

Analisis Hasil Sintesis Serbuk TiO_2/ZnO Sebagai Lapisan Elektroda untuk Aplikasi *Dye-sensitized Solar Cell*

Analysis of Synthesis Results of TiO_2/ZnO Powder as Electrode Layer for Dye-sensitized Solar Cell Application

Lilis Retnaningsih^{*}, Lia Muliani, dan Putri Nur Anggraini

Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.
Komp LIPI Gd 20, Jl Sangkuriang 21/54D, Bandung 40135, Indonesia

Abstrak

Pada penelitian ini telah dilakukan sintesis antara serbuk partikel nano TiO_2 dan serbuk partikel nano ZnO menjadi pasta yang akan diaplikasikan sebagai elektroda pada *dye-sensitized solar cell* (DSSC). Elektroda pada DSSC ini bekerja berdasarkan adsorpsi foton oleh pewarna, elektron yang tereksitasi ditransfer ke TiO_2/ZnO yang mempunyai perbandingan berbeda. Dimensi material partikel nano TiO_2/ZnO sebagai elektroda sangat penting untuk menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi pada DSSC. Sifat ini sangat dipengaruhi oleh metoda fabrikasi elektroda TiO_2/ZnO dan parameternya. Pada penelitian ini digunakan metoda *doctor blade* untuk fabrikasi DSSC dan larutan *dyes* (Z907) sebagai zat pewarna. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh pencampuran serbuk TiO_2 dan serbuk ZnO sebagai elektroda. Teknik pembuatan pasta TiO_2/ZnO sebagai elektroda sangat penting untuk menghasilkan efisiensi tinggi pada DSSC. Teknik ini sangat terkait dengan material TiO_2/ZnO , metoda fabrikasi, dan parameter pengukurannya. Dalam penelitian ini dibahas hasil karakterisasi XRD pada kedua serbuk TiO_2 dan ZnO , hasil SEM pada pencampuran kedua material, hasil pengujian IPCE serta hasil pengukuran efisiensi pada pengujian I - V.

Kata kunci: *dye-sensitized solar cell*, TiO_2 , ZnO , *doctor blade*.

Abstract

In this study, synthesis of TiO_2 and ZnO nanopowders to be paste has been done to prepare the working electrode for dye-sensitized solar cells. This electrode works based on adsorbed photons by dye and the excited electrons are transferred to TiO_2/ZnO particles which have different composition. Properties of DSSC are affected by fabrication method, parameter, and composition of TiO_2/ZnO nanoparticles. Doctor blade method is applied to deposit the paste onto the glass substrates. These films are immersed into dye (Z907) solution. From the experiment, the effect of TiO_2 and ZnO nanopowders mixtures for working electrode has been investigated. Precise technique and composition of TiO_2/ZnO paste preparation are important to result in the higher performance of DSSC. XRD and SEM characterizations are done to obtain the morphology of TiO_2/ZnO photoelectrodes. Performance of DSSC can be showed by IPCE and I-V measurements.

Keywords: *dye-sensitized solar cell*, TiO_2 , ZnO , *doctor blade*.

I. PENDAHULUAN

Pengembangan energi surya menjadi tuntutan untuk memenuhi kebutuhan energi pada saat ini, di mana kondisi lingkungan semakin memburuk sehingga diperlukan bahan penghasil energi yang murah dan ramah lingkungan. Sel surya berbasis pewarna atau disebut juga DSSC (*Dye-sensitized Solar Cell*) merupakan salah satu energi alternatif dengan pemanfaatan cahaya matahari yang diubah menjadi energi listrik yang disebut dengan sel surya. Sel surya yang sedang dikembangkan pada saat ini menggunakan bahan yang berasal dari alam [1]. Bahan dasar DSSC dapat berupa material yang diperoleh dan diolah dari alam, dan DSSC ini merupakan salah satu kandidat potensial sel surya generasi baru, proses serta biayanya relatif lebih rendah [2].

