

Pengaruh Preparasi Pasta dan Temperatur Annealing pada Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC) Berbasis Nanopartikel ZnO

Ahmad Syukron, Doty Dewi Risanti, dan Dyah Sawitri

Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

e-mail: risanti@ep.its.ac.id

Abstrak—Telah difabrikasi *Dye-sensitized Solar Cell* (DSSC) berbasis nanopartikel ZnO dengan variasi metode preparasi pasta sesuai dengan Yonekawa dan Gratzel dan temperatur fabrikasi. Nanopartikel ZnO dibuat dengan metode kopresipitasi yaitu dengan mereaksikan prekursor *Zinc Asetat* dengan DEG (*diethylene glycol*). Preparasi fotoelektroda ZnO dilakukan dengan memvariasikan komposisi pasta berdasarkan metode yang dilakukan oleh Gratzel dan Yonekawa untuk mendapatkan efisiensi yang besar. Selain itu, dilakukan variasi temperatur pada proses anil fotoelektroda. Fabrikasi DSSC menggunakan pewarna manggis sebagai pewarna alami. DSSC difabrikasi dalam bentuk struktur *sandwich* dengan menggunakan pasangan redoks I_3/I^- dan elektroda pembanding platina/karbon. Hasil karakterisasi ZnO menunjukkan ZnO berdispersi tunggal dengan ukuran agregat dan partikel sebesar ~300nm dan 13,93 nm. Energi band gap yang dihasilkan dari nanopartikel ZnO adalah 3,29 eV. Berdasarkan karakteristik kurva I-V dan IPCE, diperoleh bahwa efisiensi terbaik berada pada suhu 200°C dengan menggunakan metode Yonekawa sebesar 0,11% dengan IPCE 0,0005%, FF 61,41%, I_{sc} 2,79 μ A, V_{oc} 232,4 mV).

Kata Kunci— ZnO, DSSC, Temperatur Annealing, Hidrolisis.

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi dunia terus mengalami peningkatan. Menurut proyeksi Badan Energi Dunia (*International Energy Agency-IEA*), hingga tahun 2030 permintaan energi dunia meningkat sebesar 45% atau rata-rata mengalami peningkatan sebesar 1,6% per tahun. Sekitar 80% kebutuhan energi dunia tersebut dipasok dari bahan bakar fosil [1]. Pengembangan teknologi guna mencari pengganti bahan bakar fosil dan ramah lingkungan terus dilakukan [2,3]. Dalam energi terbarukan, potensi penggunaan energi matahari sebagai energi utama sangat besar. Terhitung bahwa 0,1% permukaan bumi membutuhkan sel surya dengan efisiensi 10% [4]. Untuk mengkonversi sinar matahari menjadi energi listrik digunakan sel fotovoltaik. Sel fotovoltaik pertama kali terbuat dari bahan silikon [5]. Pada tahun 1991, mulai berkembang teknologi berbasis bahan organik, yaitu *dye-sensitized* yang diperkenalkan oleh Grätzel [6].

Berbeda dengan sel surya berbasis silikon, pada DSSC penyerapan cahaya dilakukan oleh molekul pewarna dan separasi muatan oleh material semikonduktor nanopartikel yang memiliki energi *band gap* lebar. Hingga saat ini telah dihasilkan efisiensi sebesar 11% dengan memanfaatkan energi *band gap* material semikonduktor titanium dioksida (TiO_2) nanopartikel [7]. Oksida Seng (ZnO) merupakan salah satu

jenis material alternatif yang memiliki energi *band gap* yang hampir sama dengan TiO_2 dan mudah disintesis dalam variasi struktur nano. Efisiensi yang dihasilkan oleh DSSC berbasis nanopartikel ZnO ini ialah maksimum sebesar 5% dengan menggunakan pewarna N719[3,4].

Salah satu sifat pada nanopartikel ZnO yang diperhatikan adalah perlakuan panas, yaitu *annealing*. Pengaturan temperatur *annealing* dibutuhkan guna menghasilkan performa DSSC yang maksimal. Peningkatan temperatur *annealing* mempengaruhi jumlah butir, kemampuan absorbansi pewarna, dan kerapatan arus[8].

Dalam upaya peningkatan efisiensi DSSC, fabrikasi fotoelektroda DSSC merupakan salah satu faktor penting yang perlu diperhatikan. Hal ini dikarenakan fabrikasi fotoelektroda berpengaruh pada kontak antara fotoelektroda terhadap substrat kaca TCO untuk memperoleh tahanan elektroda yang minimum. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini akan diteliti tentang pengaruh preparasi pasta dan temperatur *annealing* pada fotoelektroda ZnO terhadap performansi DSSC.

