



PENGARUH PERLAKUAN HIDROTERMAL TERHADAP MORFOLOGI, SIFAT OPTIK, DAN SIFAT LISTRIK LAPISAN TIPIS NANORODS ZnO

Lalu Suhaimi^{a,*}, Akhmad Herman Yuwono^b, Achmad Subhan^c

^aTeknik Metalurgi, Fakultas Teknik Universitas Teknologi Sumbawa
Jl. Raya Olat Maras, Kec. Moyo Hulu, Kab. Sumbawa, NTB, Indonesia

^bDepartemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia
Universitas Indonesia, Depok, Indonesia 16424

^cPusat Penelitian Fisika - LIPI

Gedung 440-442, Kawasan PUSPITEK Serpong, Indonesia 15310

*E-mail: lalu.suhaimi@uts.ac.id

Masuk Tanggal :02-11-2020, revisi tanggal:23-11-2020, diterima untuk diterbitkan tanggal : 27-11-2020

Abstrak

Nanorods seng oksida (ZnO NRs) merupakan salah satu material semikonduktor yang telah banyak diaplikasikan di berbagai bidang. Pada penelitian ini, ZnO NRs telah berhasil ditumbuhkan di atas substrat ITO (*indium thin oxide*) dengan metode CBD (*chemical bath deposition*). Proses diawali dengan pembuatan larutan bibit menggunakan campuran ekimolar Zn-nitrat dan HMTA (*hexamethylenetetramine*) pada temperatur 0 °C selama satu jam dengan konsentrasi sebesar 0,02 M. Selanjutnya, pembuatan lapisan bibit dengan teknik *spin coating*. ZnO NRs ditumbuhkan dengan metode CBD pada temperatur 90 °C selama tiga jam untuk kemudian dilakukan perlakuan variasi, yaitu perlakuan dengan metode hidrotermal dan perlakuan dengan tanpa metode hidrotermal pada temperatur 150 °C selama tiga jam. Karakterisasi dilakukan menggunakan SEM (*scanning electron microscope*), XRD (*x-ray diffraction*), UV-Vis dan *four-point probe*. Hasil SEM menunjukkan bahwa perlakuan hidrotermal mampu meningkatkan sebaran (*coverage*) *nanorods* di atas substrat yang lebih merata dan meningkatkan struktur vertikal *nanorods*. Hasil analisis XRD memperlihatkan material yang diberikan perlakuan hidrotermal mengalami peningkatan ukuran kristalit *nanorods*. Besarnya ukuran kristalit pada material dengan perlakuan variasi tanpa hidrotermal dan perlakuan dengan hidrotermal masing-masing sebesar 71,20 dan 165,70 nm. Perlakuan hidrotermal terhadap *nanorods* menyebabkan penurunan ukuran diameter dari 288,25 nm menjadi 125,82 nm. Nilai transmitansi material mengalami penurunan dengan adanya perlakuan hidrotermal yaitu 56,53% menjadi 38,67%. Perlakuan hidrotermal mampu menurunkan celah pita energi (E_g) dari material, sedangkan material tanpa perlakuan hidrotermal nilai energi celah pita adalah sebesar 3,22 eV. Sementara itu, nilai celah pita energi (E_g) setelah perlakuan hidrotermal sebesar 3,17 eV. Nilai resistivitas ZnO NRs dengan perlakuan hidrotermal sebesar $0,83 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$, sedangkan tanpa perlakuan hidrotermal adalah sebesar $1,13 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$.

