

EFEK Co-DOPING Al-Ga PADA NANORODS ZnO TERHADAP EFISIENSI DYE SENSITIZED SOLAR CELLS (DSSC)

I. IWANTONO^{1,†}, N. DAMAYANTI¹, F. ANGELINA¹, F. Y. NAUMAR², A. A. UMAR²

¹Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Riau

Jl. H. R. Soebrantas KM 12,5 Simpang Panam 28293, Pekanbaru, Riau

²Institute of Microengineering and Nanoelectronics (IMEN, UKM Malaysia)
Bangi 43600, Selangor, Malaysia

Abstrak. Nanorod ZnO telah berhasil ditumbuhkan menggunakan metode *seed mediated hydrothermal* dengan variasi persentase konsentrasi larutan *co-doping* yaitu, Ga 1% Al 5%; Ga 1,5% Al 5%; Ga 2,5% Al 5%; Ga 3% Al 5%; dan Ga 5% Al 5% yang ditumbuhkan pada suhu 90°C selama 8 jam. Karakterisasi sampel dilakukan menggunakan spektroskopi UV-Vis, Difraksi Sinar-X, dan FESEM. Pada penelitian ini juga dianalisa efek dari konsentrasi larutan *co-doping* terhadap efisiensi sel surya. Spektrum absorpsi UV-Vis pada sampel menunjukkan bahwa nanorod ZnO berbentuk heksagonal yang tumbuh pada FTO dengan absorpsi kuat sampel terjadi pada rentang panjang gelombang 350 - 380 nm. Pola XRD memperlihatkan puncak difraksi pada $2\theta = 34,43^\circ$, $36,27^\circ$, dan $47,56^\circ$ dengan orientasi bidang kristal (002), (101), dan (102). Foto FESEM menunjukkan tumbuhnya nanorod ZnO dengan diameter berkisar 150 – 290 nm. *Dye Sensitized Solar Cells* dibuat dengan menyusun susunan *sandwich* yang terdiri dari nanostruktur ZnO sebagai material aktif, *dye* N719, elektrolit, dan elektroda lawan yang dilapisi platisol pada substrat FTO. Uji performansi sel dilakukan dengan menganalisa karakteristik I-V dengan menggunakan halogen sebagai sumber cahaya, yang dilengkapi filter AM 1,5G sehingga menghasilkan intensitas yang stabil 100 mW/cm² dan alat *I-V Gamry ephe 200*. Sel optimum memberikan efisiensi sebesar 0,186% untuk sampel dengan persentase konsentrasi Ga 3% dan Al 5%.

Kata kunci: co-doping Al-Ga, nanorod ZnO, hidrotermal, dye sensitized solar cells

Abstract. ZnO nanorods have successfully been grown by using seed mediated hydrothermal method at various percentages of co-doping solution concentration, namely Ga 1% Al 5%; Ga 1,5% Al 5%; Ga 2,5% Al 5%; Ga 3% Al 5%; and Ga 5% Al 5%. The growth of ZnO nanorods was carried out at 90°C for 8 hours. Characteristics of the samples were performed by using UV-Vis, X-Ray Diffraction and FESEM. In this paper, the effect of co-doping solution concentration to the efficiency of Al-Ga co-doped ZnO nanorods based DSSCs was evaluated. UV-Vis spectra of the samples confirmed the hexagonal-shaped ZnO nanorods were grown on FTO with strong absorption occurred in the wavelength range of 350-400 nm. XRD pattern of the samples observed three peaks at $2\theta = 34,43^\circ$, $36,27^\circ$, and $47,56^\circ$ which represented to the crystal orientation of (002), (101), and (102). FESEM images showed ZnO nanorods with their diameter of 150-290 nm grown to the FTO. DSSCs was fabricated by arranging a sandwich structure containing Al-Ga co-doping ZnO nanorods coated on FTO as active materials, N719 dye, electrolyte and platinum coated FTO as counter electrode. Performance of DSSCs was evaluated by analyzing I-V characteristics, resulting the efficiency of DSSCs as high as 0.186% from DSSC based on the sample of Ga 3% Al 5%.