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Bahan

Pemilihan bahan ini meliputi pemilihan jenis bahan yang digunakan untuk sintesis. Bahan-bahan yang digunakan ialah *Zinc acetat dehydrate* ($Zn(CH_3COOH)_2 \cdot 2H_2O$) [Merck], *Diethylene glycol* (DEG) [Merck Schuchardt OHG], Aquades Bratachem dan Ethanol 96% Bratachem.

B. Sintesis ZnO

Dengan reaksi hidrolisis, 0,01 mol ZnAc (2,195 gram) dilarutkan dalam 100 ml DEG. Reaksi dilakukan pada suhu 160°C dengan laju pemanasan 6 °C /menit dan diaduk dengan menggunakan *magnetic stirrer* pada kecepatan pengadukan 180 rpm sehingga diperoleh larutan jernih selama 2 jam. Larutan ditetesi aquades (4 ml) kemudian diaduk dan dipanaskan pada suhu 180°C selama 2 jam, sehingga dihasilkan larutan berwarna putih dengan cepat. Larutan, selanjutnya, melalui proses sentrifugasi dengan kecepatan 6000 rpm selama 30 menit. Presipitat ZnO pada permukaan tabung terpisah dengan cairan *supernatant* (berwarna bening). Presipitat ZnO diuraikan kembali dengan ethanol menggunakan *Ultrasonic Cleaner CXQ-30A* selama 15 menit. Endapan ZnO yang dihasilkan kemudian dipanaskan dengan menggunakan *Hot Plate* pada suhu 100 °C selama 24 jam.

C. Preparasi Fotoelektroda ZnO dan Fabrikasi DSSC

Preparasi fotoelektroda meliputi pembuatan pasta ZnO dan pemberian variasi temperatur *annealing*. Pada pembuatan pasta ZnO, dilakukan menurut dua metode. Metode pertama yang telah dilakukan oleh Grätzel dkk yaitu sebanyak 2 gram ZnO direaksikan dengan 0,7 ml aquades. Sebuah stabilizer CH₃COOH ditambahkan ke dalam larutan dan ditetesi 0,1ml Triton X-100 (sekitar 3 tetes) untuk meningkatkan penyebaran koloid substrat FTO. ZnO dilapisi pada kaca TCO dengan menggunakan teknik “*doctor blade*”[6]. Metode kedua yang telah dilakukan oleh Yonekawa dkk yaitu pasta ZnO (umumnya 0,3 gram/mL dengan etanol 70% dan pelarut aquades 30%) dilapisi pada kaca TCO (substrat FTO, sekitar ± 13Ω/sq) dengan menggunakan teknik “*doktor blade*” [9]. Kedua metode tersebut diberikan variasi temperatur anil 100 °C, 200 °C, 300 °C, dan 400 °C selama 1 jam. Setelah itu, dilakukan pencelupan pada pewarna fotoelektroda ZnO selama semalam (12 jam) [4]. DSSC difabrikasi dengan struktur *sandwich* menggunakan komponen DSSC dari fotoelektroda, pewarna (*dye*), elektrolit (pasangan redoks I₃⁻ / I⁻), dan katalis platina [6-9].

D. Karakterisasi dan Pengukuran

Hasil sintesis ZnO dilakukan karakterisasi *Ultraviolet-visible Spectroscopy* (UV-Vis) 1100, *Fourier-Transform Infrared Spectroscopy* (FT-IR) Nicolet iS10, *Thermogravimetric Analysis - Differential Scanning Calorimetry* (TGA-DSC) Metler Toledo Star e-system, *X-Ray Diffraction* (XRD) X-pert Mpd dan *Scanning Electron Microscope* (SEM) Fei Inspect s50.