Kata Kunci: *Nanorods* seng oksida, *chemical bath deposition*, hidrotermal

Abstract

Zinc oxide nanorods (ZnO NRs) is a semiconductor material that has been widely applied in various fields. In this research, ZnO NRs were successfully grown on ITO (*indium thin oxide*) substrates by CBD (*chemical bath deposition*) method. The process begins with making a seed solution using an equimolar mixture of Zn-nitrate and HMTA (*hexamethylenetetramine*) at 0 °C for one hour with 0.02 M concentration. Furthermore, making a layer of seeds using a *spin coating* technique. ZnO NRs were grown using the CBD method at 90 °C for three hours then treated with variations: are hydrothermal method treatment and non-hydrothermal method treatment at 150 °C for three hours. The materials were given characterization treatment using (*scanning electron microscope*), XRD (*x-ray diffraction*), UV-Vis, and a *four-point probe*. SEM results showed that hydrothermal treatment increased the *nanorods*' coverage on the substrate to be more prevalently and improved the *nanorods*' vertical structure of the *nanorods*. The results of XRD analysis showed that materials given hydrothermal treatment experienced an increase in the crystallite size. The amount of crystallite size in the material treated with a variation of non-hydrothermal treatment and hydrothermal treatment was 71.20 and 165.70 nm. Hydrothermal treatment of *nanorods* materials

decreased the diameter from 288.25 nm to 125.82 nm. The transmittance value of the materials decreased in the presence of hydrothermal treatment, which is 56.53% to 38.67%. The hydrothermal treatment reduced the energy bandgap (E_g) of the material, while the non-hydrothermal treatment showed a value of the E_g was 3.22 eV. Meanwhile, the value of E_g after hydrothermal treatment was 3.17 eV. The resistivity value of ZnO NRs with hydrothermal treatment was $0.83 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$, while non-hydrothermal treatment was $1.13 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$.

Keywords: zinc-oxide nanorods, chemical bath deposition, hydro-thermal

1. PENDAHULUAN

Salah satu material semikonduktor oksida yang menarik banyak perhatian para peneliti saat ini adalah seng oksida (*zinc oxide*, ZnO) karena material ini memiliki sifat-sifat yang unik seperti energi celah pita (*band gap energy*) yang lebar sebesar 3,37 eV, mempunyai emisi ultraviolet yang kuat pada temperatur ruang karena memiliki energi ikatan elektron yang tinggi energi sebesar 60 meV, sehingga material tersebut banyak diaplikasikan pada teknologi terkini seperti laser semikonduktor UV biru, dioda pemancar cahaya, fotokatalis, pemanas transparan dan divais optoelektronik lainnya [1]-[3]. Sifat lain yang dimiliki oleh ZnO adalah biokompatibilitas, tingkat toksisitas yang rendah, mobilitas elektron yang tinggi, mudah untuk difabrikasi dan memiliki stabilitas kimia yang baik. Selain itu, *nanorods* ZnO memiliki daerah elektroaktif yang jauh lebih besar dibandingkan dengan ukuran *bulk*nya disebabkan karena rasio permukaan terhadap volum yang tinggi pada skala nano, sehingga material ini menjanjikan untuk diterapkan di bidang biomedikal seperti biosensor dan elektrokimia sensor [4]-[7].

Seng oksida dalam bentuk nanostruktur satu dimensi (1-D) seperti *nanorods* telah banyak diteliti untuk berbagai aplikasi. Pada umumnya, metode yang digunakan dalam fabrikasi nanostruktur ZnO ada dua yaitu, *wet chemical* dan *phase gas*. Metode *wet chemical* lebih banyak digunakan untuk memfabrikasi *nanorods* ZnO dibandingkan dengan metode *phase gas* karena biayanya lebih terjangkau. Salah satu metode *wet chemical* yang banyak digunakan dalam fabrikasi *nanorods* ZnO adalah CBD (*chemical bath deposition*) karena metode ini dioperasikan pada temperatur rendah, berbiaya rendah, dan metodenya sederhana [8]. Pourshabana, dkk., telah berhasil mensintesis *nanorods* ZnO di atas substrat kaca dengan metode CBD. Penelitian ini dilakukan untuk melihat pengaruh konsentrasi larutan bibit pada lapisan bibit terhadap struktur, morfologi dan sifat optik *nanorods* ZnO di atas substrat kaca [9]. Penelitian lainnya yang dilakukan oleh Abdulrahman, dkk., telah berhasil menumbuhkan *nanorods* ZnO di atas substrat kaca mikroskop

dengan melakukan variasi konsentrasi prekursor. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa perbedaan konsentrasi prekursor memiliki pengaruh yang signifikan terhadap pertumbuhan dan karakteristik *nanorods* ZnO [10].