Keywords: co-doping Al-Ga, ZnO nanorods, hydrothermal, dye sensitized solar cells

1. Pendahuluan

Energi surya merupakan salah satu alternatif energi terbarukan yang sedang banyak dikembangkan. Pemanfaatan energi surya dilakukan dengan memfabrikasi sel surya yang kemudian disusun menjadi panel-panel surya. Sel surya adalah suatu devais untuk merubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik dengan mengikuti prinsip fotovoltaiik [1]. Sel surya yang sedang marak dikembangkan oleh para peneliti saat ini adalah sel surya fotoelektrokimia tersensitasi zat warna (*Dye Sensitized Solar Cells*; DSSC) yang dalam pembuatannya lebih mudah dan murah dengan nilai efisiensi yang dihasilkan paling tinggi 11,1% [2]. Masih rendahnya efisiensi dari DSSC, dikarenakan fotoanoda untuk mengabsorpsi foton mengalami rekombinasi prematur sebelum

[†]email : iwan_tono@yahoo.co.uk

mencapai anoda [3]. Sehingga diperlukan elektroda kerja yang mampu mengabsorpsi foton yang lebih baik dan ZnO merupakan salah satu kandidat yang sedang diteliti saat ini. ZnO dalam bentuk nanostruktur pada DSSC berperan sebagai elektroda kerja yang merupakan semikonduktor tipe-n dengan energi gap 3,37 eV pada suhu ruang [4]. Nanostruktur ZnO dipilih karena dapat disintesis dengan mudah, murah, dan ramah lingkungan serta dapat disintesis dengan metode sederhana seperti *chemical bath deposition* (CBD) [5], *seed mediated growth* [6], hidrotermal [7], dan *sputtering* [8]. Saat ini peneliti mengembangkan teknik penyisipan atom asing (*doping*) ke dalam nanostruktur ZnO pada saat proses penumbuhan guna meningkatkan sifat listrik dan sifat optik dari nanostruktur ZnO.

Yun et al [9] telah sukses melakukan pen-*doping*-an menggunakan atom aluminium dan Phan et al [10] menggunakan atom galium. Unsur-unsur yang saat ini banyak digunakan sebagai pen-*doping* adalah unsur golongan IIA dan IIIA seperti boron [11], aluminium [9], galium [10], dan indium [12]. Berbagai parameter fisis dalam proses sintesis nanostruktur ZnO yang dapat dikontrol diantaranya adalah volume dan konsentrasi larutan penumbuh, suhu dan waktu penumbuhan, serta suhu *annealing*. Konduktivitas listrik dari nanostruktur ZnO juga dapat dikontrol dengan melakukan pen-*doping*-an atom logam dan dua unsur atom logam (*co-doping*). Shin et al [13] telah berhasil menumbuhkan nanorod ZnO yang di-*co-doping* galium-aluminium dengan persentase konsentrasi larutan *co-doping* 0.5%-3%. Galium secara berturut-turut mempunyai ikatan ionik dan ikatan kovalen 0.62 Å dan 1.26 Å yang hampir sama dengan ikatan ionik dan ikatan kovalen dari Zn 0.74 Å dan 1.34 Å, sedangkan aluminium 0.50 Å dan 1.26 Å [14]. Pada paper ini dilaporkan nanostruktur/nanorod ZnO disintesis dengan metode seed mediated hidrotermal yang di-*doping* dengan Al-Ga. Pengaruh Al-Ga pada penumbuhan nanorod ZnO dan performansi sel surya berbasis ZnO juga dianalisis.

2. Metode Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah: *hexa-metyl-tetramine* (HMT), *zinc nitrate hexahydrate* (ZNH), *zinc acetate dehydrate* (ZAD), *aluminium (III) nitrate nanohydrate*, *galium (III) nitrate hydrate*, elektrolit, *dye standard N719*, *acetone*, *isopropanol*, *ethanol*, *ethanol absolute*, dan *DI water*. Sedangkan penumbuhan nanorods ZnO dilakukan dengan menggunakan metode seed-mediated hidrotermal, yang terdiri dari 2 tahapan proses: pembenihan dan penumbuhan. Karakterisasi sampel dilakukan menggunakan spektroskopi UV-Vis, Difraksi Sinar-X dan FESEM.

Penumbuhan nanorod ZnO dipersiapkan dengan dua langkah proses, yaitu proses pembenihan dan penumbuhan. Proses pembenihan dilakukan dengan metode *seed mediated*, yang dimulai dengan melarutkan 0,1 M *zinc acetate dihydrate* (ZAD) ke dalam 10 ml *ethanol*. 0,5 ml larutan ZAD kemudian diteteskan di atas permukaan substrat dan diputar di atas *spin coater* selama 30 detik dengan kecepatan 3000 rpm. Selanjutnya sampel dipanaskan di atas *hot plate* selama 15 menit pada suhu 100 °C. Proses pembenihan dilakukan sebanyak 3x pengulangan. Tahap terakhir sampel di-*annealing* di dalam *furnace* selama 1 jam pada suhu 400 °C dan disimpan di dalam *drybox*. Setelah proses pembenihan, tahap selanjutnya adalah proses penumbuhan nanorod ZnO yang dilakukan dengan metode hidrotermal dengan melarutkan 0,1 M *zinc nitrate hexahydrate* (ZNH) ke dalam 10 ml *DI water* dan 0,1 M *hexametyltetramine* (HMT) ke dalam 10 ml *DI water*. Sedangkan larutan *doping* yang disiapkan 0,1 M *aluminium (III) nitrate nanohydrate* dilarutkan ke dalam 5 ml *DI water*, dan 0,1 M *galium (III) nitrate hydrate* dalam 5 ml *DI water*.