Aplikasi DSSC saat ini merupakan pengalihan teknologi dari sel surya konvensional yang berbahan silikon ke sel surya berbahan kaca dengan menggunakan material semikonduktor sebagai elektrodanya. Dari kedua jenis sel surya ini masing-masing memiliki fungsi pada aplikasi yang berbeda, bergantung pada masing-masing kebutuhan. Untuk DSSC aplikasinya sebagian besar pada alat-alat elektronik yang memerlukan tegangan kecil. Material semikonduktor sebagai penghasil listrik di antaranya adalah ZnO dan juga TiO_2 , ZnO atau TiO_2 yang berukuran nano dapat diaplikasikan ke berbagai fungsi, salah satunya adalah sebagai fotovoltaiik. ZnO dan TiO_2 bekerja pada sinar tampak karena memiliki *band gap* yang lebar, yaitu pada saat cahaya tampak mengenai material semikonduktor maka akan terjadi pelepasan elektron [3].

DSSC tersusun atas sepasang elektroda, yakni elektroda kerja dan elektroda lawan (*counter electrode*). Elektroda terbuat dari substrat kaca konduktif, yang telah dilapisi *Transparent Conductive Oxide* (TCO). Elektroda kerja tersusun atas lapisan oksida partikel nano yang dilapisi oleh molekul zat pewarna (*dye*)

^{*} Corresponding Author.

Email: lilisretna@gmail.com

Received: December 14, 2015; Revised: December 28, 2015

Accepted: December 29, 2015

Published: December 30, 2015

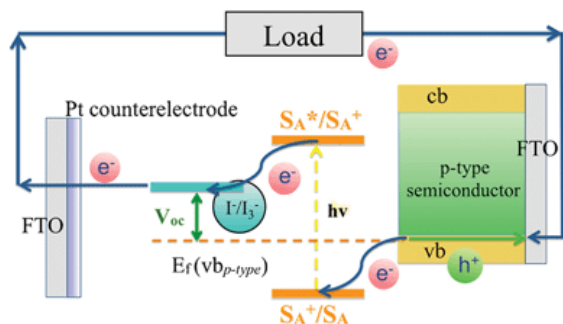
© 2015 PPET - LIPI

doi : 10.14203/jet.v15.55-59

sensitasi. Molekul *dye* berfungsi sebagai penangkap foton cahaya dan partikel nano semikonduktor berfungsi menyerap dan meneruskan foton menjadi elektron. Pada elektroda *counter* yang berada pada lapisan sisi belakang DSSC merupakan lapisan katalis yang umumnya berupa lapisan karbon atau Platina, yang berfungsi untuk mempercepat kinerja reaksi proses reduksi triiodide pada TCO. Selain itu DSSC juga menggunakan media elektrolit sebagai medium transport muatan.

Material semikonduktor TiO_2 dan ZnO merupakan bahan yang dapat dan mudah diaplikasikan sebagai bahan utama pembuatan DSSC. Sifat lain dari semikonduktor partikel nano adalah daya absorpsi optik dan sifat emisi pada panjang gelombang yang lebar. TiO_2 dan ZnO keduanya merupakan material yang paling cocok sebagai bahan penghasil energi cahaya dengan tegangan yang dihasilkan relatif rendah.

Tahapan konversi cahaya menjadi energi listrik di dalam DSSC diilustrasikan pada Gambar 1 [4]. Tahap awal *sensitizer* menyerap foton dan elektron dari S_A (*ground state*) menuju level energi (tereksitasi) yang lebih tinggi S_A^* dengan mengikuti reaksi $S_A + e \rightarrow S_A^*$, selanjutnya terjadi penginjeksian elektron yang tereksitasi ke *conduction band* semikonduktor. Pada tahap ini molekul *dye* teroksidasi menjadi S_A^+ , kemudian elektron bergerak melalui lapisan TiO_2 poros dan ZnO ke daerah konduktif dan mencapai elektroda lawan. Akibat adanya katalis pada elektroda lawan, elektron kemudian ditransfer dari elektrolit triode ke *yield* dari iodida membentuk elektron-hole (I_3^-). Iodida akan mereduksi S_A^+ ke bentuk awal S_A berdasarkan reaksi $2S_A^+ + 3e^- \rightarrow I_3^- + 2S_A$.



Gambar 1. Mekanisme Kerja DSSC.

Berdasarkan prinsip kerja ini sehingga dipahami bahwa keberadaan lapisan oksida semikonduktor memainkan peranan yang sangat penting sebagai "jantung" dari sebuah sistem DSSC untuk mengkonversi energi cahaya menjadi energi listrik.