Pada umumnya, sintesis *nanorods* ZnO menggunakan metode CBD belum mampu menghasilkan struktur vertikal tegak sempurna di atas substrat [11]. Struktur vertikal tegak sempurna dari *rods* di atas substrat dapat ditingkatkan dengan membuat lapisan bibit pada substrat. Selain itu, pembuatan lapisan bibit berfungsi sebagai dasar atau awal mula untuk pertumbuhan *nanorods* ZnO [12]. Sementara itu, Amoupur, dkk., telah berhasil meningkatkan karakteristik lapisan tipis seperti kualitas kristal, sifat listrik, sifat optik, dan morfologi dengan menerapkan proses *post-annealing* [13]. Pada penelitian lainnya yang dilakukan oleh Yuwono, dkk., tekanan pada proses post-hidrotermal mampu meningkatkan ukuran kristalit dan menurunkan celah pita energi dari nanopartikel ZnO [14]. Pada penelitian ini, dilakukan proses penumbuhan *nanorods* ZnO di atas substrat menggunakan metode CBD yang berlangsung pada temperatur rendah dan melihat pengaruh perlakuan hidrotermal dengan menggunakan tekanan uap air pada reaktor. Perlakuan hidrotermal ini diharapkan mampu meningkatkan struktur vertikal *nanorods* yang tumbuh di atas substrat.

2. PROSEDUR PERCOBAAN

Proses pembuatan lapisan tipis *nanorods* ZnO dimulai dengan persiapan substrat sebagai medium penumbuhan *nanorods* ZnO. Substrat yang digunakan pada penelitian ini yaitu kaca konduktor ITO (*indium thin oxide*). Substrat dibersihkan menggunakan *deionized water*, aseton, dan etanol masing-masing selama 480 detik kemudian dikeringkan. Setelah itu, dilakukan pembuatan larutan bibit. Pembuatan larutan bibit dilakukan menggunakan campuran ekimolar Zn-nitrat dan HMTA (*hexamethylenetetramine*) pada temperatur 0 °C selama satu jam dengan konsentrasi sebesar 0,02 M. Proses pembuatan larutan bibit dilakukan dengan melarutkan Zn-nitrat sebanyak 0,39 gr

dan HMTA sebanyak 0,21 gr ke dalam *beaker* gelas yang berisi 100 ml *deionized water*. Selanjutnya, senyawa tersebut dimasukkan ke dalam *cool box* yang telah berisi es batu selama satu jam untuk memperoleh larutan yang homogen.

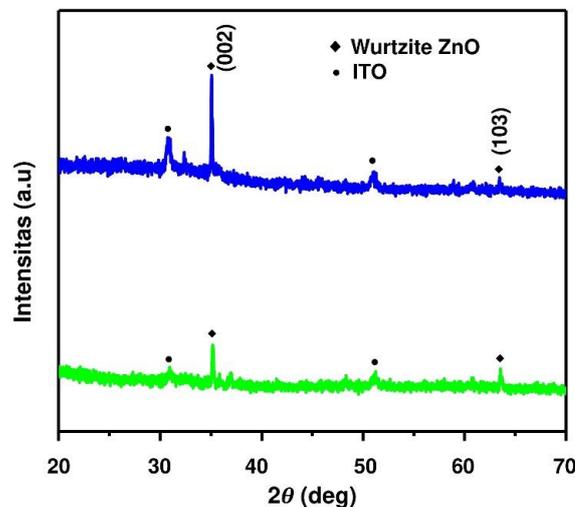
Selanjutnya adalah pembuatan lapisan bibit menggunakan teknik *spin coating* dengan kecepatan 2000 rpm selama 20 detik yang diawali dengan meneteskan larutan bibit ke atas substrat untuk kemudian dibiarkan selama sepuluh menit agar larutan bibit tersebut terserap pada permukaan substrat. Setelah itu, kaca yang telah terlapis bibit dianil dalam *muffle furnace* pada temperatur 200 °C selama 5 menit untuk meningkatkan adhesi antara lapisan bibit dengan substrat. Lapisan bibit yang telah dibuat selanjutnya diproses untuk menumbuhkan *nanorods* ZnO di atas substrat dengan cara menggantungkan substrat secara vertikal di dalam *beaker glass* yang telah berisi larutan ekimolar Zn-Nitrat dan HMTA dengan konsentrasi 0,02 M pada temperatur 90 °C selama tiga jam. Setelah itu, substrat dicuci menggunakan *deionized water* kemudian dikeringkan di udara. Sampel yang sudah diberi perlakuan untuk proses penumbuhan akan diberi variasi perlakuan hidrotermal dan perlakuan non-hidrotermal. Proses hidrotermal dilakukan dengan meletakkan substrat menghadap sisi dasar reaktor hidrotermal pada temperatur 150 °C selama tiga jam. Hasil dari proses ini akan dilanjutkan dengan proses karakterisasi XRD (*x-ray diffraction*), SEM (*scanning electron microscope*), UV-Vis dan *four point probe* untuk mengetahui sifat listrik sampel.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Lapisan Tipis *Nanorods* ZnO dengan Variasi Hidrotermal (ZnO_HT) dan Non-Hidrotermal (ZnO_NHT)

