



SINTESIS LAPIS TIPIS SENG OKSIDA (ZnO) NANORODS

SEBAGAI FOTOANODA SEL SURYA TERSENSITASI ZAT WARNA

Febri Mandhurul Labib*), Harjito, dan Subiyanto Hadi Saputro

Jurusan Kimia FMIPA Universitas Negeri Semarang

Gedung D6 Kampus Sekaran Gunungpati Telp. (024)8508112 Semarang 50229

Info Artikel

Sejarah Artikel:
Diterima Maret 2012
Disetujui April 2012
Dipublikasikan Mei 2012

Kata kunci:
CBD
lapis tipis
nanorods
sel surya
seng oksida

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis lapis tipis seng oksida (ZnO) nanorods dengan metode chemical bath deposition sebagai fotoanoda sel surya tersensitasi zat warna. Kristal ZnO nanorods ditumbuhkan di atas substrat ITO:PET yang telah dilapisi ZnO nanoparticles sebagai seed layer. Data analisis XRD menunjukkan bahwa lapis tipis ZnO nanorods yang tumbuh di atas substrat merupakan polikristal dengan struktur wurtzite. Posisi puncak-puncak difraksi sinar-X ZnO nanorods sesuai dengan data JCPDS ZnO No. 75-1526. Kristalinitas sampel ZnO semakin meningkat dengan bertambahnya temperatur dan waktu deposisi. Nilai energi gap tidak mengalami perubahan yang signifikan oleh adanya perubahan temperatur dan waktu deposisi. Berdasarkan hasil pemindaian SEM, diketahui bahwa diameter kristal ZnO nanorods berkisar antara 80-120 nm dan ketebalan lapis tipis sekitar 300 nm dengan aspect ratio ~ 4. Sel surya disusun menggunakan fotoanoda lapis tipis ZnO nanorods:ITO, zat warna merkurokrom sebagai pensensitasi, pasangan redoks I⁻/I₃⁻ sebagai larutan elektrolit, dan serbuk karbon: ITO sebagai katoda. Aktivitas sel surya diukur di bawah penyinaran lampu UV komersial (31 lux). Sel surya yang menggunakan fotoanoda yang disintesis dengan variasi temperatur deposisi menghasilkan daya maksimum tertinggi sebesar 3,15 $\mu\text{m}/\text{cm}^2$ dengan fill factor 60,76%, sedangkan dengan variasi waktu deposisi menghasilkan daya maksimum tertinggi sebesar 5,03 $\mu\text{m}/\text{cm}^2$ dengan fill factor 63,23%.

Abstract

This study aims to synthesize a thin layer of zinc oxide (ZnO) nanorods by chemical bath deposition method as fotoanoda tersensitasi dye solar cells. Crystalline ZnO nanorods grown on ITO substrates: PET which has been coated with ZnO nanoparticles as a seed layer. XRD analysis of data showed that a thin layer of ZnO nanorods grown on the substrate is polycrystalline with wurtzite structure. The position of peaks of X-ray diffraction data in accordance with ZnO nanorods ZnO JCPDS No.. 75-1526. ZnO sample crystallinity increases with increasing temperature and deposition time. Gap energy value did not change significantly by changes in temperature and deposition time. Based on the results of SEM scanning, it is known that crystalline ZnO nanorods diameter ranging between 80-120 nm and thickness of thin layers of about 300 nm with aspect ratio ~ 4. Solar cells were prepared using a thin layer of ZnO nanorods fotoanoda: ITO, Mercurochrome as pensensitasi dyes, redox couples I⁻/I₃⁻ as an electrolyte solution, and carbon powder: ITO as the cathode. Solar-cell activity was measured under UV light irradiation of commercial (31 lux). Solar cells using a synthesized fotoanoda with deposition temperature variation produces a maximum power of 3.15 $\mu\text{m}/\text{cm}^2$ highest with 60.76% fill factor, while the variation of deposition time produced the highest maximum power of 5.03 $\mu\text{m}/\text{cm}^2$ to fill factor 63.23%.

© 2012 Universitas Negeri Semarang

Pendahuluan

Bahan bakar fosil merupakan pemasok utama kebutuhan energi dunia pada saat ini. Namun, kebutuhan energi yang selalu meningkat tiap tahunnya menyebabkan bahan bakar fosil dieksplorasi secara berlebihan sehingga cadangannya di alam semakin menipis (Amin, 2008). Diperkirakan pada tahun 2100, bahan bakar fosil tidak mampu lagi memenuhi kebutuhan energi yang mencapai 46 terrawatt. Selain itu, bahan bakar fosil dianggap tidak ramah lingkungan karena dapat menghasilkan gas buang CO₂ yang merupakan salah satu penyebab pemanasan global (Izrael, 1990). Kedua alasan tersebut mendorong para peneliti untuk segera menemukan sumber energi alternatif yang terbaharui dan ramah lingkungan.

