

Pengaruh Dopan Al Terhadap Struktur dan Morfologi ZnO Nano-rod dan Penggunaannya sebagai Fotoanoda Pada Sel Surya DSSC

Annisa Aprilia^{1,a)}, Heri Fernando^{1,b)}, Lusi Safriani^{1,c)}, Ayi Bahtiar^{1,d)}, Rahmat Hidayat^{2,e)}

¹Departemen Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran,
Jl. Raya Jatinangor Km. 21, Kabupaten Sumedang, Indonesia, 45363

²Laboratorium Fisika Magnetik dan Fotonik,
Kelompok Keilmuan Fisika Magnetik dan Fotonik,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

^{a)} a.aprilia@phys.unpad.ac.id (*corresponding author*)

^{b)} fernandokembaren@hotmail.com

^{c)} lusi.safriani@phys.unpad.ac.id

^{d)} ayi.bahtiar@phys.unpad.ac.id

^{e)} rahmat@fi.itb.ac.id

Abstrak

Lapisan tipis ZnO Nanorod terdoping aluminium telah dipreparasi menggunakan metoda self-assembly. Proses penumbuhan dilakukan di atas substrat konduktif AZO (aluminum doped ZnO) dan FTO (fluorine tin oxide). Lapisan ZnO:Al nanorod selanjutnya akan digunakan sebagai fotoanoda pada sel surya tersensitisasi dye / DSSC (dye sensitized solar cell). Untuk mempelajari dan mengetahui pengaruh dopan aluminium terhadap pertumbuhan struktur ZnO nanorod pada jenis substrat yang berbeda, maka konsentrasi aluminium (Al) pada lapisan inisiator (seed layer) dan larutan penumbuh (growth solution) divariasikan yaitu 0,5 wt% dan 1 wt% terhadap zinc nitrate heksahidrat dan zinc acetate dihidrate. Struktur ZnO yang terbentuk dianalisa berdasarkan spektrum difraksi sinar-X (XRD) dan diketahui bahwa terdapat puncak Zinc Aluminate ($ZnAl_2O_4$) pada lapisan ZnO:Al nanorod yang ditumbuhkan di kedua substrat. Spektrum XRD pada lapisan ZnO:Al nanorod yang dilapisi pada substrat AZO menghasilkan intensitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan penumbuhan pada substrat FTO. Perbedaan tersebut kemungkinan disebabkan oleh kondisi lattice mismatch antara substrat dan lapisan Al:ZnO yang terbentuk, sehingga menghasilkan kualitas Kristal yang berbeda. Morfologi dari lapisan ZnO: Al nanorod diamati menggunakan perangkat scanning electron microscope (SEM) dan diketahui bahwa orientasi pertumbuhan ZnO tegak lurus terhadap substrat sehingga membentuk struktur rod (batang). Lapisan ini kemudian diaplikasikan sebagai fotoanoda pada sel surya tersensitisasi dye dengan efisiensi yang berhasil dicapai sebesar 0,68% untuk penggunaan fotoanoda ZnO:Al (0,5-0).

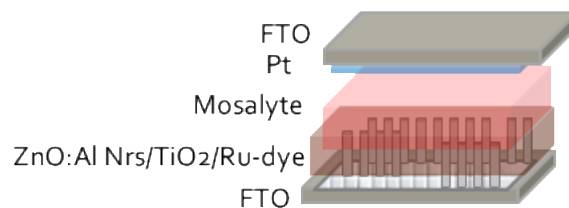
Kata-kata kunci: AZO, ZnO nano-rod, self assembly, struktur wurtzite, struktur spinel, dye sensitized solar cell(dssc)