Karakterisasi nanorod ZnO dilakukan menggunakan Spektroskopi UV-Vis, XRD, FESEM, dan EDX. Spektroskopi UV-Vis digunakan untuk menentukan tingkat serapan dari sampel atau absorpsi dari sampel pada panjang gelombang yang digunakan 300-800 nm. Difraksi Sinar-X (XRD) digunakan untuk menentukan parameter kisi, struktur kristal, dan orientasi sampel. Pada penelitian ini sudut 2θ yang digunakan dalam karakterisasi sampel adalah $20^\circ - 60^\circ$. Sedangkan FESEM dan Energi Dispersif Sinar-X (EDX) digunakan untuk melihat bentuk, ukuran, keseragaman, sebaran atau densitas, serta komposisi yang terkandung pada sampel.

Fabrikasi sel DSSC dilakukan dan dimulai dengan membuat batas daerah yang akan diuji menggunakan parafilm dengan ukuran luas 0.23 cm^2 . Substrat FTO yang telah di tumbuhi nanostruktur ZnO direndam dalam larutan *dye* N719 selama 2 jam dalam keadaan gelap dan selanjutnya sampel disusun membentuk struktur *sandwich* dan ditetesi elektrolit. Selanjutnya sel diukur menggunakan I-V Gamry EPHE 200 dengan memberikan pencahayaan pada sel menggunakan lampu 100 mW/cm^2 . Karakteristik kurva I-V yang dihasilkan digunakan untuk menentukan nilai efisiensi sel.

3. Teori/Perhitungan

Sel surya atau fotovoltaik adalah suatu piranti semikonduktor untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik dengan menggunakan kristal silikon (Si) yang tipis. Sel surya fotovoltaik ini ditemukan oleh Becquerel pada tahun 1839, ketika Becquerel mendeteksi adanya tegangan foto ketika sinar matahari mengenai elektroda pada larutan elektrolit [15]. Hingga saat ini sudah berkembang tiga generasi sel surya. Generasi pertama sel surya adalah sel surya fotovoltaik yang dibuat dari silikon kristal tunggal dan multi kristal yang efisiensinya mencapai 24 % [1619]. Generasi kedua adalah sel surya lapis tipis dengan efisiensi yang dihasilkan mencapai 19%, biaya produksi lebih murah dibandingkan sel surya silikon [16]. Generasi ketiga adalah sel surya fotoelektrokimia (sel surya organik, *dye sensitized solar cells* - DSSC) dengan biaya yang jauh lebih rendah dari sel surya sebelumnya dan efisiensi maksimum yang dihasilkan mencapai 11,1%.

DSSC merupakan sel surya fotoelektrokimia tersensitasi zat warna, pertama kali dikembangkan oleh Michael Grätzel pada tahun 1991, dan sampai saat ini telah menjadi salah satu topik penelitian yang dilakukan oleh para peneliti di seluruh dunia [17]. Berbeda dengan sel surya konvensional, DSSC menggunakan elektrolit sebagai medium transport muatan. Selain elektrolit DSSC terdiri dari elektroda kerja (material aktif), *dye*, elektroda lawan yang dilapisi katalis untuk mempercepat laju reaksi [18]. Prinsip kerja dari DSSC adalah foton yang datang diserap oleh *dye* sehingga mengakibatkan elektron tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi. *Dye* yang tereksitasi akan menginjeksi sebuah elektron ke dalam pita konduksi, dan selanjutnya elektron akan mengalir melewati rangkaian luar menuju elektroda lawan. Elektron akan masuk kembali ke dalam sel dan mereduksi donor teroksidasi *iodide* yang ada di dalam elektrolit. *Dye* teroksidasi tersebut akan menerima donor elektron yang tereduksi *triiodide* dan tergenerasi kembali menjadi molekul awal [19].