Sel surya merupakan salah satu energi alternatif yang sangat potensial untuk dikembangkan. Sel surya merupakan sumber energi yang ramah lingkungan karena dapat mengubah sumber energi matahari menjadi energi listrik secara langsung tanpa mengemisikan gas buang, dan ketersediaan sinar matahari di seluruh belahan bumi melimpah. Akan tetapi, perkembangan sel surya lambat karena sel surya yang tersedia di pasaran didominasi oleh sel surya silikon yang bahan baku dan biaya fabrikasinya tinggi. Saat ini ilmuwan telah mengembangkan sel surya tersensitasi zat warna (dye sensitized solar cell; DSSC) yang biaya fabrikasinya jauh lebih rendah, tetapi efisiensi maksimum yang mampu dihasilkannya hanya mencapai 11,1% (Grätzel, 2003). Rendahnya efisiensi DSSC disebabkan karena rendahnya kemampuan fotoanoda untuk mengabsorpsi foton dan rendahnya laju pergerakan elektron sehingga elektron rentan mengalami rekombinasi prematur sebelum mencapai anoda (Nakamura, 2006). Kedua masalah tersebut dapat diatasi dengan mengubah morfologi semikonduktor yang digunakan sebagai fotoanoda menjadi morfologi satu dimensi.

Lapis tipis seng oksida (ZnO) nanorods merupakan salah satu semikonduktor satu dimensi yang sangat sesuai diaplikasikan sebagai fotoanoda DSSC. ZnO memiliki rentang energi gap yang lebar, bahan bakunya yang melimpah di alam, harganya yang terjangkau dan sifatnya yang relatif tidak beracun. ZnO nanorods dapat disintesis dengan mudah, murah, dan ramah lingkungan melalui metode sederhana seperti chemical bath

deposition (CBD) (Khallaf et al., 2009). Melalui metode tersebut, beberapa parameter fisik semikonduktor ZnO yang berpengaruh terhadap besarnya efisiensi sel surya seperti tingkat kristalinitas, energi gap, dan morfologi dapat dikontrol dengan mudah hanya dengan mengatur temperatur dan waktu deposisi (Boercker, 2010). Berdasarkan beberapa alasan tersebut, maka penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperatur dan waktu deposisi terhadap tingkat kristalinitas, energi gap, dan morfologi kristal lapis tipis ZnO nanorods yang disintesis dengan metode CBD pada temperatur dan tekanan rendah, serta untuk mengetahui besarnya daya maksimum dan fill factor yang mampu dihasilkan oleh DSSC yang menggunakan fotoanoda lapis tipis ZnO nanorods.

Metode Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah deposition bath, ultrasonic cleaner bath (Cody CD-1800), oven listrik (Memmert), hot plate magnetic stirer (Cimarex 2), neraca analitik (Ohaus), termometer, pH meter (Eutech Cyberscan pH 10), seperangkat alat gelas (Pyrex), XRD (Shimadzu 6000), SEM-EDX (Jeol 6360 LA), DR-UV spectrophotometer (Shimadzu UV 1700 Pharmaspec UV-Vis), lampu UV 11 watt; 31 lux (Goldstar), multimeter (Heles UX 839TR), hambatan geser 20 kV, dan ruang gelap. Sedangkan bahan yang digunakan adalah substrat ITO:PET 60Ω/sq (Aldrich), seng asetat dihidrat, isopropanol, seng nitrat heksahidrat, heksametilen tetramin/ HMTA, merkurokrom, serbuk karbon 100 mesh, poly vinil alkohol/ PVA, asam nitrat, kalium iodida, iodin, etilen glikol buatan Merck, etanol teknis, monoetanol amin dan akuades.

Sintesis ZnO nanorods diawali dengan pembersihan substrat ITO dan pelapisan seed layer ZnO nanoparticles. Substrat ITO dicuci dengan akuades dan dilanjutkan dengan etanol dan disonikasi selama 15 menit. Pelapisan seed layer dilakukan dengan mengacu pada penelitian Habibi dan Sardashti (2010). Larutan seng asetat dihidrat 0,01 M direfluks pada temperatur 60°C selama 30 menit dan ditambahkan tetes demi tetes larutan monoetanol amin dengan perbandingan molar yang sama. Larutan yang terbentuk kemudian disonikasi selama 30 menit dan di-aging selama 24 jam hingga dihasilkan sol yang homogen dan tak berwarna. Sol dilapiskan ke permukaan ITO dengan metode dip coating. Pelapisan diulangi

hingga lima kali sehingga dihasilkan lapisan ZnO yang homogen. Seed layer ZnO nanoparticles dianalisis menggunakan Scanning Electron Microscope-Electron Dispersive Spectroscopy (SEM-EDX).