PENDAHULUAN

Metal oksida ZnO merupakan material semikonduktor yang umum digunakan sebagai material aktif pada beberapa perangkat optoelektronik, seperti transistor, sensor gas, fotokatalis, dan sel surya [1]. Untuk aplikasi sel surya, ZnO merupakan material yang berperan sebagai fotoanoda yaitu lapisan penangkap elektron (*electron transport layer-ETL*) disebabkan oleh sifat optoelektronik yang dimilikinya. Jika dibandingkan dengan metal oksida lainnya seperti TiO₂, ZnO memiliki beberapa kelebihan yaitu mobilitas elektron yang lebih tinggi, waktu hidup (*life time*) pembawa muatan yang lebih lama, dan banyak mengandung impuritas intrinsik [2]. Karakteristik tersebut dapat menurunkan sifat resistansi bahan dan meningkatkan proses tranpor muatan. Selain itu, ZnO memiliki beberapa macam *defect*/impuritas yang secara langsung berkaitan dengan karakter yang dimilikinya, yaitu vakansi Oksigen, interstisi Zinc, dan interstisi Oksigen. Berbagai macam metoda preparasi untuk menghasilkan material Zinc oksida baik dalam bentuk serbuk ataupun lapisan tipis, telah banyak diteliti dan dikembangkan. Metoda preparasi/pembuatan material Zinc Oksida meliputi metode *chemical vapour deposition*, pulsed laser deposition, deposisi elektrokimia, dan metode berbasis larutan kimia seperti sol-gel dan hidrotermal [3]. Metode berbasis larutan kimia merupakan metode yang mudah dan sederhana serta tidak memerlukan kondisi vakum sehingga dapat mengurangi biaya produksi.

Sifat dan karakteristik dari material ZnO dalam bentuk lapisan tipis sangat dipengaruhi oleh struktur, morfologi dan ukuran partikel. Material oksida ini merupakan material semikonduktor dengan celah pita energi langsung dan lebar yaitu ~3,4 eV serta energi ikat eksiton sebesar 60 meV. Untuk menghasilkan lapisan tipis ZnO sesuai dengan tujuan aplikasi/kegunaannya, salah satunya adalah dengan memilih metoda preparasi yang tepat, konsentrasi bahan dasar, perlakuan suhu ataupun dengan penambahan doping. Dalam kajian sel surya, khususnya sel surya generasi baru seperti sel surya tersensitisasi dye (*dye sensitized solar cell-dssc*) dan sel surya perovskite, struktur unik dari ZnO berukuran nano (*nanostucture*) dapat meningkatkan efisiensi sel surya yang dihasilkan [4]. ZnO dengan struktur batang (*rod*) mampu meningkatkan efisiensi sel surya perovskite hingga 14% [5]. Hal tersebut berkaitan dengan stuktur rod yang teratur mampu meningkatkan daerah persambungan dengan material dye, meningkatkan serapan cahaya pada sel dan meningkatkan fotoarus yang dihasilkan. Pada dasarnya, kerapatan ZnO nanorod, keteraturan penjajaran, kiralinitas, diameter dan panjang rod sangat mempengaruhi sifat optik dan elektrik yang selanjutnya dapat berdampak pada performa sel surya [6]. Sehingga, sangat penting untuk memerhatikan proses sintesis agar menghasilkan struktur nanorod sesuai dengan yang diharapkan.

Salah satu cara untuk merekayasa struktur ZnO adalah dengan penambahan material dopan. Berdasarkan hasil penelitian kami sebelumnya, penambahan Aluminium pada lapisan tipis ZnO dapat menurunkan ukuran partikel ZnO, meningkatkan transparansi di daerah cahaya tampak serta meningkatkan konduktivitas [7]. Serupa dengan beberapa hasil penelitian lain, penambahan dopan Al, Li, dan Ga mampu menurunkan ukuran partikel ZnO dan mengubah sifat optoelektroniknya [8]. Pada artikel ini, dikaji pengaruh penambahan dopan aluminium terhadap penumbuhan kristal ZnO nanorod. Penumbuhan struktur nanorod dalam bentuk lapisan tipis (*thin film*) sangat dipengaruhi oleh kondisi lapisan inisiator (*seed layer*) [9]. Sehingga dalam artikel ini dikaji pula pengaruh penambahan dopan baik pada lapisan inisiator dan larutan penumbuh ZnO nanorod. Deposisi lapisan ZnO nanorod dilakukan di atas substart konduktif FTO dan AZO, yang selanjutnya digunakan sebagai fotoanoda pada sel surya tersensitisasi dye (dssc) seperti yang diperlihatkan pada gambar 1.