Kurva arus-tegangan (I-V) dihasilkan dengan mengukur arus dan tegangan dari DSSC. Intensitas cahaya yang dihasilkan dari sinar matahari secara langsung (P_{light}) digunakan untuk mengetahui nilai arus maksimum (I_{sc}) dan tegangan maksimum (V_{oc}). Nilai dari titik tegangan maksimum (V_{max}) dan titik arus maksimum (I_{max}) juga diperoleh dari kurva I-V. Nilai yang diperoleh dari kurva I-V tersebut, selanjutnya digunakan untuk mengetahui besar dari *fill factor* (FF), daya keluaran maksimum (P_{max}) dan efisiensi (η) dari DSSC dengan menggunakan persamaan (1-3) [2,6-10].

$$FF(\%) = \left(\frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \right) \times 100 \tag{1}$$

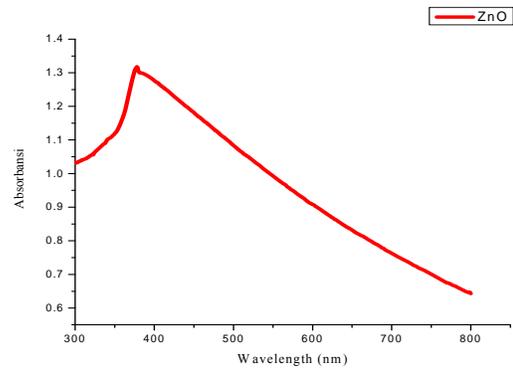
$$P_{max} = FF \times V_{oc} \times I_{sc} \tag{2}$$

$$\eta(\%) = \left(\frac{P_{max}}{P_{light}} \right) \times 100 \tag{3}$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakterisasi ZnO

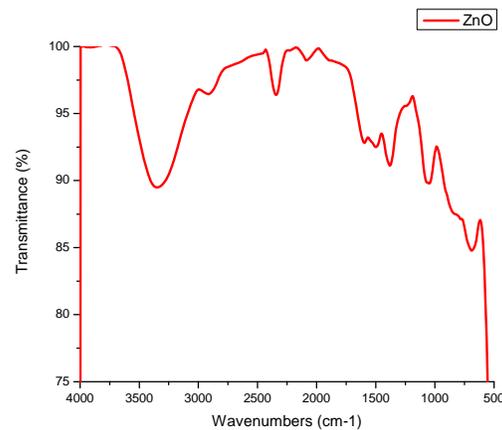
Karakterisasi ZnO secara berturut-turut dilakukan berupa karakterisasi UV-Vis, FT-IR, TGA-DSC, XRD dan SEM.



Gambar. 1. Hasil Karakterisasi UV-Vis

Gambar 1 menunjukkan bahwa tingkat kemampuan penyerapan cahaya pada nanopartikel ZnO berada pada puncak tertinggi grafik yaitu sebesar 1,318 dengan panjang gelombang (λ) sebesar 378 nm. Selain itu, puncak tersebut menunjukkan bahwa besar dari energi *band gap* nanopartikel ZnO adalah ~ 3,29 eV. [2-4] Hal ini bersesuaian dengan penelitian sebelumnya [4], ZnO hasil sintesis dari ZnAc memiliki besar energi band gap sebesar 3,2 eV.

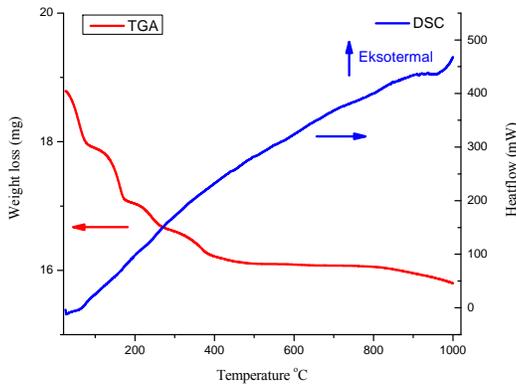
Spektrum inframerah dari serbuk ZnO diperlihatkan pada gambar 2.



Gambar. 2. Spektrum FT-IR Nanopartikel ZnO

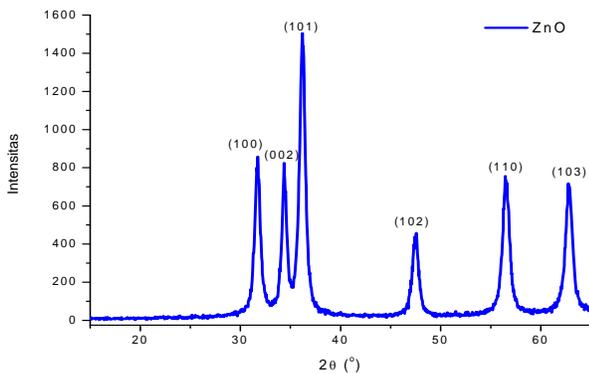
Transmitansi pada 689,97 cm⁻¹ menunjukkan ikatan Zn-O dan transmitansi pada rentang 1380-3425 cm⁻¹ merupakan ikatan yang berasal dari sisa pelarutan *Zinc Acetat* (dengan bahan pelarut DEG) yang terdapat pada serbuk ZnO [11]. Pada rentang 3200-3600 cm⁻¹ menunjukkan ikatan intermolekul hidrogen (O-H) yang berarti terdapat gugus hidroksil dari penyerapan molekul air ketika proses sintesis dilakukan. Pada rentang 1379 dan 1511, terdapat ikatan C-O dan C=O yang berasal dari senyawa asetat. Pada rentang 700-1100 cm⁻¹ berkaitan dengan pergerakan kisi dari CO₃²⁻ [13,14].