Sintesis lapis tipis ZnO nanorods dilakukan dengan mengacu pada metode Yang (2010). Lapis tipis ZnO nanorods ditumbuhkan di atas substrat ITO yang telah terlapisi seed layer ZnO nanoparticles dengan variasi temperatur dan waktu deposisi. Larutan seng nitrat heksahidrat dan larutan heksametilen tetramin (HMTA) dengan konsentrasi masing-masing 0,1 M dicampurkan sambil diaduk. pH larutan diatur menjadi 6,00 dengan penambahan asam nitrat 0,01 M. Larutan dipanaskan hingga temperatur 70°C. Substrat ITO yang telah dipreparasi kemudian dimasukkan ke dalam larutan dengan variasi temperatur deposisi 50°C, 60°C, dan 70°C selama 2 jam. Sedangkan pertumbuhan ZnO nanorods dengan variasi waktu deposisi dilakukan dengan metode yang sama, perbedaannya waktu deposisi yang digunakan adalah 3 jam, 4 jam, dan 5 jam pada temperatur 70°C. Lapis tipis ZnO nanorods yang dihasilkan dianalisis menggunakan X-ray Diffractometer (XRD), Diffuse-Reflectance Ultra Violet Spectroscopy (DR-UV), dan SEM.

Karakterisasi XRD dilakukan terhadap sampel lapis tipis ZnO nanorods. Sampel dipindai mulai dari 2θ 10-80° dengan resolusi sebesar 0,02°. Logam tembaga (Cu) digunakan sebagai logam target sinar-X. Karakterisasi DR-UV dilakukan pada temperatur 29°C dengan panjang gelombang 200-800 nm.

Karakterisasi SEM-EDX dilakukan pada sampel ZnO nanoparticles, sedangkan karakterisasi SEM lapis tipis ZnO nanorods hanya dilakukan untuk sampel yang memiliki intensitas difraksi sinar-X tertinggi pada variasi temperatur dan waktu deposisi. Seed layer ZnO nanoparticles dikarakterisasi menggunakan SEM-EDX pada temperatur 20°C, dengan perbesaran 1000X menggunakan tegangan 15 kV dan tekanan 30 Pa. Lapis tipis ZnO nanorods dipindai dengan kondisi operasi alat SEM yang hampir sama. Akan tetapi tegangan yang digunakan adalah 20 kV, perbesaran 60.000X. Selain itu sampel ZnO nanorods dipindai bagian penampang sampingnya untuk mengetahui ketebalan lapis tipis yang dihasilkan.

Penyusunan dan uji kinerja DSSC

dilakukan dengan mengacu pada penelitian Kurniawan, et al (2009). DSSC disusun dengan menggunakan fotoanoda berupa lapis ZnO nanorods. Fotoanoda direndam dalam larutan merkurokrom dalam etanol 2×10^{-4} M selama 24 jam dan dikeringkan pada temperatur ruangan. Sedangkan katoda disiapkan dengan cara melapiskan serbuk karbon di atas lapisan ITO. Larutan PVA 2,5% digunakan untuk merekatkan serbuk karbon pada substrat ITO. Larutan elektrolit yang digunakan adalah pasangan redoks I^-/I_3^- yang dibuat dari campuran larutan KI 0,5 M dan I_2 0,05 M dalam pelarut etilen glikol 70%.

Uji kinerja DSSC dilakukan dengan mengukur perubahan nilai tegangan dan arus yang dihasilkan oleh sel surya terhadap variasi nilai hambatan. Pengukuran dilakukan di bawah penyinaran lampu UV 31 lux. Posisi lampu diatur horisontal terhadap DSSC dengan jarak terdekat antara lampu terhadap DSSC adalah 10 cm.

Hasil dan Pembahasan

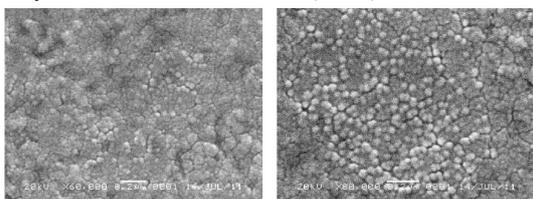
Proses sintesis ZnO nanorods harus diawali dengan proses pendahuluan berupa pembersihan substrat dan pelapisan seed layer ZnO nanoparticles. Pembersihan substrat bertujuan untuk menghilangkan senyawa pengotor organik yang kemungkinan terdapat di atas permukaan ITO. Adanya pengotor tersebut dapat mengganggu proses nukleasi kristal ZnO. Pelapisan seed layer berguna untuk mengatur arah pertumbuhan kristal ZnO nanorods, densitas, dan diameter kristal. ZnO nanoparticles disintesis dengan metode sol gel-dip coating. Prekursor yang digunakan adalah senyawa seng asetat dan monoetanol amin (MEA) dengan pelarut isopropanol. Pelarut tersebut digunakan agar proses hidrolisis seng asetat terjadi secara perlahan. Proses hidrolisis terjadi karena adanya molekul-molekul air yang berasal dari larutan MEA, maupun dari air yang terkandung dalam isopropanol dan yang terikat pada kristal $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$. Proses hidrolisis seng asetat dalam isopropanol akan sangat lambat karena tingkat kelarutan seng asetat yang rendah. Penambahan MEA akan membantu proses pelarutan garam tersebut dengan cara membentuk senyawa kompleks $[Zn(NH_2C_2H_4OH)]^{2+}$. Selain itu, MEA juga mampu mendorong pembentukan inti kristal ZnO karena dapat menghasilkan ion amonia yang menyebabkan kenaikan pH larutan. Hasil pemindaian SEM menunjukkan bahwa ZnO nanoparticles memiliki morfologi spheric

