$	a=b	c	dhkl (Å)	FWHM(°)	Ukuran Kristalit (nm)	Micro-strain (%)
(100)	30.1913	3.551	5.226	2.95781	0.3449	22.56	0.34582
(002)	34.2784	3.551	5.226	2.61605	0.2676	36.04	0.36288
(101)	35.1745	3.551	5.226	2.55144	0.2175	45.16	0.28242
(103)	61.5375	3.551	5.226	1.50699	0.1004	1374.07	0.05483
Lapisan Tipis ZnO (0.4M)							
(hkl)	$2\theta$	a=b	c	dhkl (Å)	FWHM(°)	Ukuran Kristalit (nm)	Micro-strain (%)
(100)	31.7933	3.253	5.207	2.8123	0.5148	12.58	1.11972
(002)	34.3372	3.253	5.207	2.60955	0.8809	7.89	1.84055
(101)	36.2193	3.253	5.207	2.47814	0.6487	10.95	1.13083
(102)	47.5134	3.253	5.207	1.91209	0.8109	10.43	0.91579
(110)	56.6261	3.253	5.207	1.6241	0.8357	8.14	0.9965
(103)	62.5828	3.253	5.207	1.48303	2.5374	2.97	2.49257
(112)	67.9156	3.253	5.207	1.37903	2.2078	3.49	1.97014

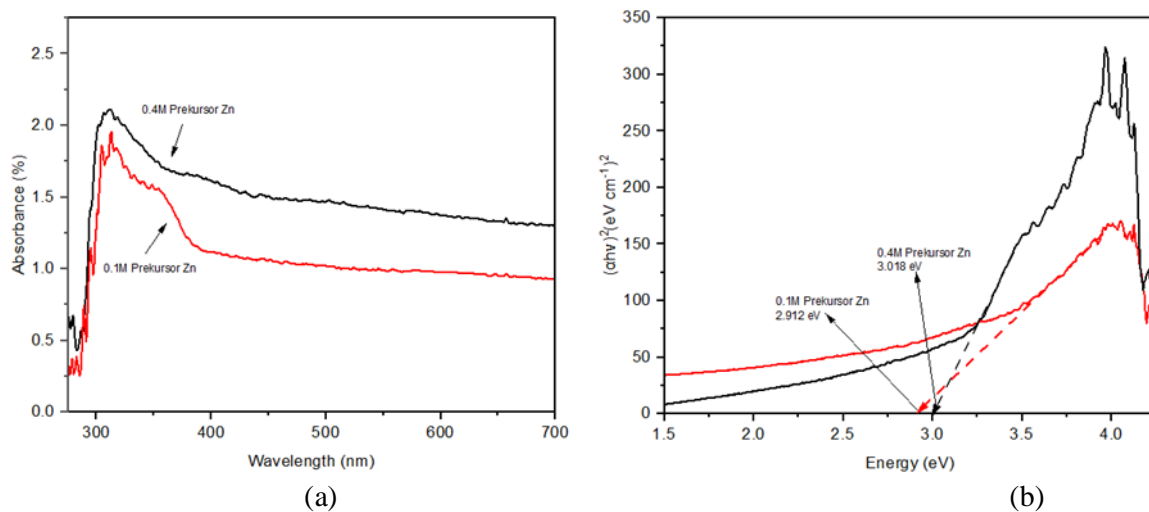
Berdasarkan tabel di atas, terjadi pergeseran puncak-puncak (posisi) pada lapisan tipis ZnO 0.4M bergeser ke sudut yang lebih besar pada  $2\theta$  jika dibandingkan dengan lapisan tipis ZnO 0.1M. Hal tersebut disebabkan oleh peningkatan nilai molar prekursor Zn pada lapisan tipis ZnO 0.4M yang menyebabkan terjadinya perubahan *stress* [22]. Mengacu pada nilai FWHM, ukuran kristalit lapisan tipis ZnO berstruktur nano telah dihitung menggunakan persamaan Debye Scherrer's [23]. Didapatkan bahwa rata-rata ukuran kristalit lapisan tipis ZnO 0.1M dan 0.4M berturut-turut yaitu 369.46 nm dan 8.06 nm.