Sebagai semikonduktor, TiO_2 dan ZnO sangat potensial diaplikasi sebagai elektroda dalam teknologi fotovoltaik, piranti *electroluminescence* dan material piranti pemancar ultraviolet. Partikel nano seng oksida sebagai material semikonduktor yang menghasilkan *luminescence* biru sampai hijau-kuning yang cukup efisien. Sifat ini menjadikan ZnO sebagai material yang sangat potensial bagi pengembangan sumber cahaya putih (*white light sources*). Karena strukturnya yang kovalen, material oksida juga biasa disebut dengan keramik [5]. Dalam bentuk lapisan tipisnya, material oksida ini transparan terhadap cahaya dikarenakan *band*

gap-nya yang sesuai. Sifat konduktifnya (lebih tepatnya semikonduktif) diaplikasikan untuk *transparent conducting oxide* (TCO) pada layar LCD, LED, *electrochromic windows* (jendela yang bisa mengatur dirinya menjadi transparan-gelap) hingga lapisan pertama pada sel surya lapis tipis. Beberapa jenis metoda sintesis ZnO berstruktur nano adalah *chemical vapor deposition* (CVD), *metal-organic CVD* dan elektrodeposisi. Struktur kristal dan ukuran bulir partikel pada lapisan tipis ZnO sangat mempengaruhi sifat optik dan elektriknya. Pada dasarnya orientasi dari kristal nano yang membentuk lapisan tipis sangat bergantung pada jenis substrat. Tujuan dari penelitian ini adalah membuat pasta dengan pencampuran kedua material TiO_2 dan ZnO yang dapat menghasilkan keluaran tegangan yang maksimal serta dapat meningkatkan efisiensi pada aplikasi DSSC berbahan material nano [6].

II. METODA PENELITIAN

Pada penelitian ini telah dilakukan beberapa tahapan proses yang meliputi, penyiapan bahan proses, pembuatan pasta ZnO/TiO_2 pabrikasi DSSC, pembuatan elektroda lawan, perakitan DSSC, pengukuran serta karakterisasi hasil pabrikasi.

A. Pembuatan Pasta TiO_2/ZnO Sebagai Elektroda Kerja

Proses pembuatan pasta TiO_2/ZnO diawali dengan persiapan bahan dari serbuk TiO_2 dan serbuk ZnO , yang terlebih dahulu keduanya ditimbang, lalu dibakar (*disintering* pada suhu 450°C selama 2 jam). Serbuk hasil *sintering* kemudian ditumbuk untuk menghasilkan ukuran nanometer, selanjutnya mencampurkan kedua serbuk dengan perbandingan tertentu yaitu pada pembuatan pasta campuran antara serbuk ZnO dan serbuk TiO_2 dilakukan dengan mencampurkan 3 variasi dengan perbandingan yang berbeda. Untuk campuran pertama terdiri atas 20% serbuk ZnO + 80% serbuk TiO_2 , campuran kedua terdiri atas 40% ZnO + 60 % TiO_2 dan campuran ke tiga adalah 80% ZnO + 20% TiO_2 serbuk hasil tumbukan lalu dibuat larutan dengan menambahkan ethanol, DEG, Aquades dan triton-X, lalu seluruh campuran tersebut diaduk menggunakan *stirrer* dengan kecepatan sedang selama 24 jam. Dari ketiga variasi tersebut, masing-masing dicampurkan dan dilakukan penambahan larutan kimia seperti yang telah disebutkan di atas, lalu dilakukan pengadukan menggunakan *stirrer* selama 24 jam [7].

B. Pabrikasi Pasta TiO_2/ZnO di Atas Substrat Kaca FTO

Pasta hasil pencampuran yang telah diaduk kemudian siap untuk di lakukan pabrikasi, yaitu pencetakan pasta di atas substrat kaca yang berlapis konduktor dengan resistivitas 15 ohm/sq. Pabrikasi dilakukan dengan teknik *doctor blade* di atas substrat kaca dengan dimensi lapisan yang dibuat sebesar 1×1 cm. Hasil pabrikasi selanjutnya dikeringkan pada suhu 120°C selama 10 menit. Setelah dikeringkan kemudian dibakar di dalam *furnace* pada suhu 500°C selama 30 menit.