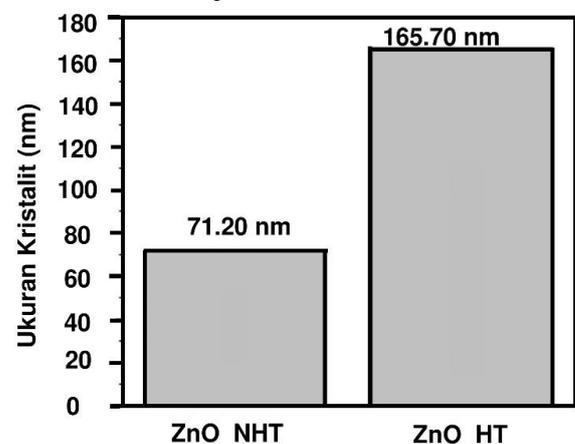
Gambar 1 memperlihatkan hasil karakterisasi XRD (*x-ray diffraction*) dari lapisan tipis *nanorods* ZnO dengan variasi hidrotermal dan non-hidrotermal. Berdasarkan hasil karakterisasi XRD, terdeteksi dua puncak difraksi yang bersesuaian dengan puncak bidang kristal (002) dan (103) dari polikristalin ZnO dengan struktur *wurtzite* heksagonal berdasarkan JCPDS No. 36-1451, sedangkan puncak-puncak difraksi lainnya dikonfirmasi sebagai bidang bidang kristal dari substratnya. Selain itu, perbedaan pola difraksi sinar-x tampak antara material yang diberi perlakuan hidrotermal dengan material non-hidrotermal. Intensitas puncak bidang kristal (002) pada material ZnO yang diberikan perlakuan hidrotermal mengalami

kenaikan. Hal ini menunjukkan bahwa *nanorods* ZnO pada material tersebut tumbuh secara vertikal sepanjang sumbu-z. Peningkatan intensitas ini berkorelasi dengan peningkatan kristalinitas *nanorods* ZnO.



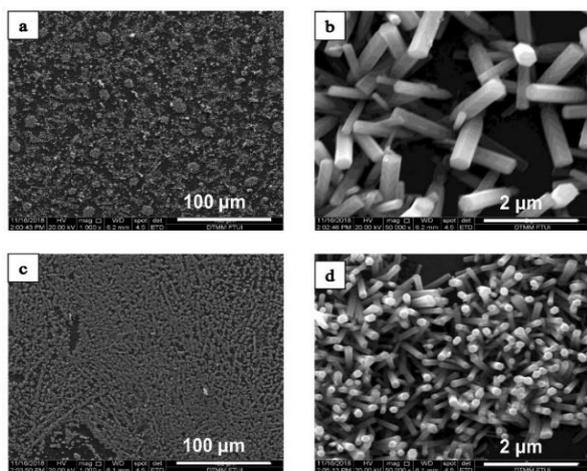
Gambar 1. Hasil karakterisasi XRD untuk material: (a) ZnO_HT (b) ZnO_NHT