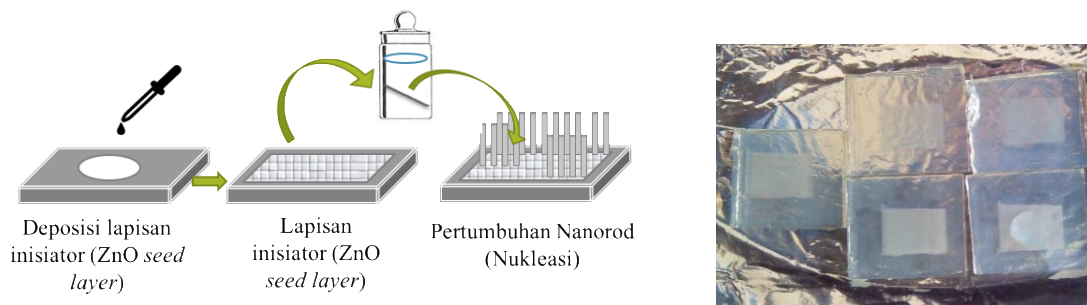


Gambar 1. Struktur sel surya tersensitisasi dye menggunakan ZnO nano-rod terdoping Al (ZnO:AL Nrs) sebagai fotoanoda

EKSPERIMEN

Pembuatan Lapisan ZnO:Al seed layer dan ZnO:Al Nanorod

Zinc acetate dehydrate ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dan *zinc nitrate hexahydrate* ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) produksi Merck; masing-masing digunakan sebagai bahan dasar untuk lapisan *seed layer* dan larutan penumbuh nano-rod. AlCl_3 produksi Sigma Aldrich digunakan sebagai material dopan, dengan variasi konsentrasi terhadap bahan prekursor sebesar 0 wt% (*undoped*), 0,5 wt% dan 1 wt%. Prosedur pembuatan mengikuti penelitian kami sebelumnya [7]. Proses deposisi lapisan inisiator (*seed layer*) dilakukan di atas susbtrat FTO dan substrat AZO komersial. Sebelum digunakan, substrat tersebut telah dibersihkan menggunakan teepol, etanol dan aseton. Larutan *seed layer* terdiri dari 0,5 mM *Zinc acetate dehydrate* dengan *2-methoxyethanol anhydrous* (Sigma-Aldrich) dan *diethanolamine* (Sigma Aldrich) sebagai pelarut dan ligand. Lapisan ZnO-SL dideposisi dengan teknik *spin coating* berkecepatan 1500 rpm selama 30 detik. Proses pemanasan dilakukan secara bertahap yaitu mulai suhu 250°C sampai dengan 500°C . Hal ini bertujuan untuk memfasilitasi pembentukan Kristal ZnO *seed layer* (ZnO-SL). Penumbuhan ZnO nano-rod dilakukan kemudian di atas substrat FTO yang telah dilapisi ZnO-SL (FTO/ZnO-SL). Larutan penumbuh nano-rod terdiri dari larutan equimolar *zinc nitrate hexahydrate* dan Hexamethyltretamine (HMTA) dengan *de-ionized* (DI) water sebagai pelarut. Proses deposisi lapisan ZnO:Al berstruktur nano-rod (ZnO:Al-Nrs) dilakukan dengan metoda *self-assembly* di dalam wadah tertutup, dengan posisi lapisan FTO/ZnO-SL menghadap kebawah membentuk sudut ($\sim 45^\circ$). Penumbuhan ZnO:Al-Nrs dilakukan pada suhu 100°C selama 120 menit di dalam oven listrik. Ilustrasi proses penumbuhan diperlihatkan pada gambar 2a. Selanjutnya lapisan yang terbentuk (gambar 2b) dibilas menggunakan DI-water dan etanol beberapa kali, kemudian di-*annealing* secara bertahap hingga mencapai suhu 500°C .



Gambar 2. (a) Proses deposisi lapisan ZnO seed layer (ZnO-SL). (b) Lapisan ZnO Nanorod yang dihasilkan.

Fabrikasi Sel Surya Skala Laboratorium

Substrat FTO dan AZO komersial yang telah dilapisi oleh struktur nanorod ZnO dan ZnO:Al (FTO/ZnO:Al Nr), selanjutnya digunakan sebagai fotoanoda pada sel surya tersensitisasi dye dengan konfigurasi struktur diperlihatkan pada gambar 1. Untuk meningkatkan daya tampung partikel dye, maka lapisan titania yang terdiri dari nanopartikel TiO_2 berukuran (~ 20 nm) dideposisi di atas FTO/ZnO:Al Nr. Fotoanoda FTO/ZnO:Al Nr/ TiO_2 tersebut direndam semalaman pada larutan yang mengandung *Ruthenium dye* 535-bisTBA (Solaronix SA) dalam keadaan terisolir dari cahaya dan udara luar. Setelah proses perendaman, fotoanoda (FTO/ZnO:Al Nr/ TiO_2 /Ru-dye) dibilas menggunakan asetonitril dan etanol beberapa kali untuk menghilangkan sisa partikel dye yang tidak terserap. Sebagai elektroda lawan, FTO yang telah terlapis platina (Pt/FTO) disusun secara bertumpuk dengan fotoanoda (FTO/ZnO:Al Nr/ TiO_2 /Ru-dye); dipisahkan oleh *surylin film* (ketebalan $25 \mu\text{m}$; produksi Solaronix SA). Elektrolit yang digunakan adalah *mosalyte* (Solaronix SA), yang diinjeksikan ke dalam sel melalui lubang yang sudah tersedia di substrat Pt/FTO. Untuk menghindari kebocoran dan penguapan elektrolit secara cepat, lubang injeksi elektrolit tersebut di *sealed* menggunakan *scotch tape* transparan.