Selanjutnya, struktur morfologi sampel diamati menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) JEOL JIB – 4610F *Multi Beam System*. GAMBAR 2 menunjukkan hasil SEM dari sampel lapisan tipis ZnO (0.1M Zn dan 0.4M Zn) pada perbesaran 5k dan 50k.



**GAMBAR 2.** Gambar SEM lapisan tipis ZnO (a) Zn 0.1M perbesaran 5k (b) 0.4M perbesaran 5k (c) 0.1M perbesaran 50k (d) 0.4M perbesaran 50k

Dapat dilihat bahwa lapisan tipis ZnO berstruktur nano dengan bentuk *nanosheets* berhasil disintesis pada substrat kaca berlapis ITO. Berdasarkan GAMBAR 2, terlihat struktur *nanosheet* saling terhubung secara berkelanjutan yang tertanam secara vertikal di atas permukaan substrat ITO hingga menghasilkan permukaan berpori. Besar pori-pori (jarak antar *nanosheet*) semakin berkurang ketika molar prekursor Zn bertambah. Dapat dilihat, besar pori-pori pada sampel 0.1M Zn mencapai 5µm sementara pada sampel 0.4M Zn yakni 1µm. Lapisan tipis ZnO berstruktur nano dengan densitas pori yang tinggi pada permukaan substrat dapat menghasilkan sifat optik dan listrik yang baik [24]. Untuk mengetahui sifat optik yang terdapat pada lapisan tipis ZnO, dilakukan karakterisasi menggunakan *Uv-Vis Spectrophotometer* untuk mendapatkan besar absorbansi dan celah energi dari sampel yang ditunjukkan pada GAMBAR 3.



**GAMBAR 3.** (a) Spektrum absorbansi Uv-Vis lapisan tipis ZnO (b) Celah energi lapisan tipis ZnO

Karakterisasi dengan Uv-Vis spektrofotometer dilakukan untuk mengevaluasi lebih lanjut sifat optik lapisan tipis ZnO berdasarkan besar molar prekursor Zn. Pada GAMBAR 3(a) ditunjukkan spektrum absorbansi Uv-Vis lapisan tipis ZnO berstruktur nano pada rentang panjang gelombang 270 nm – 700 nm. Dapat dilihat bahwa besar absorbansi yang dimiliki sampel 0.1M Zn lebih rendah daripada 0.4M Zn. Besar absorbansi yang didapatkan tiap sampel memiliki memiliki puncak yang tinggi pada kisaran 300-370 nm dengan serapan kuat pada kisaran panjang gelombang UV dan

serapan lemah pada kisaran tampak. Dapat dilihat pada GAMBAR 3(a), puncak absorbansi sampel 0.4M Zn lebih tinggi dibandingkan sampel 0.1M Zn. Hal ini dapat disebabkan oleh dimensi *nanosheet* ZnO 0.4M yang lebih besar daripada 0.1M seperti yang ditunjukkan pada hasil SEM pada GAMBAR 2. Besar celah energi lapisan tipis ZnO berstruktur nano dapat diperkirakan menggunakan *Tauc Plot* yang didapatkan dari ujung tepi absorbansi. GAMBAR 3(b) di bawah ini menunjukkan *Tauc Plot* untuk lapisan tipis ZnO (0.1M Zn dan 0.4M Zn).

Besar celah pita energi ( $E_g$ ) dari lapisan tipis ZnO dapat diperkirakan dengan menggambar perpotongan garis singgung dari kurva [18]. Dapat dilihat pada GAMBAR 3(b) bahwa terjadi perubahan celah energi pada sampel dengan 0.4M Zn. Didapatkan besar celah energi pada sampel 0.1M Zn dan 0.4M masing-masing yaitu 2.912 eV dan 3.018 eV. Hal ini relevan dengan penelitian sebelumnya, bahwa besar celah energi ZnO berkurang seiring dengan berkurangnya besar molar prekursor Zn [25]. Penelitian lain melaporkan bahwa berkurangnya celah energi disebabkan oleh adanya keadaan kosong yang baru oleh elektron Co 3d yang menyebabkan interaksi pertukaran elektron Co dalam orbital d dan elektron O<sub>2</sub> pada orbital s dan Zn pada orbital p [26]. Pada penelitian ini, diperkirakan terjadinya perubahan celah energi disebabkan oleh pergeseran level Fermi. Hal ini menyebabkan Efek Burstein-Moss mengkompensasi interaksi pertukaran transisi antar orbit sp-d [27].

### SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, lapisan tipis ZnO berstruktur nano telah berhasil disintesis di atas substrat kaca berpelapis ITO. Berdasarkan hasil uji XRD, didapatkan lapisan tipis ZnO dengan struktur kristal heksagonal wurtzite dengan space group P63mc. Ukuran kristalit pada bidang kristal (100), (002), dan (102) berturut-turut adalah 12.58 nm, 7.89 nm, 10.95 nm untuk sampel 0.1M Zn dan 22.56 nm, 36.04 nm, 18.40 nm untuk sampel 0.4M Zn. Hal ini tervalidasi oleh gambar hasil pengujian SEM. Hasil SEM menunjukkan sampel berhasil disintesis dalam bentuk *nanosheets* dengan dimensi sampel 0.4M Zn lebih besar daripada 0.1M yang menyebabkan puncak absorbansi sampel 0.4M Zn lebih tinggi dibandingkan sampel 0.1M Zn. Hal ini sesuai dengan hasil karakterisasi UV-Vis dimana besar celah energi sampel 0.4M Zn lebih besar daripada 0.1M. Didapatkan besar celah energi pada sampel 0.1M Zn dan 0.4M masing-masing yaitu 2.912 eV dan 3.018 eV. Hal ini relevan dengan penelitian sebelumnya, bahwa besar celah energi ZnO berkurang seiring dengan berkurangnya besar molar prekursor Zn. Hasil yang diperoleh secara keseluruhan sesuai dengan literatur.

### UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih disampaikan Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Negeri Jakarta yang telah memberikan pendanaan penelitian melalui hibah Kolaborasi Internasional tahun 2023.

### REFERENSI

- [1] N. G. Putra, S. Yuliar, "Pergerakan Riset Dalam Pengembangan Teknologi Nano di Indonesia Studi Kasus di Institut Teknologi Bandung," *Majalah Ilmiah Pengkajian Industri*, Universitas Indonesia, dan Nano Center Indonesia, pp. 239-348, 2019.
- [2] A. A. Ghassan, Mijan, "Nanomaterials: An Overview of Nanorods Synthesis and Optimization," *Intech Open*. pp. 1-24, 2015.
- [3] I. Y. Bu, M. T. Cole, "One-pot synthesis of intercalating ZnO nanoparticles for enhanced dye-sensitized solar cells," *Materials Letters*, vol. 90, pp. 56-59, 2013.
- [4] I. Y. Bu, C. C. Yang, "High-performance ZnO nanoflake moisture sensor," *Superlattices Microstruct*, vol. 51, pp. 745-753, 2012.