Selain itu, puncak (002) yang semakin tajam menunjukkan adanya peningkatan ukuran kristalit *nanorods* ZnO dari 71,20 nm (sebelum perlakuan hidrotermal) menjadi 165,70 nm (setelah perlakuan hidrotermal) seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Puncak intensitas yang lebih rendah berkorelasi dengan tingkat kristalinitas yang lebih rendah pula. Sementara itu, adanya spektra ITO (*indium thin oxide*) yang terlihat lebih dominan pada material dengan perlakuan hidrotermal disebabkan karena tidak optimalnya proses pembuatan lapisan bibit di atas substrat. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Wang, dkk., memperlihatkan bahwa lapisan bibit pada sintesis nanostruktur ZnO *nanorods* dengan menggunakan metode hidrotermal merupakan pemicu pertumbuhan nanostruktur menjadi lapisan yang rapat dan merata di seluruh permukaan substrat [15].



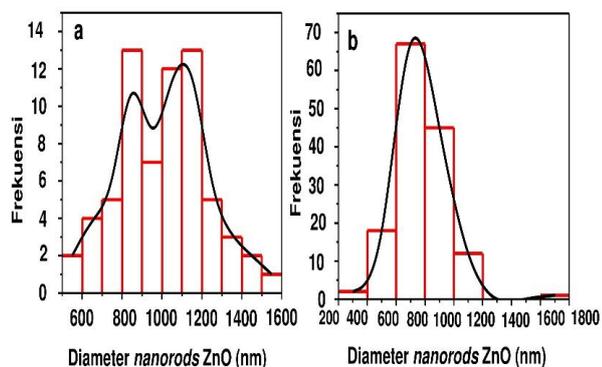
Gambar 2. Ukuran kristalit dari material ZnO_HT dan ZnO_NHT

Struktur morfologi penampang atas lapisan tipis *nanorods* ZnO sebelum dan sesudah proses hidrotermal diperlihatkan pada Gambar 3. Pada gambar tersebut, *nanorods* ZnO terlihat memiliki struktur batang heksagonal. Sebaran (*coverage*) *nanorods* dengan arah vertikal di atas substrat ITO setelah perlakuan hidrotermal lebih merata dan dominan dibandingkan dengan sebelum diberi perlakuan hidrotermal, serta *nanorods* tampak tumbuh dengan arah vertikal yang baik di atas substrat ITO. Selain itu, perlakuan hidrotermal terhadap *nanorods* menyebabkan penurunan ukuran diameter material yaitu dari 288,25 nm menjadi 125,82 nm.



Gambar 3. Struktur morfologi penampang (a)-(b) ZnO_NHT dan (c)-(d) ZnO_HT

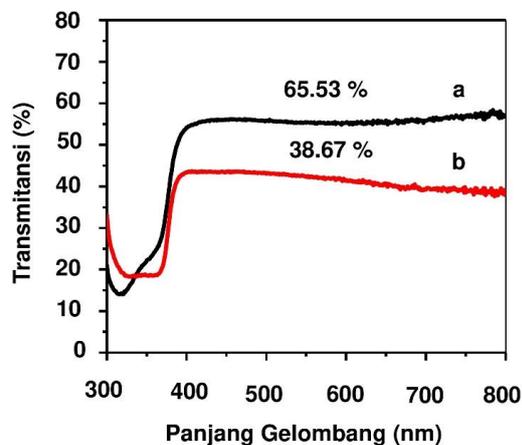
Sementara itu, distribusi ukuran diameter ZnO dengan perlakuan hidrotermal memiliki distribusi yang lebih seragam dibandingkan dengan material ZnO yang tidak diberi perlakuan hidrotermal seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4.