Pada kurva TGA (gambar 3), nanopartikel ZnO mengalami penurunan berat sebanyak empat kali pada temperatur 65 °C, 163°C, 241°C dan 367°C. Penurunan berat pertama berada pada rentang temperatur di bawah 100°C.



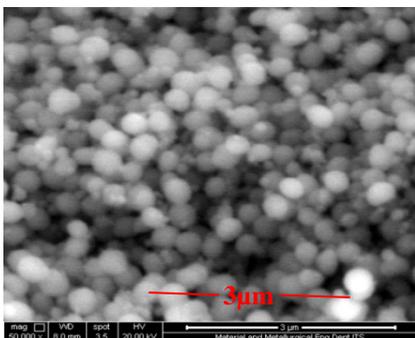
Gambar. 3. Kurva DSC-TGA dari Serbuk ZnO

Penurunan ini diakibatkan terjadinya proses pelepasan molekul air yang terdapat pada permukaan partikel ZnO. Penurunan berat kedua terjadi pada rentang temperatur 100°C hingga 400°C yang disebabkan oleh proses difusi keluar dari gugus hidroksida (OH) dan material organik yang terdapat di dalam permukaan partikel ZnO [12-15]. Kristalisasi ZnO mengalami proses pengintian ketika temperatur 400°C [12,13]. Ukuran kristal ZnO dapat diketahui dengan melakukan karakterisasi XRD pada serbuk ZnO.



Gambar. 4. XRD pada Material ZnO

Serbuk ZnO berbentuk kristal dengan struktur kristal yang sesuai dengan struktur heksagonal wurtzite (JCPDS 36-1451). Dimensi kisi kristal diketahui bahwa nilai $a=b= 3.249\text{Å}$ dan $c = 5.213\text{Å}$ dan ukuran partikel ZnO sebesar 13,93 nm.

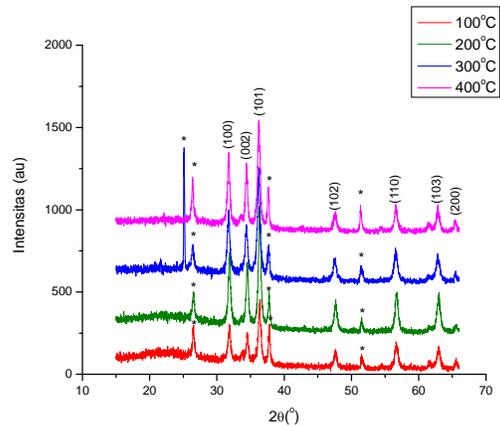


Gambar. 5. SEM Hasil Sintesis Material ZnO dengan Rentang 3μm

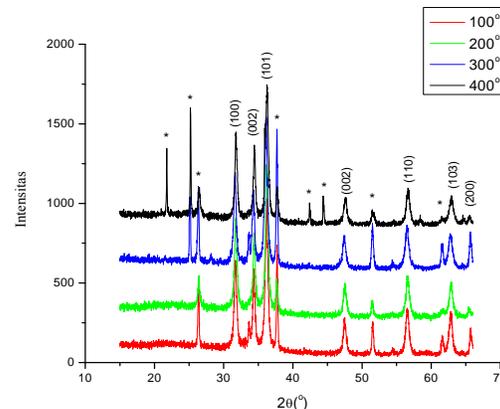
Morfologi serbuk ZnO diperlihatkan oleh Gambar 5, yang menunjukkan serbuk ZnO. Nanopartikel ZnO membentuk agregat *spherical* (bola) dengan membentuk diameter agregat sebesar ~300 nm. Nilai PDI dari hasil karakterisasi SEM menunjukkan nilai sebesar 0.02. Nilai PDI tersebut menunjukkan bahwa agregat pada serbuk ZnO merupakan partikel yang seragam (*monodisperse*) [16].