C. Pabrikasi Lapisan Platina

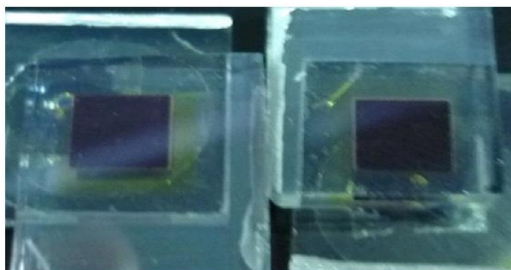
DSSC memiliki dua sisi yang saling berhadapan, satu sisi merupakan lapisan elektroda yang berupa material semikonduktor, dan sisi yang lain adalah lapisan platina yaitu sebagai elektroda lawan. Lapisan elektroda lawan ini dibuat dengan teknik *sputtering* yaitu membuat lapisan platina di atas kaca dengan teknik *sputtering*. Ketebalan platina hasil *sputtering* tidak berpengaruh terhadap nilai DSSC yang akan dicapai, sehingga ketebalan lapisan elektroda lawan ini diharapkan cukup optimal.

D. Perendaman Lapisan Elektroda ke Dalam Larutan Dye

Hasil pabrikasi lapisan TiO_2/ZnO yang telah *dyeing*, selanjutnya direndam di dalam larutan *dyes* selama 24 jam. Larutan *dyes* dibuat dengan melarutkan serbuk *Dye* (Z907) ke dalam larutan ethanol dengan perbandingan tertentu. Setelah perendaman 24 jam, selanjutnya lapisan DSSC dibilas menggunakan larutan ethanol lalu dikeringkan.

E. Perakitan dan Pengisian Larutan Elektrolit

Lapisan elektroda dan lapisan platina telah siap untuk dipabrikasi (digabungkan saling menempel berhadapan). Pada kedua bagian sisinya diberikan surlin, yaitu perekat untuk kaca berbentuk plastik, sehingga kedua sisi dapat saling menempel. Setelah dipanaskan pada suhu 100°C , seperti dapat dilihat pada Gambar 2. Di antara keduanya diberikan sisa celah untuk pengisian larutan elektrolit, larutan elektrolit berupa larutan redoks Iodine I_3^-/I^- HSE yang dimasukkan di antara celah menggunakan pipet sehingga dapat mengalir ke seluruh permukaan elektroda.



Gambar 2. Foto Hasil Pabrikasi DSSC untuk Material TiO_2/ZnO .

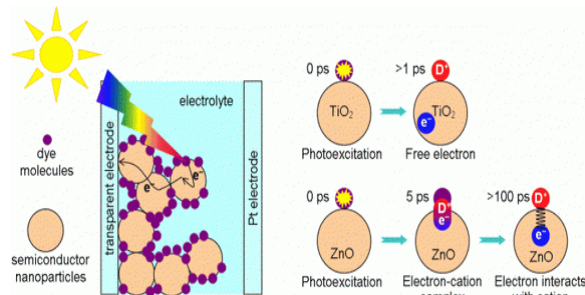
Setelah dibiarkan beberapa saat maka DSSC siap dilakukan pengukuran dan karakterisasi.

F. Karakterisasi dan Pengukuran

Prototipe yang telah dihasilkan ada sebanyak 3 jenis prototipe, dengan masing-masing perbedaan pada kandungan material elektrodanya. Untuk prototipe 1 merupakan campuran pasta TiO_2 80% + ZnO 20%, prototipe ke 2 dengan pasta TiO_2 60% + ZnO 40%, dan pasta ke 3 dengan campuran pasta TiO_2 20% + ZnO 80%. Karakterisasi dan pengukuran yang telah dilakukan yaitu terhadap serbuk material nano dikarakterisasi dengan alat XRD, pengujian SEM untuk mengetahui porositas permukaan lapisan, pengujian IPCE dilakukan pada sel DSSC yang telah menjadi sel dan pengujian I-V setelah dilakukan perakitan sel untuk mengetahui tegangan, arus dan efisiensinya [8].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