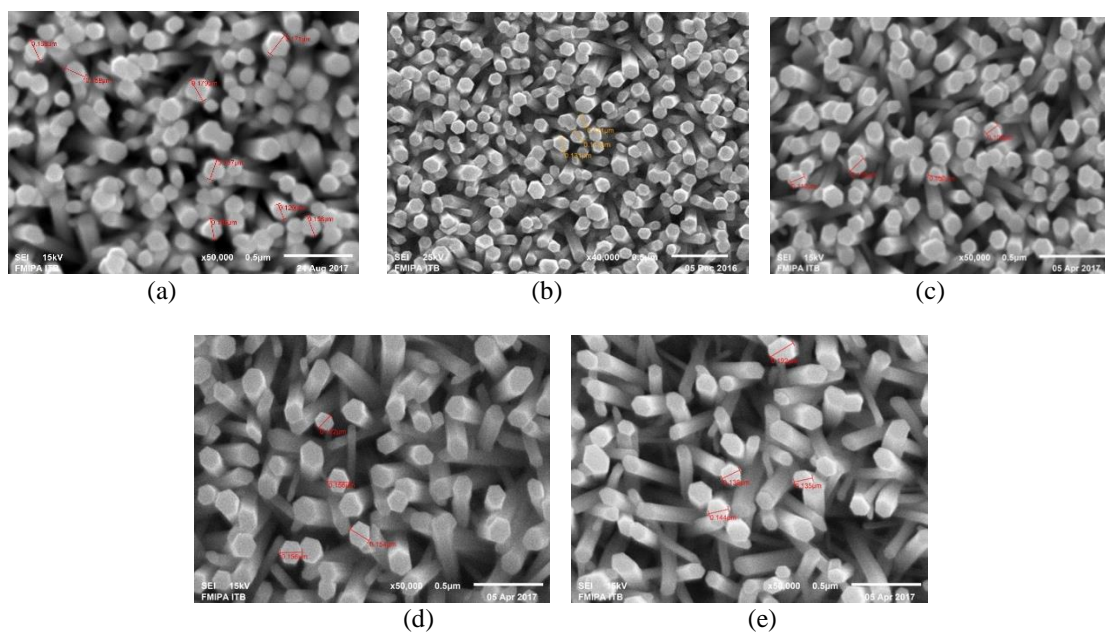
Karakterisasi

Pengamatan morfologi lapisan ZnO:Al Nrs, dilakukan untuk setiap variasi sampel menggunakan perangkat *scanning electron microscopy* (JEOL JSM-6510A). Sedangkan untuk mengetahui struktur Kristal

yang terbentuk, dilakukan pengukuran difraksi sinar-X menggunakan X-pert Pro, PW3050/60 *x-ray diffractometer*. Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dopan terhadap struktur Kristal dan morfologi lapisan ZnO nano-rod. Lapisan ZnO:Al Nrs yang dihasilkan, kemudian digunakan sebagai foto anoda pada sel surya dan diuji peformanya menggunakan karakterisasi I-V (arus-tegangan). Pengukuran karakteristik I-V menggunakan menggunakan sumber arus-tegangan Yokogawa GS200 dan multimeter digital Yokogawa 7555 beserta sumber lampu LED dengan intensitas daya sebesar 36,5 mW/cm².