B. Karakterisasi Fotoelektroda ZnO

Karakterisasi fotoelektroda ZnO dilakukan dengan menggunakan karakterisasi XRD. Setelah melalui proses anil, karakterisasi fotoelektroda ZnO ditunjukkan oleh gambar 6.



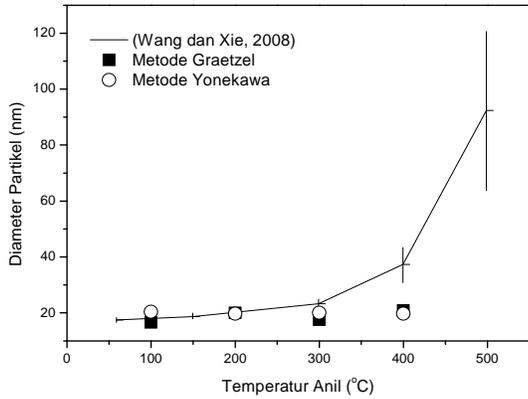
(a)



(b)

Gambar. 6. Hasil XRD fotoelektroda ZnO berbasis (a) metode Grätzel dan (b) metode Yonekawa dengan Variasi Pemanasan 100°C hingga 400°C.

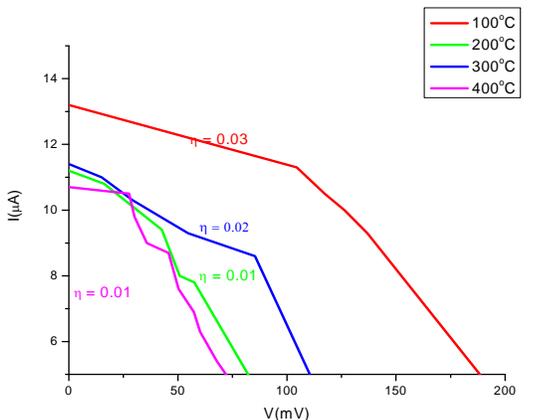
Gambar 6 menunjukkan, tidak terjadi pergeseran kurva akibat pemberian temperatur anil pada fotoelektroda ZnO. Oleh karena itu, perubahan ukuran partikel dari pasta ZnO tidak mengalami perubahan yang signifikan akibat temperatur anil. Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya [17] menyebutkan bahwa pada temperatur anil dibawah 400°C (sesuai Gambar 7) tidak terjadi perubahan signifikan terhadap ukuran partikel. Kristalisasi ZnO dapat diperlihatkan ketika terjadi proses pengintian ketika temperatur lebih besar dari 400°C [12,13].



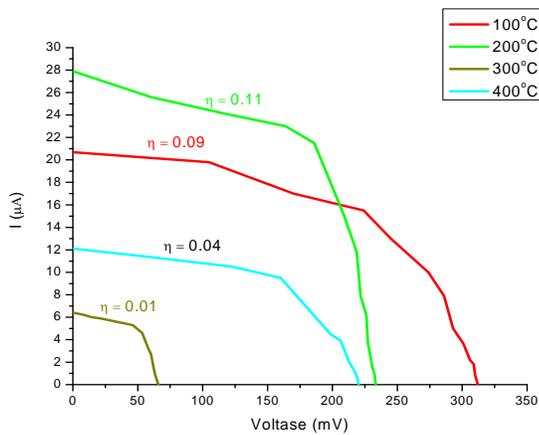
Gambar. 7. Perbandingan rata-rata diameter partikel dari sampel hasil pemanasan dengan temperatur anil pada Metode Grätzel, Metode Yonekawa dan Wang Xie

C. Karakteristik Arus-Tegangan (I-V) DSSC

Performansi DSSC ditunjukkan dengan kurva I-V. Dimana pada kurva I-V dapat diperoleh besar dari fill factor (FF), daya keluaran maksimum (P_{max}) dan efisiensi (η).