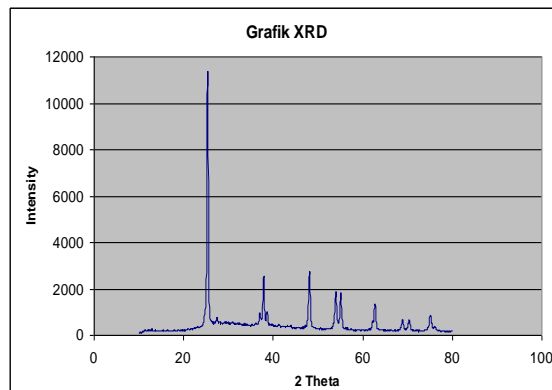
Hasil akhir dari pabrikasi DSSC adalah melakukan karakterisasi dan pengukuran sampel. Adapun karakterisasi yang telah dilakukan adalah karakterisasi material TiO_2/ZnO berupa serbuk maupun lapisan tipis DSSC di atas substrat kaca. Adapun pengujian dan karakterisasi yang telah dilakukan pada serbuk maupun hasil pabrikasi DSSC adalah XRD, SEM, IPCE dan I-V. Mekanisme kerja DSSC dari perpaduan kedua material TiO_2/ZnO seperti tampak pada Gambar 3 di bawah ini.



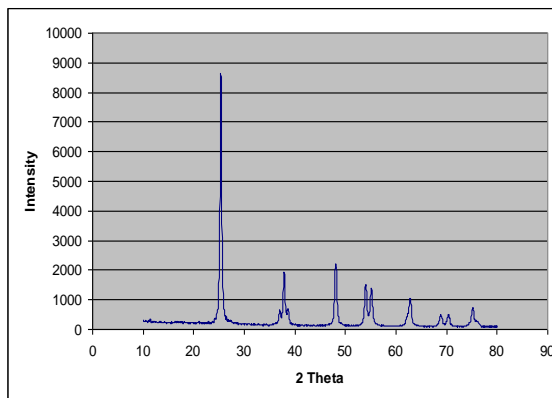
Gambar 3. Mekanisme Kerja DSSC dengan Pencampuran Material TiO_2 dan ZnO .

A. Pengujian XRD

Material TiO_2 dan ZnO sebelum dijadikan pasta terlebih dahulu dilakukan *sintering* selama 2 jam pada suhu 500°C dengan pencampuran satu sama lain, kemudian serbuk hasil pencampuran dilakukan pengujian menggunakan XRD. Adapun hasil karakterisasi tersebut disajikan pada Gambar 4 (setelah *sintering*) dan Gambar 5 (sebelum *sintering*).



Gambar 4. Hasil Pengujian XRD pada Serbuk Campuran $\text{TiO}_2 + \text{ZnO}$ Setelah Dilakukan *Sintering*.

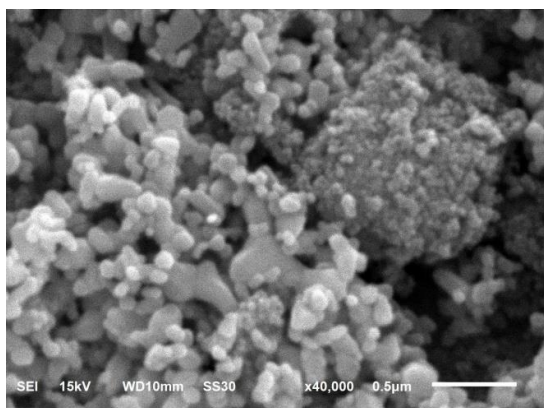


Gambar 5. Hasil pengujian XRD pada Serbuk Campuran $\text{TiO}_2 + \text{ZnO}$ Sebelum Dilakukan *Sintering*.

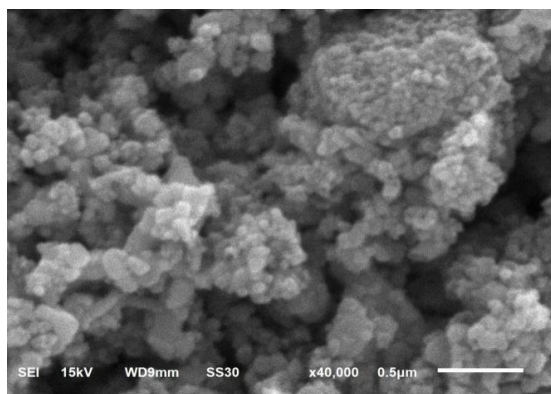
Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa hasil pengujian dari serbuk $\text{TiO}_2 + \text{ZnO}$ setelah mengalami *sintering* memiliki intensitas di atas 11.000, seperti terbentuk pada puncak yang tertera pada Gambar 4 [9]. Sementara pada Gambar 5 hasil pengujian dari serbuk $\text{TiO}_2 + \text{ZnO}$ sebelum mengalami *sintering* terlihat puncak Intensitas-nya lebih rendah yaitu sekitar 8500. Jadi di sini setelah dilakukan *sintering* maka Intensitasnya jadi lebih tinggi, yang menunjukkan keteraturan susunan kristal dan posisi atom-atomnya lebih baik.