dengan ukuran partikel rata-rata sebesar 39,329 nm. Kristal ZnO nanopartikel telah mampu melapisi sebagian besar permukaan ITO. Spektra EDX menunjukkan bahwa persentase senyawa ZnO mencapai 60,93% seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi unsur dan senyawa sampel ZnO nanoparticles

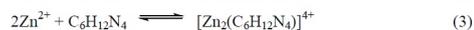
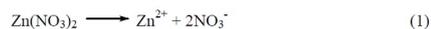
Unsur	% massa	Senyawa	% massa
C	4,05	C	4,05
O	18,41	ZnO	60,93
Zn	48,95	Im ₂ O ₃	25,57
In	21,15	SnO ₂	9,45
Sn	7,44	-	-
Total	100,00	Total	100,00

Hasil pemindaian SEM sampel ZnO nanoparticles tertera pada Gambar 1. Berdasarkan Gambar 1 tersebut diketahui bahwa kristal ZnO yang dihasilkan dari proses sol gel memiliki ukuran yang homogen dan berskala nano. Selama proses sol gel, prekursor akan bereaksi hingga menghasilkan polimer matrik seng aseto asetat $[ZnO_{1-x}(CH_3COO)_x]$. Terbentuknya polimer tersebut dapat mencegah terjadinya aglomerasi karena adanya tolakan sterik di sepanjang rantai sehingga ukuran partikel tetap terkontrol seperti yang telah dinyatakan oleh Noorhana (2011).



Gambar 1. Hasil pemindaian SEM seed layer ZnO nanoparticles dengan perbesaran 60.000X (a) dan perbesaran 80.000X (b)

ZnO nanorods disintesis dengan menggunakan prekursor seng nitrat dan HMTA. Kristal ZnO terbentuk dari proses hidrolisis senyawa seng asetat oleh molekul-molekul air. Unit sel ZnO yang berbentuk heksagonal akan menyebabkan partikel ZnO cenderung berbentuk batang dengan penampang berbentuk segi enam apabila reaksi hidrolisis berjalan secara lambat dan terkendali. Senyawa HMTA mampu membentuk ikatan kovalen koordinasi dengan ion Zn^{2+} sehingga dihasilkan kompleks $[Zn(C_6H_{12}N_4)]^{2+}$ atau $[Zn_2(C_6H_{12}N_4)]^{4+}$. Terbentuknya kompleks tersebut menyebabkan jumlah spesi seng yang ada di dalam larutan sangat terbatas sehingga reaksi dapat berlangsung secara perlahan dan terkendali. Reaksi pembentukan ZnO dari kedua prekursor tersebut dapat ditulis seperti pada Persamaan (1) hingga Persamaan (5).



Pada penelitian ini terdapat 2 variasi pertumbuhan ZnO nanorods yaitu variasi temperatur deposisi dan waktu deposisi. Tiap-tiap sampel diberikan kode untuk mempermudah penulisan dan penyebutan selanjutnya seperti yang ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Daftar kode untuk tiap-tiap sampel lapis tipis ZnO nanorods

Variasi	Kondisi Penumbuhan Kristal	Kode Sampel
Variasi temperatur deposisi	Temperatur 50 °C; waktu 2 jam	ZnO_A
	Temperatur 60 °C; waktu 2 jam	ZnO_B
	Temperatur 70 °C; waktu 2 jam	ZnO_C
Variasi waktu deposisi	Temperatur 70 °C; waktu 3 jam	ZnO_1
	Temperatur 70 °C; waktu 4 jam	ZnO_2
	Temperatur 70 °C; waktu 5 jam	ZnO_3

Difraktogram sampel lapis tipis ZnO nanorods yang dihasilkan sesuai dengan JCPDS No. 75-1526. Data hasil karakterisasi XRD ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Data analisis ukuran kristalit sampel lapis tipis ZnO nanorods