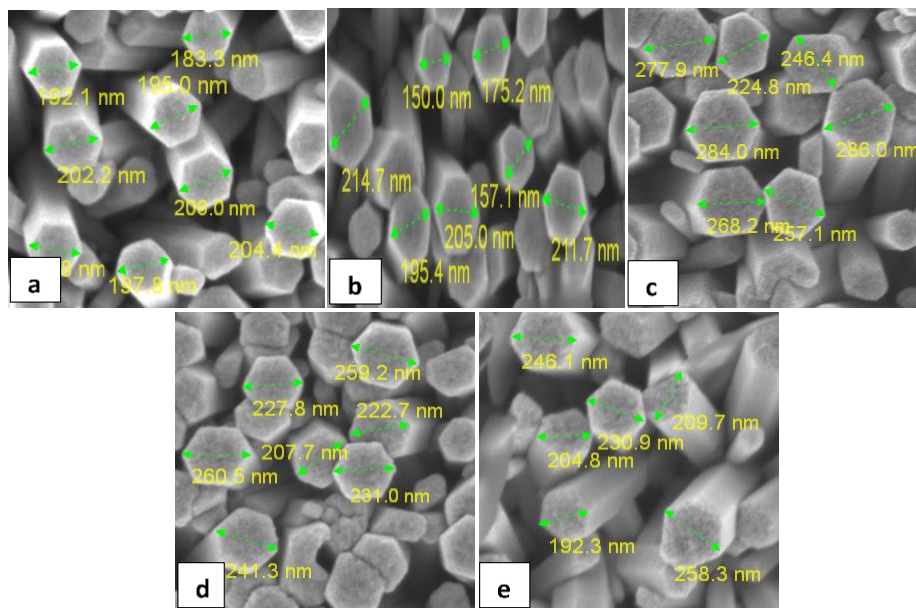
Proses *co-doping* merupakan penyisipan dua unsur atom logam asing yang bertujuan untuk meningkatkan konduktivitas listrik. Unsur tersebut biasanya adalah galium-aluminium yang di-*co-doping* ke dalam ZnO. Shin et al [20] telah berhasil melakukan proses *co-doping* Ga-Al dengan konsentrasi larutan *co-doping* 0,5% sampai 3%.

Sel dari DSSC difabrikasi membentuk struktur *sandwich*. Pada proses uji performansi ini ada beberapa parameter sel surya yang diamati yaitu arus hubung singkat (*short circuit current*),

tegangan hubung terbuka (*open circuit voltage*), dan faktor pengisi (*fill factor*) untuk parameter internal. Daya maksimum dan efisiensi juga merupakan parameter yang umum digunakan untuk membandingkan performa sel surya [21]. *Fill factor* sel surya merupakan besaran tidak berdimensi yang menyatakan perbandingan daya maksimum yang dihasilkan sel surya terhadap perkalian antara V_{oc} dan I_{sc} . Sedangkan efisiensi sel surya didefinisikan sebagai perbandingan daya keluaran (daya maksimum) dengan daya masukan [21].

3. Hasil dan Pembahasan

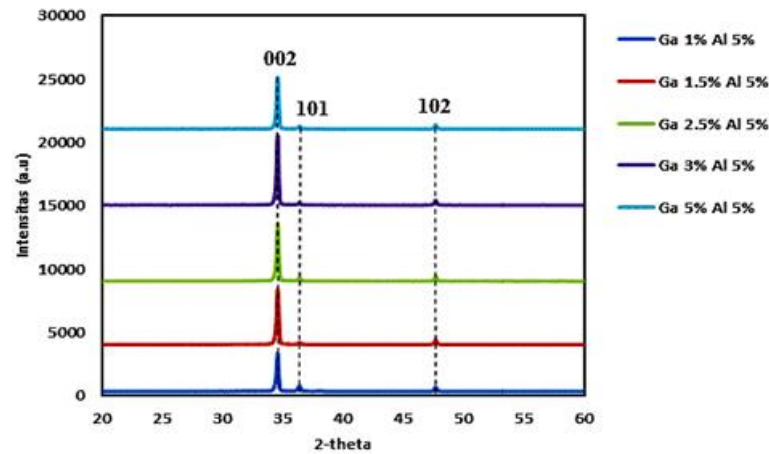
Hasil dari pemindaian FESEM memberikan gambar nanostruktur ZnO, termasuk bentuk, ukuran, dan distribusinya. Foto FESEM nanorod ZnO yang di-*co-doping* Ga-Al pada suhu 90°C selama 8 jam ditunjukkan pada Gambar 1. Gambar 1 memperlihatkan bahwa semakin besar persentase konsentrasi larutan *co-doping*, struktur dari nanorod ZnO menjadi lebih kasar dan berporos. Poros yang terbentuk pada struktur nanorod ZnO diharapkan mampu menyerap *dye* lebih banyak. Ukuran diameter nanorod ZnO yang dihasilkan bervariasi untuk semua sampel. Pada persentase konsentrasi Ga 1% Al 5% diameter nanorod ZnO berkisar antara 180-210 nm, sedangkan untuk sampel dengan Ga 1.5 % Al 5%; Ga 2.5% Al 5%; Ga 3% Al 5%, Ga 5% Al 5% berturut-turut adalah 150 – 212 nm, 250 – 290 nm, 207 – 260 nm, dan 192 – 260 nm. Berdasarkan rentang diameter nanorod ZnO, terlihat bahwa nanorod ZnO yang ditumbuhkan pada persentase Ga 1% Al 5% mempunyai diameter yang lebih homogen dibandingkan dengan sampel lainnya.