B. Pengujian SEM

Pasta hasil pencampuran antara TiO_2 dan ZnO selanjutnya dilakukan pengujian sampel untuk mengetahui porositas dari lapisan material melalui uji SEM. Hasil pengujian SEM dapat dilihat pada Gambar 6 dan 7.



Gambar 6. Hasil Pengujian SEM Pasta $\text{TiO}_2 + \text{ZnO}$ dengan Perbandingan Material 20%+80%.



Gambar 7. Hasil Pengujian SEM Pasta $\text{TiO}_2 + \text{ZnO}$ dengan Perbandingan Material 60%+40%.

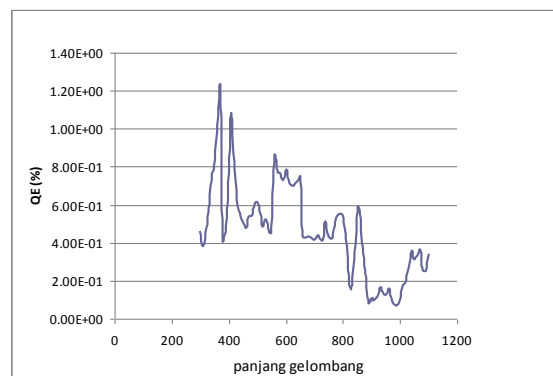
Pada Gambar 6 dengan perbandingan material $\text{TiO}_2 + \text{ZnO}$ sebesar 20%+80% terlihat dari hasil SEM menunjukkan butiran ZnO lebih banyak dan relatif lebih besar, dari Gambar 6 telah terlihat adanya rongga/celah sehingga lebih mempermudah terjadinya proses loncatan elektron, yang mengakibatkan mudah terjadinya arus listrik.

Demikian juga pada hasil SEM Gambar 7 merupakan hasil pengujian SEM dengan pasta hasil pencampuran antara $\text{TiO}_2 + \text{ZnO}$ dengan perbandingan sebesar 60%+40%. Dari gambar SEM terlihat menghasilkan butiran dari kedua material hampir merata, butiran yang lebih besar merupakan ZnO , sedangkan yang butiran lebih kecil adalah TiO_2 . Dari

celah/rongga inilah akan terjadinya loncatan elektron sehingga memudahkan terjadinya arus listrik.

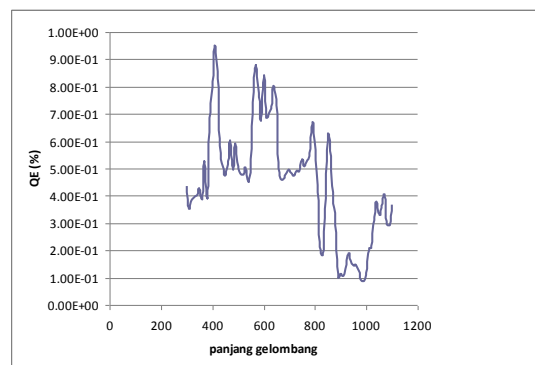
C. Pengujian IPCE

Pengujian IPCE (*Incident Photon to Current Conversion Efficiency*) terhadap DSSC dengan material utama TiO_2/ZnO bertujuan untuk menentukan efisiensi konversi cahaya pada DSSC hasil fabrikasi. Pengujian IPCE dilakukan pada sel yang telah direndam pada zat pewarna, di mana zat pewarna yang digunakan berasal dari bahan pewarna sintesis yaitu Dye (Z907). Pengujian IPCE bertujuan untuk mengetahui efisiensi konversi cahaya pada DSSC, pada penelitian ini ada 2 grafik hasil pengujian IPCE, yaitu untuk $\text{TiO}_2 + \text{ZnO}$ dengan perbandingan 60%+40%, dan $\text{TiO}_2 + \text{ZnO}$ dengan perbandingan 20%+80%. Adapun grafik hasil pengujian disajikan pada Gambar 8 dan 9.



Gambar 8. Spektrum IPCE DSSC (TiO_2 60% + ZnO 40%).