(a)



(b)

Gambar 8. Plot Kurva I-V DSSC pada (a) Metode Grätzel dan (b) Metode Yonekawa dengan Menggunakan Pewarna Kulit Manggis pada Sinar Matahari

Pada Gambar 8(a) menunjukkan pengaruh temperatur *annealing* terhadap arus, tegangan dan efisiensi. Pada temperatur 100°C diperlihatkan nilai dari arus dan tegangan yang cukup besar dibandingkan dengan temperatur 200°C – 400°C. Pada temperatur anil 100°C, ukuran partikel yang diperoleh merupakan ukuran yang terkecil dibandingkan temperatur 200°C hingga 400°C. Hal ini menyebabkan luas permukaan dari material ZnO menjadi lebih besar sehingga penyerapan pewarna semakin banyak [8,9,18]. Akibatnya efisiensi dan arus yang dihasilkan, memiliki nilai yang lebih tinggi. Berbeda dengan Gambar 8(a), Gambar 8(b) menunjukkan nilai efisiensi dan arus terbesar terjadi pada temperatur 200°C dikarenakan ukuran partikelnya lebih kecil. Hal ini juga berseuaian dengan hasil penelitian sebelumnya [9], dimana ukuran dari material ZnO berpengaruh terhadap kemampuan penyerapan dye. Peningkatan kemampuan penyerapan pewarna dipengaruhi oleh luas permukaan dari material tersebut. Peningkatan kemampuan penyerapan ini, akan mempengaruhi kemampuan pewarna untuk meningkatkan besar efisiensi cahaya yang diserap [10].

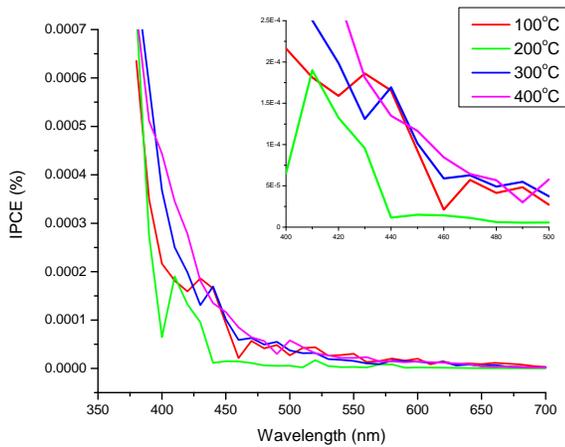
Dari kedua metode yang telah dilakukan, terlihat perbedaan hasil yang diperoleh dari metode Grätzel dan metode Yonekawa. Pada metode Grätzel efisiensi terbaik terletak pada temperatur 100°C, sedangkan pada metode Yonekawa efisiensi meningkat pada temperatur 200°C. Kesamaan kedua metode tersebut adalah adanya air sebagai komposisi pembuatan pasta ZnO. Pada metode Grätzel air yang ditambahkan sebesar 0.7 ml, sedangkan metode yonekawa memasukkan 0.3 ml air untuk pembuatan pasta. Dengan menggunakan metode Grätzel sebagai pembuatan pasta, terjadi penggumpalan ketika pasta telah dibuat. Berbeda dengan metode Yonekawa, hasil pasta terlihat homogen. Hal ini diakibatkan adanya peristiwa Aglomerasi. Salah satu faktor terjadinya aglomerasi adalah adanya peristiwa *sintering* (proses termal). Dengan meningkatnya temperatur, mengakibatkan ukuran partikel mengalami perubahan meskipun tidak signifikan. Hal ini juga dapat berakibat kepada kondisi agregat.

Pada kedua metode tersebut, terdapat pula nilai FF (*Fill Factor*) yang mengalami perubahan sesuai dikarenakan pemberian variasi temperatur anil. Semakin besar harga FF, maka kerja dari DSSC semakin baik dan akan memiliki efisiensi yang semakin tinggi [19]. Berdasarkan penelitian sebelumnya, nilai FF berpengaruh pada nilai hambatan internal dari FTO/ZnO, elektrolit dan kaca TCO [8,9]. Pada penelitian ini, elektrolit tidak mempengaruhi nilai FF dikarenakan elektrolit yang digunakan pada fabrikasi DSSC sama. Namun, pemberian temperatur anil, meningkatkan besar resistansi yang dimiliki oleh kaca FTO. Hal ini dikarenakan selama proses *annealing*, energi panas digunakan untuk meningkatkan perpindahan massa atom oksigen antara substrat FTO dan layer ZnO [8].