Sampel	2θ (°)	Indeks Miller	FWHM (°)	Ukuran kristalit (nm)	Intensitas (a.u.)
ZnO_A	31,8064	100	0,0138	10,4583	90,5542
	34,2823	002	0,0061	23,8618	110,4127
	36,3770	101	0,0071	20,6525	442,4571
	Ukuran kristalit rata-rata			18,3242	
ZnO_B	31,9659	100	1,3728	12,0392	107,5687
	34,3525	002	0,7667	21,6896	238,6802
	36,4306	101	0,9514	17,5810	512,9309
	Ukuran kristalit rata-rata			17,1033	
ZnO_C	32,0466	100	0,9211	17,9472	266,6137
	34,3782	002	0,7509	22,1498	192,0275
	36,4518	101	0,7055	23,7122	692,9949
Ukuran kristalit rata-rata			21,2698		
ZnO_1	32,0673	100	0,9054	18,2592	479,7786
	34,3989	002	0,6956	23,9101	336,7368
	36,4718	101	0,6944	24,0913	831,6446
	Ukuran kristalit rata-rata			22,0869	
ZnO_2	32,0920	100	1,1872	13,9258	528,5136
	34,4353	002	0,7545	22,0458	386,7501
	36,5276	101	0,7805	21,4382	1001,3158
	Ukuran kristalit rata-rata			19,1366	
ZnO_3	32,1267	100	0,9032	18,3056	623,7237
	34,4586	002	0,6871	24,2116	452,8241
	36,5319	101	0,6976	23,9843	1094,3166
	Ukuran kristalit rata-rata			22,1671	

Berdasarkan data XRD tersebut diketahui bahwa kristal ZnO nanorods yang ditumbuhkan di atas substrat ITO merupakan polikristal yang didominasi oleh arah pertumbuhan sejajar sumbu (101). Peningkatan temperatur dan waktu deposisi menyebabkan peningkatan kristalinitas sampel. Kenaikan temperatur menyebabkan atom-atom penyusun kristal lebih tertata di posisi yang tepat. Sedangkan kenaikan waktu deposisi menyebabkan jumlah kristalit yang terdeposisi di atas permukaan kristal semakin banyak. Kedua kondisi tersebut menyebabkan sampel mampu mendifraksikan sinar-X secara konvergen sehingga intensitas difraksinya semakin meningkat. Peningkatan

temperatur dan waktu deposisi juga menyebabkan posisi puncak difraksi utama semakin bergeser ke kanan, dan semakin mendekati posisi puncak pada data JCPDS. Akan tetapi, pergeseran ini tidak mengakibatkan terjadinya perbedaan parameter kisi kristal yang signifikan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Data analisis parameter kisi kristal sampel lapis tipis ZnO nanorods

Sampel	2θ (°)	Jarak antar kisi d_{101} (Å)	$a=b$ (Å)	c (Å)
ZnO_A	36,3770	2,4678	3,2256	5,2674
ZnO_B	36,4306	2,4643	3,2207	5,2594
ZnO_C	36,4518	2,4629	3,2187	5,2561
ZnO_1	36,4718	2,4616	3,2174	5,2540
ZnO_2	36,5276	2,4579	3,2129	5,2466
ZnO_3	36,5319	2,4577	3,2123	5,2457
JCPDS ZnO	36,3770	2,4575	3,2121	5,2453

Nilai energi gap suatu semikonduktor yang digunakan sebagai fotoanoda DSSC sangat penting karena dapat mempengaruhi tegangan maksimum rangkaian terbuka (Voc), sehingga dapat pula mempengaruhi efisiensinya. Selain itu, besarnya nilai energi gap menentukan kemampuan absorpsi semikonduktor terhadap gelombang dengan panjang gelombang tertentu. Hasil analisis nilai energi gap ditunjukkan pada Tabel 5.

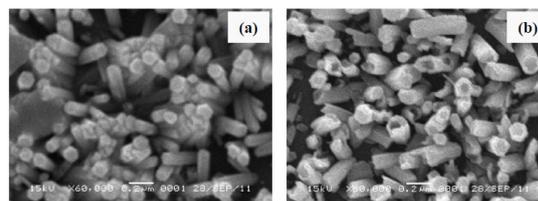
Tabel 5. Data nilai energi gap tiap-tiap sampel lapis tipis ZnO nanorods

Identitas Sampel	Energi Gap (eV)
ZnO_A	3,574
ZnO_B	3,380
ZnO_C	3,374
ZnO_1	3,355
ZnO_2	3,349
ZnO_3	3,337

Nilai energi gap cenderung tidak berubah terhadap peningkatan temperatur dan waktu deposisi. Berdasarkan data tersebut diketahui bahwa hampir seluruh sampel mempunyai energi gap sekitar 3,3 eV. Hanya sampel ZnO_A yang memiliki perbedaan cukup besar bila dibandingkan nilai energi gap standar ZnO. Sampel ZnO_A memiliki tingkat kristalinitas yang paling rendah dibandingkan sampel lainnya. Pada semikonduktor yang memiliki kristalinitas yang rendah, atom tidak tertata pada posisinya secara sempurna dan cenderung kurang teratur. Kondisi demikian akan mengakibatkan struktur pita energinya cenderung melebar karena pita-pita energi tersebut tidak terkuantisasi dengan rapat.