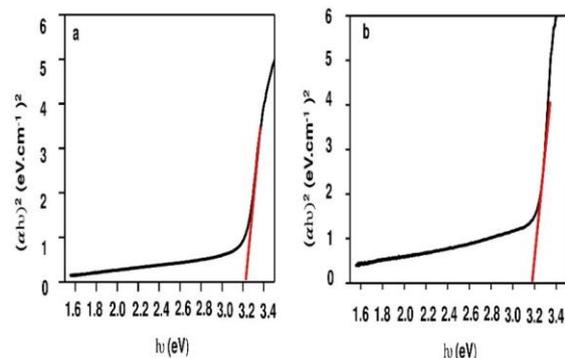
Gambar 4. Distribusi diameter *nanorods* ZnO (a) ZnO_NHT dan (b) ZnO_HT

Gambar 5 menunjukkan nilai transmitansi dari lapisan tipis *nanorods* ZnO dengan variasi tanpa hidrotermal (Gambar 5 (a)) dan hidrotermal (Gambar 5 (b)). Nilai transmitansi dari material ZnO mengalami penurunan dengan adanya

perlakuan hidrotermal sehingga nilai transmitansi untuk material ZnO dengan variasi tanpa hidrotermal menjadi 56,53%. Sementara itu, nilai transmitansi untuk ZnO dengan perlakuan hidrotermal adalah sebesar 38,67%. Penurunan nilai transmitansi dari ZnO disebabkan oleh peningkatan sebaran (*coverage*) *nanorods* ZnO di atas substrat.



Gambar 5. Nilai transmitansi dari lapisan tipis *nanorods* ZnO: (a) ZnO_NHT; (b) ZnO_HT



Gambar 6. Kurva $(\alpha h\nu)^2$ terhadap $h\nu$ *nanorods* ZnO: (a) ZnO_NHT dan (b) ZnO_HT

Selain nilai transmisi, sifat optik lain yang dikaji pada penelitian ini yaitu nilai celah pita energi (E_g). Gambar 6 menunjukkan nilai E_g dari lapisan tipis *nanorods* ZnO dengan variasi tanpa hidrotermal dan dengan perlakuan hidrotermal. Berdasarkan kurva tersebut, perlakuan hidrotermal mampu menurunkan E_g dari material. Material ZnO tanpa perlakuan hidrotermal memiliki nilai E_g sebesar 3,22 eV, sedangkan nilai E_g setelah perlakuan hidrotermal adalah sebesar 3,17 eV. Pada umumnya, salah satu faktor yang menyebabkan penurunan nilai E_g adalah perbaikan dalam pertumbuhan kristal yang ditandai dengan naiknya ukuran kristalit. Hasil ini telah terkonfirmasi berdasarkan hasil analisis XRD sebelumnya, bahwa ukuran kristalit meningkat dengan variasi hidrotermal dan menurun tanpa perlakuan hidrotermal. Semakin rendah energi celah pita maka semakin rendah

energi yang diperlukan untuk transisi elektronik. Dengan demikian, konsentrasi pembawa muatan bebas menjadi meningkat [16]. Oleh karena itu, energi celah pita yang rendah sangat berguna untuk meningkatkan konduktivitas listrik material karena konduktivitas listrik berbanding lurus dengan konsentrasi pembawa muatan.

Nilai resistivitas dan konduktivitas merupakan parameter untuk mengetahui sifat listrik dari material *nanorods* ZnO. Keduanya memiliki nilai yang berkebalikan satu sama lain dan sangat dipengaruhi oleh konsentrasi serta mobilitas pembawa muatan. Berdasarkan hasil pengujian material ZnO menggunakan *four-point probe*, *nanorods* ZnO dengan variasi hidrotermal diperoleh nilai resistivitas sebesar $0,83 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$. Sementara itu, nilai resistivitas ZnO tanpa perlakuan hidrotermal adalah sebesar $1,13 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$. Penurunan nilai resistivitas pada material ZnO dengan variasi hidrotermal diduga disebabkan oleh beberapa faktor. Pertama, meningkatnya keteraturan *nanorods* yang tumbuh di atas substrat ITO dengan adanya perlakuan hidrotermal sehingga menyebabkan penurunan hamburan elektron di *nanorods* [17]-[18]. Kedua, meningkatnya mobilitas pembawa muatan akibat peningkatan ukuran butir (kristalit) rata-rata *nanorods* ZnO, seperti yang telah diperlihatkan sebelumnya melalui analisis XRD dan SEM (*scanning electron microscope*). Ukuran butir yang meningkat menyebabkan kontak permukaan antar butir mengalami kenaikan sehingga mobilitas elektron menjadi lebih besar. Peningkatan mobilitas elektron menyebabkan peningkatan konduktivitas listrik, begitu pula sebaliknya [18]-[19].