HASIL DAN PEMBAHASAN

Morfologi lapisan ZnO nanorod dengan dan tanpa penambahan dopan Aluminium diperlihatkan pada gambar 3. Beberapa sampel yang diamati adalah ZnO nanorod (ZnO Nrs) *undoped* (tanpa doping), ZnO:Al Nr dengan penambahan doping baik pada bagian seed layer maupun pada struktur nanorod, serta penggunaan substrat AZO dan FTO. Penamaan sampel ZnO:Al-F(0-1) merupakan sampel ZnO: Al (1wt%) nanorod, ditumbuhkan pada lapisan ZnO-SL *undoped* (0) yang dideposisi pada substrat FTO. Sedangkan Penamaan sampel ZnO:Al-A(0-1), merupakan sampel ZnO :Al (1 wt%) ditumbuhkan pada lapisan ZnO-SL *undoped* yang dideposisi pada substrat AZO. Untuk mengetahui perbedaan penambahan dopan baik pada lapisan *seed layer* dan struktur nanorod, maka dilakukan perbandingan morfologi antara sampel yang tidak didoping (gambar 3(a)) dengan sampel lainnya (gambar 3(b)-(f)). Kristal ZnO nanorod *undoped* memiliki bentuk heksagonal dengan diameter batang yang relatif dan lebih besar tidak homogen (~100 nm s.d ~170 nm). Keberadaan dopan aluminium dapat memperkecil diameter heksagonal ZnO (~130 nm). Berdasarkan hasil penelitian kami sebelumnya, keberadaan atom Al (dengan konsentrasi 0,5 wt%) dapat mereduksi ukuran bulir kristal ZnO (lapisan tipis) yang disebabkan oleh menurunnya tingkat kerapatan bulir yang dihasilkan (*grain packing density*) [7]. Hal tersebut berkaitan dengan radius atomik Al yang lebih kecil dibandingkan dengan atom Zn, dimana atom Al (sebagai dopan) menempati posisi yang seharusnya ditempati oleh atom Zn (*Zn vacancy*).

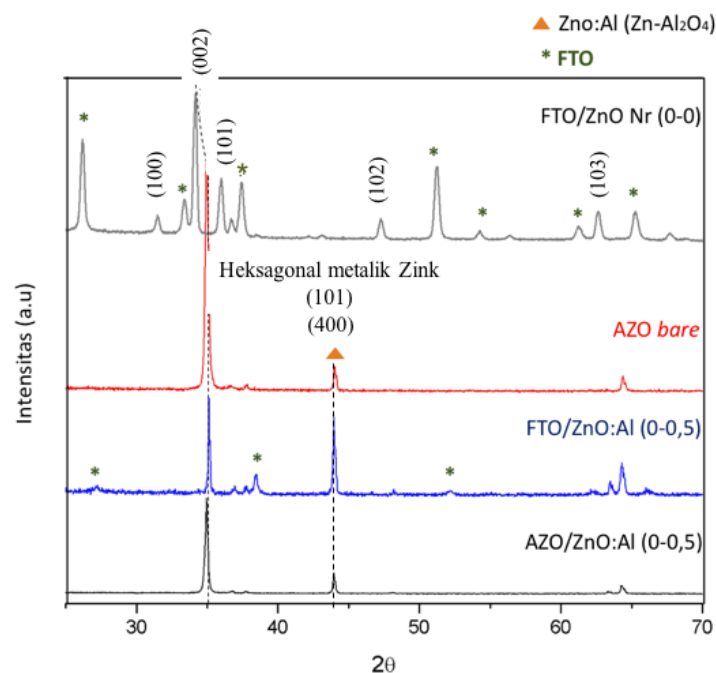


Gambar 3. Hasil pengamatan morfologi lapisan ZnO:Al Nr. (a) ZnO Nanorod *undoped* (0-0), (b) ZnO:Al-F(0,0,5), (c) ZnO:Al-F (0,5-0,5), (d) ZnO:Al-F (1-1), (e) ZnO:Al-A(1-1)

Sampel ZnO:Al Nr yang diperlihatkan pada gambar 3(a) dan 3(b), merupakan struktur nanorod ZnO:Al yang ditumbuhkan pada lapisan ZnO *undoped* dan ZnO:Al SL (*seed layer*) 0,5 wt%. Jika dibandingkan antara keduanya, terlihat secara jelas bahwa konsentrasi 0,5 wt% pada larutan penumbuh struktur nanorod menghasilkan ukuran diameter rata-rata yang lebih kecil dibandingkan dengan ZnO Nr *undoped*. Hal tersebut menunjukkan bahwa kondisi *seed layer* memengaruhi ukuran diameter nanorod yang dihasilkan. Tingkat kekasaran yang rendah pada lapisan *seed layer* akan menghasilkan ukuran diameter yang kecil, disebabkan *seed layer* berperan sebagai lapisan inisiator atau *template* bagi struktur nanorod dalam mengawali proses nukleasi [10]. Perlu dilakukan studi lebih lanjut, untuk mengetahui korelasi antara ukuran diameter dengan konsentrasi dopan pada larutan penumbuh struktur nanorod. Tentu saja banyak faktor/parameter penumbuhan