Gambar 1. Hasil pemindaian FESEM nanostruktur ZnO di-*co-doping* Ga-Al(a) 1% : 5% (b) 1.5% : 5%, (c) 2.5% : 5%, (d) 3% : 5%, dan (e) 5% : 5% pada perbesaran 50.000 X

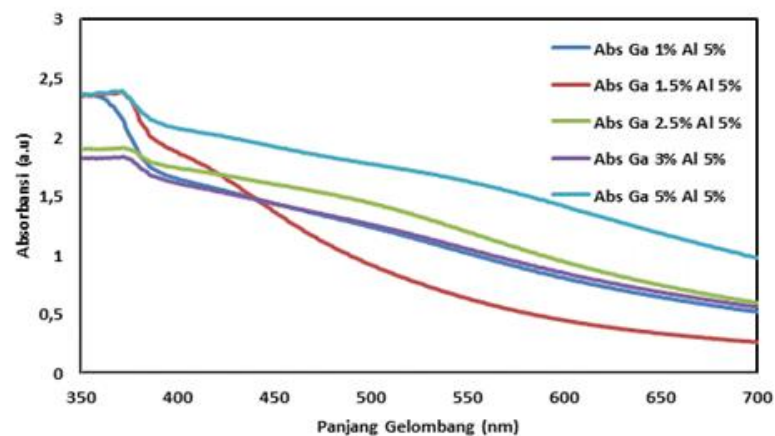
Gambar 1 juga memperlihatkan bahwa semakin besar persentase konsentrasi larutan *co-doping*, nanorod ZnO yang tumbuh semakin kurang sempurna dan kurang merata. Hal ini disebabkan karena tingginya persentase konsentrasi larutan penumbuh membuat nanorod ZnO yang terbentuk lebih tebal, karena ion Zn^{+2} lebih cepat berdifusi ketika konsentrasi larutan penumbuh meningkat [22]. Pola XRD dari nanorod ZnO yang di-*co-doping* dengan galium-aluminium ditunjukkan pada Gambar 2. Puncak-puncak difraksi muncul pada sudut $2\theta = 34,43^{\circ}$, $36,27^{\circ}$, dan $47,56^{\circ}$ dengan

orientasi bidang (002), (101), dan (102) secara berturut-turut. Hasil analisa puncak-puncak tumbuhnya nanorod ZnO ini sesuai dengan data JCPDS dengan No. 01-070-8070. Spektrum XRD tertinggi dihasilkan sampel dengan persentase konsentrasi Ga 3% Al 5%.



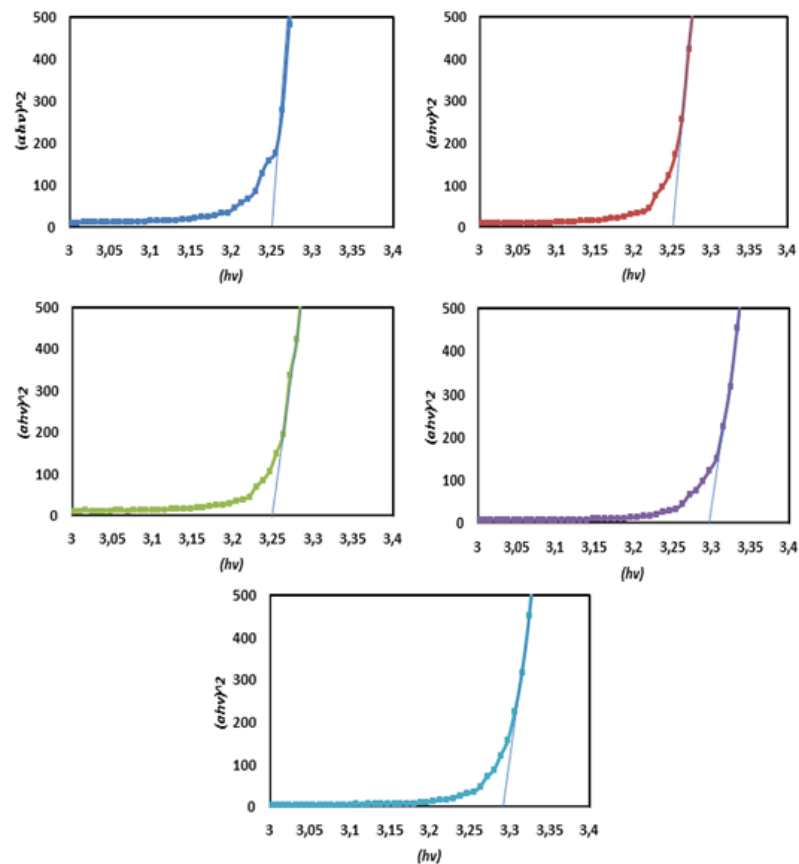
Gambar 2. Pola XRD nanostruktur ZnO yang di-*co-doping* galium-aluminium