- [5] Y. Zhu *et al.*, “Enhanced piezo-humidity sensing of Sb-doped ZnO nanowire arrays as self-powered/active humidity sensor,” *Mater Lett*, vol. 154, pp. 77-80, 2015.
- [6] I. Y. Bu, “Self-assembled, wrinkled zinc oxide for enhanced solar cell performances,” *Mater Lett*, vol. 122, pp. 55-57, 2014.
- [7] Prasetyo, K. Wiji, “Aplikasi Nanoteknologi dalam Industri Hasil Hutan,” *Jurnal Akar*, vol. 2, no. 1, pp. 15-26, 2020.
- [8] I. Sugihartono *et al.*, “The effect of Al Element on Electrochemical Impedance of ZnO Thin Films,” *4th International Conference on Applied Physics and Material Application*, vol. 1428, no. 1, pp. 1-5, 2020.
- [9] M, Torabi, “We are Intech Open, the world’s leading publisher of Open Access books Built by scientists, for scientists TOP 1%”, *Intech*, vol. 1, no. 1, pp. 13, 2016.
- [10] M. Salah *et al.*, “Rietveld refinement of X ray diffraction, impedance spectroscopy and dielectric relaxation of Li doped ZnO sprayed thin films,” *Applied Physics A Materials Science and Processing*, vol. 125, pp. 1-21, 2019.
- [11] I. Benaicha *et al.*, “Effect of Ni doping on optical structural and morphological properties of ZnO thin films synthesis by MSILAR: Experimental and DFT study,” *Journal of Materials*, vol. 15, pp. 2-7, 2021.
- [12] A. Doyan, Humaini, “Sifat Optik Lapisan Tipis ZnO,” *Jurnal Pendidikan Fisika dan Teknologi*, vol. 3, no. 1, pp. 34-39, 2017.
- [13] H. Susanto *et al.*, “Deposisi Lapisan Tipis Fotokatalis Seng Oksida (ZnO) Berukuran Nano dengan Teknik Penyemprotan dan Aplikasinya Untuk Pendegradasi Pewarna Methylene Blue,” *Jurnal Fisika*, vol. 3, no. 1, pp. 69-75, 2013.
- [14] M. Munoz *et al.*, “Shape-control of Zinc Oxide Nanoparticles: Enhancing Photocatalytic Activity Under UV Irradiation,” *Journal of Physics Conference Series*, vol. 792, no. 1, pp. 1-5, 2017.
- [15] L. B. Freund, S. Suresh, “Thin Film Materials Stress, Defect Formation and Surface Evolution,” *Cambridge University Press*, 2003.
- [16] W. Darenfad, N. Guermat, K. Mirouh, “Thoughtful Investigation of ZnO Doped Mg and Co-doped Mg/Mn, Mg/Mn/F Thin Films: A First Study,” *Journal of Molecular Structure*, vol. 1286, pp. 1-7, 2021.
- [17] T. Prabhakar, J. Nagaraju, “Ultrasonic Spray Pyrolysis of CZTS Solar Cell Absorber Layers and Characterization Studies,” *35th IEEE Photovoltaics Specialists Conference (PVSC 35)*, pp. 20-25, 2010.
- [18] I. Sugihartono *et al.*, “Influence of Co Incorporation on Morphological, Structural, and Optical Properties of ZnO Nanorods Synthesized by Chemical Bath Deposition,” *Materials Research*, vol. 26, pp. 1-15, 2023.
- [19] M. N. H. Mia, M. F. Perez, M. K. Hossain, “Influence of Mg content on tailoring optical bandgap of Mg-doped ZnO thin film prepared by sol-gel method,” *Results in Physics*, vol. 7, pp. 2683-2691, 2017.
- [20] Y. Caglar *et al.*, “Influence of heat treatment on the nanocrystalline structure of ZnO film deposited on p-Si,” *Journal of alloys and compound*, vol. 481, pp. 885-889, 2009.
- [21] I. Sugihartono *et al.*, “The Effect of Al-Cu Co-Dopants in Morphology, Structure, and Optical Properties of ZnO Nanostructures,” *Materials Research*, vol. 26, pp. 1-6, 2023.

- [22] M. Shkir, M. Arif, V. Ganesh, "Investigation on structural, linear, nonlinear and optical limiting properties of sol-gel derived nanocrystalline Mg doped ZnO thin films for optoelectronic applications," *Journal of Molecular Structure*, vol. 1173, pp. 375-384, 2018.
- [23] M. Chakraborty, P. Mahapatra, R. Thangavel, "Structural, optical and electrochemical properties of Al and Cu co-doped ZnO nanorods synthesized by a hydrothermal method," *Thin Solid Films*, vol. 612, pp. 49-54, 2016.
- [24] M. I. A. Umar *et al.*, "Synthesis of standing ZnO nanosheets and impact of Ag nanoparticles loading on its optical property," *Bull Matter Sci*, vol. 45, no. 4, pp. 3-8, 2022.
- [25] N. Ghazari *et al.*, "Synthesis, experimental and theoretical investigations of Zn<sub>1-x</sub>Cu<sub>x</sub>O nanopowders," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 325, pp. 42-46, 2013.
- [26] P. Winget *et al.*, "Defect-driven interfacial electronic structures at an organic/metal-oxide semiconductor heterojunction," *Advanced Materials*, vol. 26, no. 27, pp. 4711-4716, 2014.