4. KESIMPULAN

Nanorods ZnO telah berhasil ditumbuhkan di atas substrat ITO dengan metode *chemical bath deposition*. Pemberian perlakuan hidrotermal pada material ZnO mampu memperbaiki morfologinya. Hasil ini ditunjukkan berdasarkan foto SEM (*scanning electron microscope*) yang menunjukkan sebaran (*coverage*) *nanorods* di atas substrat meningkat dan struktur *nanorods* tumbuh secara vertikal. Hasil analisis XRD (*x-ray diffraction*) memperlihatkan bahwa intensitas puncak bidang kristal (002) pada material ZnO yang diberi perlakuan hidrotermal mengalami kenaikan. Puncak (002) yang semakin tajam menunjukkan adanya peningkatan ukuran kristalit *nanorods*. Besarnya ukuran kristalit pada material ZnO dengan variasi perlakuan tanpa hidrotermal dan perlakuan dengan hidrotermal masing-masing adalah sebesar 71,20 dan 165,70 nm. Perlakuan

hidrotermal terhadap material ZnO, *nanorods* ZnO menyebabkan penurunan ukuran diameter yaitu dari 288,25 nm menjadi 125,82 nm. Nilai transmitansi dari material ZnO mengalami penurunan dengan adanya perlakuan hidrotermal yaitu 56,53% menjadi 38,67%. Perlakuan hidrotermal mampu menurunkan celah pita energi (E_g) dari material ZnO. Material ZnO tanpa perlakuan hidrotermal memiliki nilai E_g sebesar 3,22 eV, sedangkan nilai E_g setelah mendapat perlakuan hidrotermal adalah sebesar 3,17 eV. Nilai resistivitas *nanorods* ZnO dengan perlakuan hidrotermal sebesar $0,83 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$, sedangkan tanpa perlakuan hidrotermal adalah sebesar $1,13 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Indonesia atas dukungan finansial melalui hibah penelitian PITTA Universitas Indonesia tahun 2018.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. A. Azzez, Z. Hassan, J. J. Hassan, M. S. Mukhlif, M. S. Mahdi, dan M. Bououdina, "Effect of temperature on hydrothermally grown high-quality single-crystals Mg-doped ZnO nanorods for light-emitting diode application," *J. Lumin.*, vol. 192, pp. 634-643, 2017. Doi: 10.1016/j.jlumin.2017.07.050.
- [2] N. D. Raskar, D. V. Dake, V. A. Mane, E. Stathatos, U. Deshpande, dan B. Dole, "One step synthesis of vertically grown Mn-doped ZnO nanorods for photocatalytic application," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 30, pp. 10886-10889, 2019. Doi: 10.1007/s10854-019-01433-7.
- [3] A. H. Yuwono, L. Suhaemi, N. Sofyan, D. Dhaneswara, G. Ramahdita, A. Sholehah, dan C. Hudaya, "Nanostructural growth investigation of ZnO nanorods derived from chemical bath deposition for transparent heater application," *Int. J. Technol.*, vol. 9, no. 6, pp. 1216-1224, 2018. Doi: 10.14716/ijtech.v9i6.2452.
- [4] M. Marie, A. Manoharan, A. Kuchuk, S. Ang, dan M. O. Manasreh, "Vertically grown zinc oxide nanorods functionalized with ferric oxide for in vivo and non-enzymatic glucose detection," *Nanotechnology*, vol. 29, no. 11, 2018. Doi: 10.1088/1361-6528/aaa682.
- [5] N. S. Ridhuan, K. Abdul Razak, dan Z. Lockman, "Fabrication and