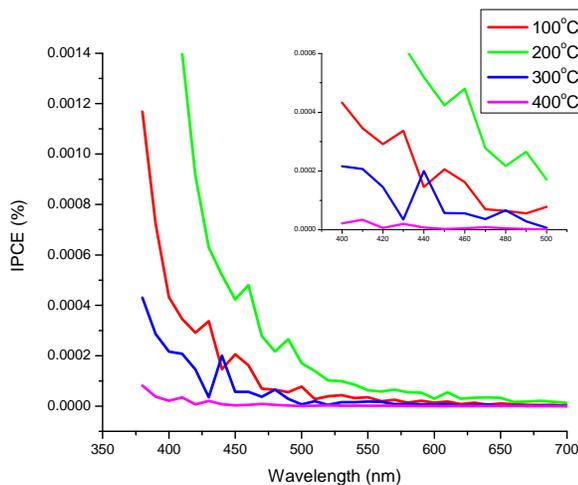
D. Spektrum Incident Photon to Current Efficiency (IPCE) dari DSSC

Spektrum IPCE dari fotoelektroda ZnO tersensitasi dengan

menggunakan pewarna kulit manggis dengan variasi pemanasan anil ditampilkan pada cahaya tampak di Gambar 9(a).



(a)



(b)

Gambar. 9. Kurva IPCE dari DSSC struktur sandwich berbasis Nanopartikel ZnO dengan (a) metode Grätzel dan (b) metode Yonekawa dan variasi temperatur anil

Bentuk kurva dari penyerapan dan spectra IPCE dari pewarna kulit manggis hampir sama. Hanya terjadi perbedaan pada panjang gelombang dimana terjadi pergeseran akibat adanya perlakuan temperatur pada fotoelektroda ZnO. Pada kurva absorbansi pewarna kulit manggis puncak terletak pada 390 nm dan setelah pewarna dilapiskan pada lapisan fotoelektroda ZnO, puncak tersebut bergeser sesuai pertambahan temperatur. Hal ini menunjukkan terjadi proses transisi energi pada perpindahan elektron dari pewarna ke permukaan ZnO [18]. Nilai IPCE pada masing-masing temperatur ialah 0,00018 (100°C), 0,00021 (200°C), 0,00017 (300°C) dan 0,00014 (400°C).

Pada kurva IPCE dengan menggunakan metode Yonekawa, juga terjadi hal serupa seperti gambar 9(b) Gambar 9(b) menunjukkan IPCE untuk DSSC berbasis fotoelektroda ZnO dengan pemanasan anil yang berbeda. Nilai masing-masing

IPCE pada berbagai temperatur ialah 0,00038 (100°C), 0,00049 (200°C), 0,0002 (300°C) dan 0,00008 (400°C). Perbedaan mendasar dari kedua kurva IPCE dengan metode Yonekawa dan metode Grätzel adalah dari intensitas penyerapan dari puncak gelombang yang dihasilkan dan terjadinya perluasan peningkatan penyerapan pada rentang gelombang tertentu. Nilai IPCE terbaik diperlihatkan pada Gambar 4.12. Menurunnya puncak gelombang diakibatkan berkurangnya kemampuan penyerapan pewarna akibat interaksi antara permukaan ZnO dan pewarna [18].

Tabel 1.
Performansi DSSC berdasarkan Metode Preparasi Pasta dan Temperatur Annealing

Metode	Temp. Anil (°C)	V _{oc} (mV)	J _{sc} (μA/cm ²)	V _{max} (mV)	J _{max} (μA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Grätzel	100	284	52.8	136.9	37.2	33,96	0.03
	200	149	44.8	57.6	31.2	26,92	0.01
	300	151.8	45.6	85.4	34.4	42,44	0.02
	400	105.8	42.8	57.31	27.6	34,93	0.01
Yonekawa	100	312	82.8	245	52	49,32	0.09
	200	233.4	111.6	186	86	61,41	0.11
	300	65.9	25.6	53.3	18.4	58,13	0.01
	400	220.2	48.4	160.2	38	57,12	0.04

Secara keseluruhan, performansi dari DSSC berbasis nanopartikel ZnO diperlihatkan dengan Tabel 1 dengan variasi metode yang dilakukan Grätzel dan Yonekawa dengan karakteristik performansi DSSC yang dihasilkan.

IV. KESIMPULAN

Nanopartikel ZnO yang merupakan hasil sintesis Zink Asetat dengan DEG memiliki ukuran partikel sebesar 13,93 nm dengan diameter agregat monodisperse ~300 nm dan memiliki energi band gap sebesar 3,29 eV, pemberian temperatur anil sampai temperatur 400°C tidak memberikan pengaruh yang signifikan pada ukuran partikel pasta ZnO, dan performansi terbaik dihasilkan pada preparasi pasta dengan menggunakan metode Yonekawa dan pada temperatur 200°C yaitu efisiensi sebesar 0,11%, Voc 233,4 mV, Jsc 111,6 μA/cm² dan FF 61,41%..