Karakteristik spektrum absorpsi UV-Vis untuk nanorod ZnO dengan struktur heksagonal berada pada rentang panjang gelombang 200 - 400 nm [23]. Gambar 3. memperlihatkan spektrum absorpsi nanorod ZnO yang di-*co-doping* galium-aluminium.



Gambar 3. Kurva absorpsi UV-Vis dari sampel yang mengandung nanostruktur ZnO di-*co-doping* galium-aluminium pada variasi konsentrasi *co-doping*

Tingkat penyerapan optimum pada Gambar 3 dihasilkan sampel dengan persentase Ga 5% Al 5%. Penyerapan kuat pada semua sampel terjadi pada rentang panjang gelombang 350 – 380 nm, hasil ini sesuai dengan [23]. Gambar 4 merupakan kurva hasil transformasi linear dari $(\alpha h\nu)^2$ vs $(h\nu)$ dari ZnO. Kurva tersebut memperlihatkan nilai energi gap yang digambarkan oleh garis linier yang memotong sumbu x (ekstrapolasi).



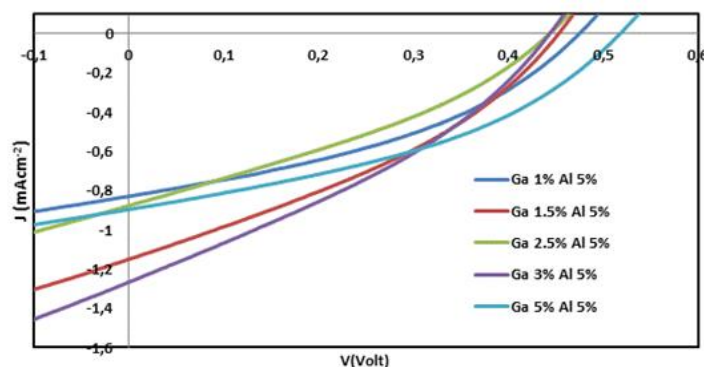
Gambar 4. Kurva hasil transformasi linier $(\alpha hv)^2$ vs (hv) dari nanostruktur ZnO yang di-co-doping galium-aluminium

Surono dan Susanto [24] menyatakan bahwa nilai energi gap menunjukkan pergerakan elektron dalam melintasi pita valensi menuju pita konduksi. Hasil ekstrapolasi memperlihatkan energi gap nanorod ZnO setelah di-co-doping Ga-Al meningkat dengan meningkatnya persentase konsentrasi. Tabel 1 mendeskripsikan besarnya energi gap nanorod ZnO yang di-co-doping Ga-Al untuk variasi persentase Ga-Al.

Tabel 1. Energi gap nanorod ZnO yang di-co-doping galium-aluminium

No	Kode Sampel	Energi Gap (Eg)
1	ZnO-Ga 1% Al 5%	3.249 eV
2	ZnO-Ga 1.5% Al 5%	3.249 eV
3	ZnO-Ga 2.5% Al 5%	3.25 eV
4	ZnO-Ga 3% Al 5%	3.30 eV
5	ZnO-Ga 5% Al 5%	3.30 eV

Uji performansi DSSC berbasis nanorod ZnO yang di-co-doping galium-aluminium dilakukan dengan pengukuran I-V dibawah sinar cahaya lampu halogen 100 mW/cm².



Gambar 5. Kurva J-V dalam keadaan disinari cahaya lampu halogen dengan intensitas 100 mW/cm^2 dari DSSC nanostruktur ZnO yang di-co-doping Ga-Al

Gambar 5 memperlihatkan grafik J-V dari sel saat disinari cahaya. Dari Gambar 5 terlihat kurva J-V dari sel dengan persentase konsentrasi Ga 3% Al 5% menghasilkan luasan bidang paling besar dibandingkan sampel lainnya. Semakin luas bidang pada kurva J-V, maka mobilitas elektron semakin tinggi sehingga nilai efisiensi yang dihasilkan akan semakin tinggi pula. Nilai efisiensi tertinggi sel adalah sebesar 0,189% yang diperoleh dari sel dengan persentase konsentrasi Ga 3% Al 5%. Tabel 2 mendeskripsikan data pengukuran dan perhitungan parameter fisis dari DSSC berbasis nanorod ZnO yang di-co-doping galium-aluminium.