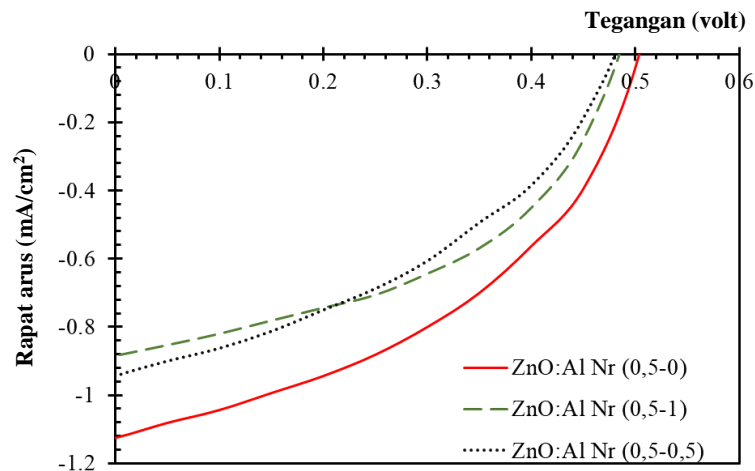
lainnya yang perlu diperhatikan selain konsentrasi dopan diantaranya meliputi metode deposisi, konsentrasi prekursor, waktu dan suhu penumbuhan.

Sampel ZnO:Al-F (0-0,5) (gambar 3(b)) dan ZnO:Al-F (0,5-0,5) (gambar 3(c)), keduanya diberi konsentrasi dopan yang sama yaitu sebesar 0,5 wt% pada larutan penumbuh nanorod (*growth solution*). Sampel ZnO:Al-F (0,5-0,5) memiliki diameter yang lebih kecil dan rapat bila dibandingkan dengan sampel ZnO:Al-F (0-0,5). Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan dopan baik pada lapisan ZnO-SL dan struktur nanorod sangat memengaruhi ukuran nanorod yang dihasilkan. Sedangkan untuk mengetahui pengaruh substrat yang digunakan, dapat dilihat pada sampel (d) ZnO:Al-F (1-1) dan (e) ZnO:Al-A(1-1). Keduanya tidak memperlihatkan perubahan ukuran diameter *rod* (batang) secara signifikan, tetapi penggunaan substrat AZO memperlihatkan kerapatan yang lebih rendah dibandingkan dengan penggunaan substrat FTO. Hal ini kemungkinan besar disebabkan oleh struktur dan morfologi substrat AZO yang memiliki tingkat transparansi yang tinggi bila dibandingkan dengan FTO. Transparansi yang tinggi dapat pula dikorelasikan dengan kerapatan materi yang rendah ataupun ukuran bulir yang kecil. Berdasarkan pengamatan morfologi beberapa sampel di atas, diketahui bahwa terdapat konsentrasi spesifik yang dapat memengaruhi ukuran diameter khususnya penambahan dopan untuk struktur nanorod.



Gambar 4. Spektrum difraksi sinar-X untuk beberapa sampel ZnO:Al Nr yang dideposisi di atas substrat AZO dan FTO, dengan konsentrasi aluminium sebesar 0,5 wt% pada larutan penumbuh nanorod