- characterization of glucose biosensors by using hydrothermally grown ZnO nanorods,” *Sci. Rep.*, vol. 8, 2018. Doi: 10.1038/s41598-018-32127-5.
- [6] R. Ahmad, M. S. Ahn, dan Y. B. Hahn, “Fabrication of a non-enzymatic glucose sensor field-effect transistor based on vertically-oriented ZnO nanorods modified with Fe₂O₃,” *Electrochem. commun.*, vol. 77, pp. 107-111, 2017. Doi: 10.1016/j.elecom.2017.03.006.
- [7] S. K. Naveen Kumar, A. Akshaya Kumar, A. A. Aniley, S. Bhansali, dan R. E. Fernandez, “Hydrothermal growth of zinc oxide (ZnO) nanorods (NRs), structural, and chemical composition studies for pH measurement sensor applications,” *ECS Trans.*, vol. 8, no. 1, pp. 437-447, 2018. Doi: 10.1149/08801.0437ecst.
- [8] M. Willander, *Zinc oxide nanostructures: Advances and applications*. 2014.
- [9] E. Pourshaban, H. Abdizadeh, dan M. R. Golobostanfard, “ZnO nanorods array synthesized by chemical bath deposition: Effect of seed layer sol concentration,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 11, pp. 352-358, 2015. Doi: 10.1016/j.mspro.2015.11.124.
- [10] A. F. Abdulrahman, S. M. Ahmed, N. M. Ahmed, dan M. A. Almessiere, “Enhancement of ZnO nanorods properties using modified chemical bath deposition method: Effect of precursor concentration,” *Crystals*, vol. 10, no. 386, 2020. Doi: 10.3390/cryst10050386.
- [11] A. Sholehah, A. H. Yuwono, N. Sofyan, C. Hudaya, dan M. I. Amal, “Effect of post-hydrothermal treatments on the physical properties of ZnO layer derived from chemical bath deposition,” *Int. J. Technol.*, vol. 8, no. 4, pp. 651-661, 2017. Doi: 10.14716/ijtech.v8i4.9487.
- [12] R. H. Zhang, E. B. Slamovich, dan C. A. Handwerker, “Controlling growth rate anisotropy for formation of continuous ZnO thin films from seeded substrates,” *Nanotechnology*, vol. 24, no. 195603, 2013. Doi: 10.1088/0957-4484/24/19/195603.
- [13] E. Amoupour, A. Abdolazadeh Ziabari, H. Andarva, dan F. E. Ghodsi, “Influence of air/N₂ treatment on the structural, morphological and optoelectronic traits of nanostructured ZnO:Mn thin films,” *Superlattices Microstruct.*, vol. 65, pp. 332-343, 2014. Doi: 10.1016/j.spmi.2013.11.014.
- [14] A. H. Yuwono, D. Kurniawan, N. Sofyan, G. Ramahdita, dan A. Sholehah, “Effect of pressure in post-hydrothermal treatment on the nanostructural characteristics of ZnO nanoparticles,” *Int. J. Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 424-430, 2016. Doi: 10.14716/ijtech.v7i3.2990.
- [15] Z. L. Wang, “Zinc oxide nanostructures: Growth, properties and applications,” *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 16, pp. R829-R858, 2004. Doi: 10.1088/0953-8984/16/25/R01.
- [16] N. K. Bakirhan dan S. A. Ozkan, “Quantum dots as a new generation nanomaterials and their electrochemical applications in pharmaceutical industry,” in *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications*, pp. 521, 2018.
- [17] Y. Y. Chen, C. L. Chen, P. C. Lee, dan M. N. Ou, “Fabrication, characterization and thermal properties of nanowires,” in *Nanowires - Fundamental Research*, pp. 277, 2011.
- [18] E. Karaköse dan H. Çolak, “Effect of substrate temperature on the structural properties of ZnO nanorods,” *Energy*, vol. 141, pp. 50-55, 2017. Doi: 10.1016/j.energy.2017.09.080.
- [19] R. J. Hong, X. Jiang, B. Szyszka, V. Sittinger, dan A. Pflug, “Studies on ZnO:Al thin films deposited by in-line reactive mid-frequency magnetron sputtering,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 207, pp. 341-350, 2003. Doi: 10.1016/S0169-4332(02)01525-8.