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anonim. "Hingga 2030 Permintaan Energi Dunia Meningkat". website : www.esdm.go.id (diakses tanggal 17 Februari 2013)
- [2] Qifeng Zhang, Christopher S. Dandeneau, Xiaoyuan Zhou, and Guozhong Cao. ZnO Nanostructures for Dye-Sensitized Solar Cells. Adv. Mater. 2009, 21, 4087-4108
- [3] T.P.Chou, Qifeng Zhang, G.E.Fryxell, G.Chao. Hierarchically Structured ZnO Film for Dye-Sensitized Solar Cells with Enhanced Energy Conversion Efficiency. Adv.Mater.2007, 19, 2588-2592.
- [4] A.P. Uthirakumar. 2011. Fabrication of ZnO Based Dye Sensitized Solar Cells, Solar Cells - Dye-Sensitized Devices, Prof. Leonid A. Kosyachenko (Ed.), ISBN: 978-953-307-735-2, InTech.
- [5] Dicky Anggoro, Mikrajuddin Abdullah. 2012. Pengantar Nanoteknologi : Aplikasi Nanokristal ZnO pada Solar Cell. Bandung : Institut Teknologi Bandung.
- [6] Grätzel, Michael, "Review Dye-sensitized solar cells," *Journal of Photochemistry and Photobiology C*, vol. 4, 2003, pp. 145 – 153.
- [7] Y. Chiba, A. Islam, Y. Watanabe, R. Komiya, N. Koide, L.Y. Han, Dye-sensitized solar cells with conversion efficiency of 11.1%, Jpn. J. Appl. Phys. 45 (2006) L638-L640.

- [8] T.Pichanan, S.Kumar, J. Dutta. Photoelectrode Optimization of Zinc Oxide Nanoparticle Based Dye-Sensitized Solar Cell by Thermal Treatment. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 7 (2012) 4988 – 4999.
- [9] Yonekawa H, 2012. Dye-Sensitized Solar Cells Fabricated with ZnO Nanoparticles for High Conversion Efficiency. Master Thesis department of Applied Chemistry and Biochemistry, Kumamoto University, Japan.
- [10] Rodriguez E.G. 2011. Photoelectrochemical Characterization of Dye Solar Cells Based on Nanostructured Zinc Oxide Substrates. Departement of Physical, Chemical and Natural Systems, University Pablo de Olavide. Sevilla.
- [11] Azadeh A. Sonochemically Assisted Synthesis of ZnO Nanoparticles : A Novel Direct Method. *Iran.J.Chem.Chem.Eng Vol30, No.3*, 2011.
- [12] K.G.Chandruppa etc. A hybrid electrochemical-thermal method for the preparation of large ZnO nanoparticles. *J Nanopart Res* (2010) 12:2667-2678
- [13] Lee J., Ko K., Park B. Electrical and Optical Properties of ZnO Transparent Conducting Films by the Sol-gel Method. *Journal of Crystal Growth* 247 (2003) 119-125.
- [14] Li M, Hari-Bala, Lv X, Ma X, Sun F, Tang L, Wang Z. Direct synthesis of monodispersed ZnO nanoparticles in an aqueous solution. *Material Letters* 61 (2007) 690-693
- [15] Rezende, C.P., Silva J.B., Mohallem N.D.S. Influence of drying on the characterization of Zinc Oxide nanoparticles. *Brazilian J.Phys* 39 1A (2009) 248-251
- [16] Ruri A.W., Doty D.R., Hirotaka I. 2013. Dye-sensitized Solar Cells (DSSC) Fabrication with TiO₂ and ZnO Nanoparticle for High Conversion Efficiency. Thesis, Engineering Physics, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- [17] Wang H, Xie C. Effect of Annealing Temperature on the Microstructures and Photocatalytic Property of Colloidal ZnO nanoparticles. *J Physics and Chemistry of Solids* 69 (2008) 2440-2444.
- [18] Lanlan Lu, Renjie Li, Ke Fan, Tianyou Peng. Effect of annealing conditions on the photoelectrochemical properties of dye-sensitized solar cells made with ZnO nanoparticles. *Solar Energy* 84 (2010) 844-853.
- [19] Alexis De Vos. The Fill Factor of Solar Cell from a Mathematical Point of View. *Solar Cell*, 8 (1983), pp.283-296.