Struktur dari masing-masing ZnO:Al nanorod yang terbentuk dapat diamati berdasarkan hasil pengukuran difraksi sinar-X yang diperlihatkan pada gambar 4. Sampel yang dipilih untuk dilakukan karakterisasi difraksi sinar-X adalah ZnO Nr *undoped* (FTO/ZnO Nr (0-0), ZnO:Al-F (0-0,5) (ditumbuhkan pada substrat FTO), ZnO:Al-A (0-0,5) (ditumbuhkan pada substrat AZO) dan substrat AZO komersial (AZO *bare*). Tanda bintang (*) menunjukkan spektrum difraksi bagi substrat FTO. Berdasarkan spektrum yang dihasilkan, seluruh sampel diyakini merupakan struktur wurtzite ZnO dengan orientasi dominan pada sudut (2θ) $\sim 34,5^\circ - 35,1^\circ$ yang menunjukkan orientasi pada bidang (002); tegak lurus terhadap bidang penampang membentuk struktur batang. Terdapat pergeseran sudut yang cukup signifikan ketika penambahan dopan aluminium pada bidang (002). Pada dasarnya pergeseran sudut puncak difraksi berkaitan dengan perubahan ukuran parameter kisi kristal pada sampel akibat “penyelusupan” atom Al pada struktur ZnO. Hal ini diperjelas dengan keberadaan puncak baru pada sudut $2\theta = 44,5^\circ$ yang diperkirakan merupakan orientasi bidang (101) bagi metalik Zink heksagonal ataupun (400) bagi ZnO-Al₂O₃ (*Zinc Aluminate*). Zinc Aluminate memiliki struktur *cubic spinel* yang dapat ikut menyusun struktur heksagonal wurtzite ZnO. Struktur spinel bersifat fleksibel (mudah terbentuk) yang berkaitan dengan unsur kation-kation yang mudah bergabung satu dengan yang lainnya. Dalam kasus ini, kation tersebut adalah Zn²⁺ dan Al³⁺. Hal lain yang menarik dari struktur spinel ini adalah kemungkinan banyak memiliki *defect* “kekosongan” (*vacancy*) sehingga dapat mengisi/terisi oleh struktur kristal lainnya.



Gambar 5. Kurva pengukuran rapat arus-tegangan pada divais dssc yang menggunakan ZnO:Al sebagai fotoanoda. Fotoanoda yang digunakan adalah dengan variasi konsentrasi Al pada larutan penumbuh struktur nanorod, yang ditumbuhkan di atas lapisan ZnO:Al SL (*seed layer*) 0,5 wt%

Sebagai fotoanoda pada sel surya tersensitisasi warna (dssc), sampel ZnO:Al nanorod yang digunakan hanyalah yang ditumbuhkan pada substrat FTO. Hal ini berkaitan dengan substrat AZO komersil yang tidak dapat bertahan pada suhu tinggi, sehingga menyebabkan peningkatan resistivitas. Selain itu konsentrasi ZnO:Al SL (*seed layer*) yang digunakan difokuskan pada konsentrasi 0,5 wt%. Hal tersebut berkaitan dengan ukuran nanorod yang dihasilkan ketika menggunakan ZnO:Al SL 0,5 wt% memiliki ukuran diameter yang paling kecil. Hasil karakterisasi sel surya dengan penggunaan fotoanoda tersebut diperlihatkan pada gambar 5. Efisiensi yang berhasil didapatkan adalah dengan menggunakan fotoanoda ZnO:Al (0,5-0) sebesar 0,68% dengan nilai $J_{sc} = 1,1 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} = 0,5 \text{ V}$, dan FF adalah 43%. Performa sel surya yang dihasilkan masih sangat rendah, hal ini kemungkinan disebabkan oleh kualitas dari fotoanoda yang kurang baik pada saat proses fabrikasi. Selain itu, penjajaran nanorod yang tidak homogen menyebabkan banyaknya *trap site* (*void*-ruang kosong) pada persambungan antara fotoanoda dengan elektrolit. Daerah *trap site* dapat menghalangi dan mereduksi proses koleksi/transfer muatan di dalam sel. Dalam kasus ini, penambahan dopan Al pada struktur nanorod memberikan hasil yang tidak efektif ketika digunakan sebagai fotoanoda pada sel surya tersensitisasi dye. Sedangkan berdasarkan hasil penelitian kami sebelumnya yaitu penggunaan ZnO nanorod *undoped* sebagai fotoanoda memberikan peningkatan yang sangat signifikan bila dibandingkan dengan ZnO struktur planar [11,12]. Dengan demikian, terdapat beberapa hal yang masih perlu dikaji, diantaranya adalah metode penumbuhan yang tepat.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengamatan morfologi dan struktur kristal sampel ZnO nanorod yang terdoping oleh aluminium, dapat disimpulkan beberapa hal berikut ini,