Tabel 2. Parameter fisis hasil pengukuran dan perhitungan DSSC berbasis nanorod ZnO yang di-co-doping gallium-aluminium.

Sampel	$V_{oc}(V)$	$J_{sc}(\text{mAcm}^{-2})$	FF	η (%)
Ga 1% Al 5%	0,47	0,83	38,6	0,15
Ga 1,5% Al 5%	0,45	1,15	34,4	0,179
Ga 2,5% Al 5%	0,42	0,87	33,3	0,13
Ga 3% Al 5%	0,44	1,27	33,2	0,186
Ga 5% Al 5%	0,44	0,99	32,4	0,14

4. Kesimpulan

Nanorod ZnO telah berhasil ditumbuhkan di atas FTO sebagai material aktif DSSC menggunakan metode *seed mediated hidrotermal* dengan variasi persentase konsentrasi larutan *co-doping* Ga 1% Al 5%, Ga 1,5% Al 5%, Ga 2,5% Al 5%, Ga 3% Al 5%, Ga 5% Al 5% selama 8 jam pada suhu 90 °C . Foto FESEM dari sampel memperlihatkan bahwa semakin besar persentase konsentrasi larutan *co-doping*, struktur dari sampel menjadi lebih kasar dan berporos. Selain itu semakin meningkatnya persentase konsentrasi *pen-doping* menghasilkan nanorod ZnO yang tumbuh semakin kurang sempurna dan tidak merata di atas FTO. Ukuran diameter nanorod ZnO yang dihasilkan bervariasi untuk semua sampel. Nanorod ZnO yang ditumbuhkan pada persentase Ga 1% Al 5% memiliki ukuran diameter yang lebih homogen dibandingkan dengan sampel lainnya yaitu pada rentang 180 – 210 nm. Hasil XRD memberikan informasi bahwa terjadi dua puncak difraksi pada sudut $2\theta = 34,43^\circ$, $36,27^\circ$, dan $47,56^\circ$ mengindikasikan keberadaan nanostruktur ZnO dengan orientasi bidang kristal (002), (101), dan (102). Puncak XRD tertinggi dihasilkan sampel dengan persentase konsentrasi Ga 3% Al 5%. Spektrum absorpsi UV-Vis memperlihatkan bahwa sampel yang dihasilkan berbentuk nanorod dengan puncak absorpsi kuat terjadi pada rentang panjang gelombang 350 - 380 nm untuk semua sampel. Penyerapan optimum dihasilkan sampel

dengan persentase Ga 5% Al 5%. Hasil pengukuran I-V dari DSSC memperlihatkan efisiensi tertinggi terjadi pada sel dengan elektroda kerja Ga 3% Al 5% yang memberikan nilai parameter fisis: tegangan terbuka (V_{oc}) 0,44 V, rapat arus (J_{sc}) 1,27 mA/cm², *fill factor* 33,2, dan efisiensi sel 0,186%.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih atas dukungan dana dari Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi melalui Hibah Penelitian Kerjasama Luar Negeri (KLN) atas nama Dr. Iwantono Tahun 2015., dengan nomor kontrak: 550/UN.19.1/LPPM/2015.