Gambar 8 merupakan spektrum IPCE DSSC dengan campuran material TiO_2 60% + ZnO 40%. Nilai IPCE yang tertinggi berada pada rentang panjang gelombang antara 300-400 nm. Hal ini menunjukkan bahwa proses transfer elektron dari pewarna ke pita konduksi semikonduktor terjadi secara efektif, juga nilai IPCE menunjukkan transfer elektron I^- ke pewarna teroksidasi secara efektif [10]. Semakin tinggi nilai IPCE maka semakin banyak foton yang diubah menjadi arus [11].

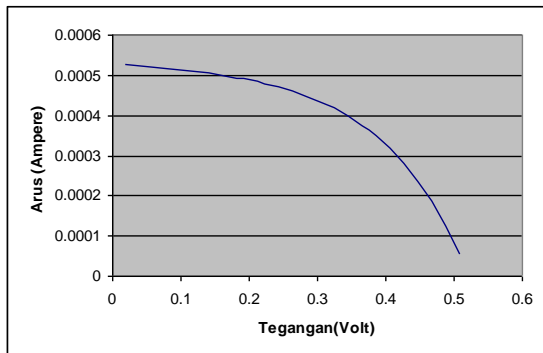


Gambar 9. Spektrum IPCE DSSC (TiO_2 20% + ZnO 80%).

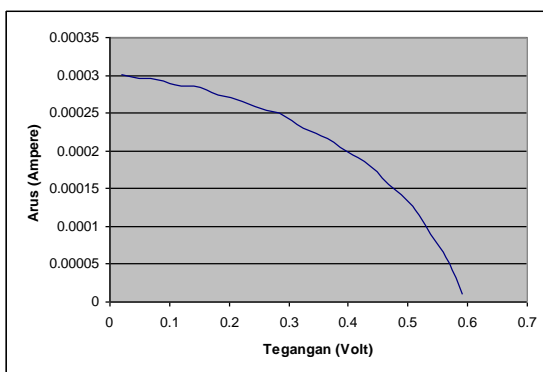
Dari Gambar 9 terlihat bahwa nilai IPCE tertinggi terletak pada rentang panjang gelombang 400 nm. Jika dibandingkan dengan anatase, fase rutile memiliki IPCE yang lebih tinggi dengan panjang gelombang 400 nm hingga 750 nm. Pada anatase, peningkatan IPCE pada panjang gelombang 500-550 nm adalah berhubungan dengan adsorpsi pewarna yang tinggi yang dipengaruhi oleh permukaan yang luas [12].

D. Performansi DSSC

Pengujian arus dan tegangan dilakukan untuk mengetahui performansi DSSC. Efisiensi DSSC sangat bergantung pada nilai I_{SC} , V_{OC} dan FF. Jika nilai efisiensi yang diperoleh cukup tinggi maka DSSC ini cukup berhasil dan dapat diaplikasikan. Performansi DSSC yang telah diperoleh dari hasil pencampuran TiO₂ dan ZnO disajikan pada Gambar 10 dan 11.



Gambar 10. Grafik Hasil Pengukuran I-V untuk TiO₂ 20 % + ZnO 80%.



Gambar 11. Grafik Hasil Pengukuran I-V untuk TiO₂ 60 % + ZnO 40%.

Dari Grafik Gambar 10 diperoleh nilai, $FF = 0,514$, $I_{SC} = 0,0527$ mA, $V_{OC} = 0,514$ V, dan Efisiensi sebesar 0,277%. Sedangkan grafik hasil pengukuran yang kedua yaitu pada Gambar 11, dengan perbandingan TiO₂ dan ZnO sebesar 60% dan 40 % diperoleh hasil yaitu $I_{SC} = 0,301$ mA, $V_{OC} = 0,590$ V, $FF = 0,448$, dan efisiensi sebesar 0,158%. Dari kedua grafik hasil pengukuran diperoleh bahwa nilai efisiensi yang lebih besar adalah hasil pengukuran pada DSSC campuran serbuk TiO₂ dan ZnO dengan perbandingan 20%:80%. Besarnya perbandingan pencampuran material antara TiO₂ dan ZnO sangat mempengaruhi nilai efisiensi yang

KESIMPULAN

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan kinerja sel surya dan mencari alternatif material baru sebagai bahan pembuatan DSSC. Material utama bersifat alami, murah dengan prosedur yang lebih mudah.