Sampel yang dikarakterisasi menggunakan SEM adalah sampel ZnO_C dan ZnO_1 karena keduanya merupakan sampel dengan intensitas difraksi tertinggi pada masing-masing variasi.

Hasil foto SEM ditampilkan pada Gambar 2 sedangkan data hasil pemindaian sampel menggunakan SEM tertera pada Tabel 6.

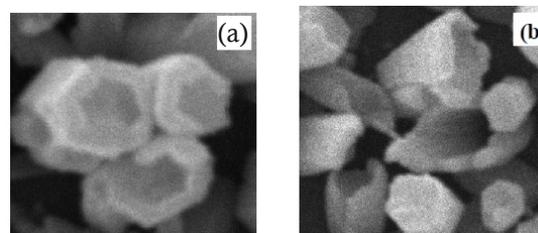


Gambar 2. Hasil pemindaian SEM sampel lapis tipis ZnO_C (a) dan lapis tipis ZnO_3 (b) dengan perbesaran 60.000X

Tabel 6. Data parameter ukuran kristal berdasarkan foto SEM

Sampel	Diameter Kristal (nm)	Ketebalan (nm)	Aspect Ratio	Densitas (Partikel/cm ³)
ZnO_C	84,354	331,896	3,935	2,592X10 ¹³
ZnO_3	87,896	390,944	4,448	1,728X10 ¹³

Berdasarkan foto SEM diketahui bahwa kristal yang tumbuh di atas substrat bermorfologi batang dengan penampang berbentuk segi enam. Kristal ZnO_C memiliki diameter rata-rata 84,354 nm dengan aspect ratio 3,935, sedangkan ZnO_3 memiliki diameter 87,896 nm dengan aspect ratio 4,448 nm. Kerapatan kristal cukup baik karena mencapai >1010 partikel/cm³. Densitas yang cukup tinggi ini sangat dipengaruhi oleh adanya lapisan seed layer ZnO nanoparticles. Kristal ZnO nanorods tumbuh dengan posisi miring atau tidak tegak lurus terhadap substrat. Hal tersebut mendukung data XRD yang menyebutkan bahwa puncak utama difraksi tidak berada pada sumbu (101) akan tetapi berada pada sumbu (101). Berdasarkan hasil pemindaian SEM ini dapat dipelajari proses pertumbuhan kristal ZnO nanorods. Pada Gambar 3 (a) ditampilkan bahwa ujung partikel ZnO nanorods memiliki bagian yang diameternya mengecil. Bagian tersebut adalah bagian dari kristal nanorods yang belum tumbuh secara sempurna.

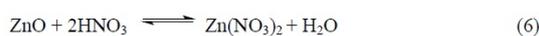


Gambar 3. Partikel ZnO nanorods yang mengalami pertumbuhan tidak sempurna pada sampel ZnO_3 (temperatur deposisi 70°C selama 5 jam) (a) dan bagian kristal yang mengalami kerusakan morfologi (b)

Kristal ZnO_3 merupakan kristal yang

ditumbuhkan pada temperatur 70°C selama 5 jam. Baruah dan Duta (2009) melaporkan bahwa pada reaksi pembentukan ZnO nanorods dengan metode CBD yang telah berlangsung selama 5 jam, keberadaan ion Zn^{2+} maupun HMTA dalam larutan sangat minim. Kondisi ini menyebabkan laju pertumbuhan akan terhambat. Apabila reaksi dihentikan akan mengakibatkan pertumbuhan kristal yang belum sempurna akibat kristal tidak dapat melakukan proses nukleasi lebih lanjut.

Pada sampel ZnO_3 juga terlihat beberapa morfologi kristal yang mengalami kerusakan seperti yang terlihat pada Gambar 3 (b). Waktu reaksi selama 5 jam merupakan waktu maksimum untuk pertumbuhan nanorods karena konsentrasi ion Zn^{2+} dan HMTA sangat kecil. Hampir seluruh ion Zn^{2+} telah bereaksi membentuk kristal ZnO sedangkan HMTA mengalami proses dekomposisi menjadi amonia dan formaldehid, dengan demikian sangat kecil kemungkinan akan terjadinya proses pertumbuhan kristal lebih lanjut. Kondisi sebaliknya terjadi pada konsentrasi ion nitrat, karena pada akhir reaksi ion nitrat berada pada konsentrasi ruahnya. Ion nitrat (NO_3^-) yang bersifat negatif akan menyerang bidang atas kristal ZnO nanorods yang bersifat polar dan cenderung bermuatan positif. Reaksi antara keduanya akan menghasilkan garam seng nitrat yang sangat larut dalam pelarut air seperti yang terlihat pada Persamaan (6).