Daftar Pustaka

1. Rahman, A., Fabrikasi dan Karakterisasi Nanopartikel ZnO untuk Aplikasi Dye Sensitized Solar Cell, Tesis, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok, 2011.
2. Grätzel, M., Dye-Sensitized Solar Cells, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, Volume 4, 2003, 145-153.
3. Nakamura, Y., Solution growth of Zinc Oxide Nanowire for dye sensitized solar cell, *NNIN REU Research*, 2006, 74-76.
4. Dixit, H., First-principles electronic structure calculation of transparent conducting oxide materials, Thesis, Departement Fysica Faculteit Wetenschappen, Universiteit Antwerpen Belgium, 2012.
5. Khallaf, H., Chai, G., Lupan, O., Heinrich, H., Park, S., Schulte, A., Chow, L., Investigation of chemical bath deposition of ZnO thin films using six different complexing agents, *IOP Publishing: Journal of Physics*, Vol. 42, 2009, 1-8.
6. Oskam, G., Synthesis of ZnO and nanoparticles, *Journal Sol-gel science technology*, Vol. 37, 2003, 157-160.
7. Chao, C. H., Chan, C. H., Huang, J. J., Chang, L. S., Shih, H. C., Manipulated the band gap of 1D ZnO nano-rods array with controlled solution concentration and its application for DSSCs, *Current Applied Physics*, Vol. 11, 2011, 136-139.
8. Lee, J. H., Lee, K. Y., Kumar, B., and Kim, S. W., Synthesis of Ga-doped ZnO nanorods using an aqueous solution method for a piezoelectric nanogenerator, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 12, no.4, 2012, pp. 3430-3433.
9. Yun, S., Lee, J., Lim, S., Hydrothermal synthesis of Al-doped ZnO nanorod arrays on Si substrate, *Science Direct Journal: Physica B*, Vol. 405, 2010, 413-419.
10. Phan, D. T., Chung, G. S., Effects of defects in Ga-doped ZnO nanorods formed by a hydrothermal method on CO sensing properties, *Sci Verse Science Direct, Sensors and Actuators B: Chemical Journal*, Vol. 187, 2013, 191-197.
11. Yamamoto, Y., Saito, K., Takashi, K., Konagai, M. Preparation of Boron-doped ZnO Thin Film By Photo-atomic Layer Deposition, *Journal Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 65, 2001, 125-132.
12. Park, Y. R., Nam, E., Jung, D., Suh, S. J., Kim, Y. S., Hydrogenated In-Doped ZnO Thin Films For The New Anode Material Of Organic Light Emitting Devices: Synthesis And Application Test, *Journal Bulletin Korean Chemist. Soc.*, Vol. 28(12), 2007, 2396-2400.
13. Shin, J. H., Shin, D. K., Lee, J. Y., Lee, H. Y., Characteristics of Gallium and Aluminum co-doped ZnO (GAZO) Transparent Thin Film Deposited by Using the PLD Process, *Journal of the Korean physical society*, Vol.55 (3), 2009, 947-951.
14. Makino, T., Segawa, Y., Yoshida, S., Tsukazaki, A., Ohtomo, A., Kawasaki, M., and Koinuma, H., *Journal Applied Physics*, 98, 2005, 093520.

15. Ariswan, Prospek Penelitian dan Aplikasi Fotovoltaik Sebagai Sumber Energi Alternatif di Indonesia, Universitas Negeri Yogyakarta, 2010.
16. Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., Solar Cell Efficiency Tables (version 37), Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 19, 2011, 84-92.
17. Phani, G., G. Tulloch, D., Vittorio, and Skryabin, I., Titania Solar Cells: New Photovoltaic Technology. Renewable Energy, Vol. 22, 2001, 303-309.
18. Wilman, S., Fajarisandi, Dimas, A. Mega. 2007. *Pembuatan Prototipe Solar Cell Murah dengan Bahan Organik-Inorganik (Dye-sensitized Solar Cell)*. Laporan Penelitian Bidang Energi. Institut Teknologi Bandung.
19. B. Li, L. Wang, B. Kang, P. Wang, Y. Qiu. 2006. *Solar cells*. Solar Energy Mater. 90: 549.
20. Shin, J. H., Shin, D. K., Lee, J. Y., Lee, H. Y. 2009. Characteristics of Gallium and Aluminum co-doped ZnO (GAZO) Transparent Thin Film Deposited by Using the PLD Process. *Journal of the korean physical society*. vol.55 (3): 947-951.
21. Diputra, W. 2008. Simulator Algoritma Pendeteksi Kerusakan Modul Surya pada Rangkaian Mobil Surya, Tesis Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
22. Ko, H. Y., Sub Kim, M., and Su Yu, T., Controllable Electrochemical Synthesis of ZnO Nanorod Array On Flexible ITO/PET Substrate and Their Structural and Properties, Journal Applied Surface Science, 2012.
23. Irannejad, A., Janghorban, K., Tan, O. K., Huang, H., Lim, C. K., Tan, P. Y., Fang, X., Chua, C. S., Maleksaeedi, S., Hejazi, S. M. H., Shahjamali, M. M., Ghaffari, M., Effect of The TiO₂ Shell Thickness on The Dye Sensitized Solar Cells with ZnO-TiO₂ Core – Shell Nanorod Electrodes, International Journal of Electrochemical Science, Vol.10, 2011, 1-6.
24. Surono, A. T. & Susanto, H. Sifat Optik Zinc Oxide (ZnO) yang dideposisi diatas substrat kaca menggunakan metode chemical solution deposition (CSD) dan aplikasinya untuk degradasi zat warna methylene blue, Younger physical journal, 2(1), 7-14.