- Dopan Aluminium memengaruhi pertumbuhan ZnO nanorod, yaitu memperkecil ukuran partikel dan tingkat kekasaran pada *seed layer*.
- Pendopingan Al pada ZnO Nanorod menghasilkan diameter heksagonal ZnO yang lebih kecil. Hal ini disebabkan karena atom Al memiliki diameter atomik yang lebih kecil dari atom Zn, dan Atom Al menempati lokasi yang seharusnya ditempati oleh Zn.
- Pertumbuhan ZnO:Al cenderung mengalami “*self-attraction*” sehingga menyebabkan susunan nanorod yang tidak teratur
- Zinc Aluminate yang teramati pada spektrum sinar-x dan memiliki struktur cubic spinel turut menyusun struktur heksagonal wurtzite ZnO.
- Untuk aplikasi sebagai fotoanoda pada DSSC, diperlukan bentuk nanorod yang teratur sehingga perlu dilakukan optimasi dan pengkajian lebih lanjut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat dan Inovasi (DRPMI) Universitas Padjadjaran dan Kementerian RISTEK-DIKTI untuk memfasilitasi dan mendanai dalam skema Penelitian Fundamental tahun anggaran 2017 (Kompetitif Nasional) sesuai Kontrak Penelitian Nomor:718/UN6.3.1/PL/2017 pada tanggal 17 April 2017.

REFERENSI

1. M. L. Schmidt and D J L MacManus, *ZnO-Nanostructures, defects and devices*, Materials Today **10** (2007) No. 5 p40-48
2. J. Rouhi, M. H. Mamat, C. H. Raymond Ooi, S. Mahmud, and M. R. Mahmood, *High Performance Dye-Sensitized Solar Cells Based on Morphology-Controllable Synthesis of ZnO-ZnS Heterostructure Nanocone Photoanodes*, Plos One, (2015)
3. Min Zi, Min Zhu, Ling Chne, H. Wei, X. Pang, B. Cao, *ZnO Photoanodes with different morphologies grown by electrochemical deposition and their dye-sensitized solar cell preoperties*, Ceramic Internasional **40** (2014) 7965-7970
4. H. K. Seung, L. Daeho, W. K. Hyun, H. N. Koo, Y. Y. Joon, J. H. Suk, P. G. Costas, and Hyung Jin S 2011, *Nanoforest of Hydrothermally Grown Hierarchical ZnO Nanowires for a High Efficiency Dye-Sensitized Solar Cell*, Nano Letter **11** (2011) 666–671
5. D.-Y. Son, J.-H. Im, H.-S. Kim and N. G. Park, *11% Efficient Perovskite Solar Cells Based on ZnO Nanorods:An Effective Charge Collection System*, The Journal of Physical Chemistry C **118** (2014) 16567-16573
6. S. Lin, H. Hu, W. Zheng, Yan Qu, and F. Lai, *Growth and optical properties of ZnO nanorod arrays on Al-doped ZnO transparent conductive film*, Nanoscale Research Letters **8:158** (2013)
7. A. Aprilia, P. Wulandari, V. Suendo, Herman, R. Hidayat, A. Fujii, and M. Ozaki, *Solar Energy Materials & Solar Cells* **111** (2013) 181-188
8. K. Ho Kim, K. Utashirto, Y. Abe, and M. Kawamura, *Structural Properties of Zinc Oxide Nanorods Grown on Al-doped ZnO seed layer and their applications in Dye sensitized solar cell*, Materials **7** (2014) 2522-2533
9. H. Lee, H.-H. Shin, Jisu Chae, Jung Bin Kim, Tae-Hui Kim, and Kyung-Bong Park, *Effect of Seed Layer Prepared under Various Heating Conditions on Growth of ZnO Nanorod Arrays for Dye-Sensitized Solar Cells*, Electronic Materials Letters, Vol. 9, No. 3 (2013) pp. 357-362
10. L. Safriani, A. Nurrida, C. Mulyana, T. Susilawati, A. Bahtiar and A. Aprilia, *Calculation of DSSC parameters based on ZnO nanorod/TiO₂ mesoporous photoanode*, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, **75** (2017) 012004
11. A. Aprilia, A. Erdienzy, A. Bahtiar, L. Safriani, N. Syakir, Risdiana, T. Saragi, S. Hidayat, Fitrilawati, R. Hidayat, R. E. Siregar, *Self-Assembly of ZnO-Nanorods and Its Performance in Quasi Solid Dye Sensitized Solar Cells*, Journal of Physics:Conference Series **877** (2017) 012023
12. A. Aprilia, L. Safriani, W. O. S. Arsyad, N. Syakir, T. Susilawati, C. Mulyana, Fitrilawati, R. Hidayat, *Zinc Oxide/TiO₂ Bilayer Heterojunction as a Working Electrode in Quasi Solid Dye Sensitized Solar Cells*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, **14** (2017) 012033