Proses pelarutan inti kristal tersebut terjadi secara bertahap sehingga sedikit demi sedikit sehingga kristal ZnO nanorods akan mengalami pengikisan dari bagian atas kristal hingga ke posisi bawahnya dan menghasilkan kristal dengan topologi menyerupai tabung (tubular) seperti yang dilaporkan oleh Wang, et al. (2010). Aktivitas sel surya menggunakan fotoanoda yang disintesis dengan variasi temperatur deposisi ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Data aktivitas sel surya dengan fotoanoda yang disintesis dengan variasi temperatur deposisi

Fotoanoda	V_{mp} (mV)	I_{mp} (μA)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (μA)	Fill Factor (%)	P_{maks} ($\mu W.cm^{-2}$)
ZnO_A	52,85	86,50	75,03	125,65	48,50	1,14
ZnO_B	71,37	114,83	97,21	168,87	49,93	2,05
ZnO_C	88,87	141,79	112,21	184,80	60,76	3,15

Berdasarkan data tersebut diketahui bahwa fill factor (FF) dan daya maksimum (P_{maks}) sel surya cenderung naik dengan naiknya kristalinitas ZnO nanorods. Pada sel surya yang menggunakan fotoanoda ZnO

nanorods yang disintesis dengan variasi temperatur deposisi, daya maksimum tertinggi dihasilkan oleh sel surya yang menggunakan fotoanoda lapis tipis ZnO_C. Urutan tingkat kristalinitas dari ketiga sampel adalah $ZnO_A < ZnO_B < ZnO_C$. Lapis tipis ZnO_C memiliki tingkat kristalinitas paling tinggi dibandingkan dua sampel lainnya. Chu, et al. (2009) melaporkan bahwa semikonduktor ZnO nanorods yang memiliki tingkat kristalinitas lebih tinggi, akan memiliki tingkat resistivitas yang rendah sehingga elektron mampu berdifusi lebih cepat. Laju elektron yang lebih tinggi pada ZnO_C akan menyebabkan kuantitas elektron yang mampu terdistribusikan ke fotoanoda per satuan waktu lebih banyak dibandingkan dengan fotoanoda ZnO_A maupun ZnO_B. Jumlah elektron yang lebih banyak dibandingkan kedua sampel lain akan menyebabkan arus yang dihasilkan lebih besar sehingga fotoanoda ZnO_C mampu menghasilkan daya maksimum yang paling tinggi.

Sel surya yang menggunakan fotoanoda ZnO_A menghasilkan daya maksimum yang paling kecil. Hal ini kemungkinan dikarenakan nilai energi gap yang terlalu besar (3,574 eV), lebih besar dibandingkan dengan energi yang dihasilkan oleh sumber cahaya (3,397 eV). Energi yang dihasilkan oleh sumber penyinaran belum mampu mengeksitasi elektron yang ada pada pita valensi kristal ZnO_A, dan hanya cukup untuk mengeksitasi elektron pada pita valensi merkurokrom. Dengan demikian, elektron yang mampu terdistribusikan ke fotoanoda hanya berasal dari zat warna merkurokrom. Minimnya jumlah elektron yang sampai ke fotoanoda tersebut, menyebabkan daya maksimum yang dihasilkan fotoanoda ZnO_A sangat rendah. Data aktivitas sel surya yang menggunakan fotoanoda yang disintesis dengan variasi waktu ditampilkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Data aktivitas sel surya dengan fotoanoda yang disintesis dengan variasi waktu deposisi

Fotoanoda	V_{mp} (mV)	I_{mp} (μA)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (μA)	Fill Factor (%)	P_{maks} ($\mu W.cm^{-2}$)
ZnO_1	107,51	157,48	133,87	199,22	63,48	4,23
ZnO_2	108,47	185,65	146,42	217,53	63,23	5,03
ZnO_3	93,76	142,89	124,16	207,11	52,10	3,35