1. Pengujian XRD menghasilkan grafik yang belum menunjukkan adanya fase anatase dan rutil, karena fase ini terbentuk pada pemanasan dengan suhu di antara 600-700 °C. Nilai intensitas untuk serbuk TiO₂ dan ZnO yang telah dilakukan *sintering*

memiliki nilai 11.000. Sedangkan untuk pasta tanpa pemanasan sebelumnya menghasilkan XRD senilai 8500.

2. Pada pengujian SEM dengan perbandingan TiO₂ dan ZnO sebesar 20%+80% adalah yang lebih baik dibandingkan dengan TiO₂ dan ZnO sebesar 60%+20% karena di antara partikelnya memiliki rongga atau celah. Pengukuran IPCE yang menghasilkan nilai tertinggi berada pada rentang panjang gelombang 300-400 nm.
3. Nilai pengukuran I-V material TiO₂ dan ZnO dengan perbandingan 20% : 80%.

Dari grafik diperoleh nilai, Efisiensi sebesar 0,277%. Sedangkan untuk TiO₂ dan ZnO sebesar 60% dan 40% diperoleh hasil Efisiensi sebesar 0,158%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada LIPI yang telah mendukung dan membiayai penelitian ini. penulis juga mengucapkan banyak terimakasih kepada rekan-rekan dan beberapa pihak maupun instansi yang telah memberikan bantuan dan partisipasi, terutama dalam pelaksanaan krakterisasi material yang diteliti.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. G. Rodriguez, "Photoelectrochemical characterization of dye solar cell based on nanostructure zinc oxide substrates", Thesis, Departement of Physical, Chemical and Natural Systems, University Pablo de Olavide Sevilla, 2006.
- [2] Y. Chiba, A. Islam, Y. Watanabe, R. Komiya, N. Koide, and L. Y. Han, "Dye-sensitized solar cell with conversion efficiency of 11,1%", *Jpn. J Appl. Phys.*, vol. 45, no. 25, L638-L640, 2006.
- [3] H. Yonekawa, "Dye-sensitized solar cell fabricated with ZnO nanoparticles for high conversion efficiency." Master Thesis, Department of Applied Chemistry and Biochemistry, Kumamoto University Japan, 2012.
- [4] T. Pichaman, S. Kumar, and J. Dutta, "Photoelectrode optimization of zinc oxide nanoparticle based dye-sensitized solar cell by thermal treatment". *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 7, pp. 4988-4999, 2012.
- [5] M. Giannouli and F. Spiliopoulou, "Effects of the morphology of nanostructured ZnO film on the efficiency of dye-sensitized solar cells", *Renewable Energy*, vol. 41, pp. 115-122, 2012.
- [6] H. Jensen. (2006). ZnO and TiO₂ dye-sensitized Graetzel cells. [Online]. Available: <https://engineering.dartmouth.edu/reu/2006/Jensen-Report.pdf>.
- [7] R. A. Wahyuno. "Dye-sensitized solar cell (DSSC) fabrication with TiO₂ and ZnO nanoparticle for high conversion efficiency", Master Thesis. ITS, Surabaya, Indonesia, 2009.
- [8] K. Lee, V. Suryanarayanan, and K. Ho, "Influences of different TiO₂ morphologies and solvents on the photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells", *Journal of Power Sources*, vol. 188, pp. 635-641, 2009.
- [9] G. Syrokosta, M. Giannouli, and P. Yianoulis, "Effects of paste storage on the properties of nanostructured thin film for the development of dye-sensitized solar cells", *Renewable Energy*, vol. 34, no.7, pp. 1759-1764, 2009.
- [10] Y. Lee, J. Chae, and M. Kang, "Comparison of the photovoltaic efficiency on DSSC for nanometer sized TiO₂ using a conventional sol-gel and solvothermal methods", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 16 pp. 609-614, 2010.
- [11] Y. Lee and M. Kang, "The optical properties of nanoporous structured titanium dioxide and the photovoltaic efficiency on DSSC", *Materials Chemistry and Physics*, vol. 122 pp. 284-289, 2010.
- [12] C. Quinonez, W. Vallejo, and G. Gordillo, "Structural, optical and electrochemical properties of TiO₂ thin films grown by APCVD method", *Applied Surface Science*, vol. 256, pp. 4065-4071, 2010.