Berdasarkan data tersebut, daya maksimum sel surya yang menggunakan fotoanoda yang disintesis dengan variasi waktu deposisi dihasilkan oleh fotoanoda ZnO_2. Hasil analisis XRD menyatakan bahwa urutan tingkat kristalinitas sampel lapis tipis adalah $ZnO_1 < ZnO_2 < ZnO_3$. Apabila mengacu

pada hasil penelitian yang dilaporkan oleh Chu, et al., (2009), maka seharusnya fotoanoda ZnO₃ dapat menghasilkan daya maksimum yang tertinggi dibandingkan dengan dua sampel lain. Akan tetapi, daya maksimum yang dihasilkan oleh fotoanoda ZnO₃ lebih kecil dibandingkan daya maksimum yang dihasilkan oleh fotoanoda ZnO₁ dan ZnO₂. Penurunan daya maksimum yang dihasilkan oleh sel surya dengan fotoanoda ZnO₃ kemungkinan disebabkan oleh adanya kerusakan struktur partikel kristal ZnO nanorods. Wu, et al. (2007) melaporkan bahwa laju elektron pada permukaan ZnO yang telah rusak akan terhambat dan sangat rentan mengalami rekombinasi. Laju elektron yang lebih lambat dan terjadinya rekombinasi elektron akan menyebabkan jumlah elektron yang terdistribusikan ke fotoanoda semakin berkurang, akibatnya akan terjadi penurunan nilai daya maksimum yang dihasilkan.

Simpulan

Variasi temperatur dan waktu deposisi mempengaruhi tingkat kristalinitas lapis tipis ZnO nanorods yang disintesis dengan metode CBD, yang terlihat melalui peningkatan intensitas difraksi sinar X. Semakin tinggi temperatur dan semakin lama waktu deposisi maka tingkat kristalinitas ZnO nanorods akan semakin meningkat. Variasi temperatur dan waktu deposisi tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai energi gap sampel lapis tipis ZnO nanorods. Kristal ZnO nanorods yang disintesis dengan metode CBD dan menggunakan HMTA sebagai zat pengarah pertumbuhan memiliki morfologi berbentuk batang dengan penampang berupa segi enam dan arah pertumbuhan kristal ZnO nanorods dominan pada arah (101). Sel surya dengan fotoanoda lapis tipis yang disintesis dengan variasi temperatur deposisi menghasilkan daya maksimum tertinggi sebesar 3,15 $\mu\text{m}/\text{cm}^2$ dengan fill factor sebesar 60,76%, sedangkan sel surya dengan fotoanoda lapis tipis yang disintesis dengan variasi waktu deposisi menghasilkan daya maksimum tertinggi sebesar 5,03 $\mu\text{m}/\text{cm}^2$ dengan fill factor sebesar 63,23%.

Daftar Pustaka

Amin, S. S. 2008. Synthesis dan Characterization of One Dimensional (1D) Nanostructure for Energy Conversion (Disertasi Tidak Dipublikasikan). The University of North Carolina.

Baruah, J. dan Duta, S. 2009. pH-Dependent Growth Of Zinc Oxide Nanorods. *Journal of Crystal Growth*: Elseiver. Vol. 135, 1-6.

DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2009.01.135.

Boercker, J. E. 2009. Synthesis of Titanium Dioxide and Zinc Oxide Nanowires for Excitonic Solar Cell (Disertasi Tidak Dipublikasikan). University of Minnesota.

Chu, D., Hamada, T., Kato, K., Masuda, Y. 2009. Growth and Electrical Properties of ZnO Films Prepared by Chemical Bath Deposition Methods. *Springer VCH: Phys. status Solidi A*. Vol. 206 No. 718-723. DOI: 10.1002/pssa.200824495.

Grätzel, M. 2003. Dye-sensitized Solar Cell. *Journal of Photochemistry dan Photobiology C: Photochemistry Reviews*. Vol. 4, 145-153.

Habibi, H. M., dan Sardashti, M. K. 2008. Structure and Morfology of Nanostructured Zinc Oxide Thin Films Prepared by Dip vs Spin Coating Methods. *J. Iran. Chem. Soc.* Vol. 5, 603-609.

Izrael, Y. A. 1990. IPCC Report on Climate Change. Canberra, Australia: Intergovernmental Panel on Climate Change.

Khallaf, H., Chai, G., Lupan. O., Heinrich, H., Park, S., Schulte, A. dan Chow, L. 2009. Investigation of Chemical Bath Deposition of ZnO Thin Films Using Six Different Complexing Agents. *IOP Publishing: Journal of Physics*. Vol. 42, 1-8.

Kurniawan, C. Mahatmanti, F. W., Wahyuni, S. 2009. Sintesis Nanopartikel Termodifikasi Dan Aplikasinya Sebagai Komponen Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) (Laporan Penelitian Tidak Dipublikasikan). Semarang: Universitas Negeri Semarang.

Nakamura, Y. 2006. Solution Growth of Zinc Oxide Nanowires for Dye Sensitized Solar Cell. *NNIN REU Research*, 74-76.

Noorhana, Yahya. 2011. Carbon and Oxide Nanostructures: Synthesis, Characterization, and Application. New York: Springer-Verlag LLC.

Wang, H., Li, M., Lichao, J., Wang, G., Zhang, Y., dan Li, G. 2010. Surfactant-Assisted in situ Chemical Etching for the General Synthesis of ZnO Nanotubes Array. *Springer: Nanoscale Res Lett* Vol. 5: p. 1102-1106. DOI 10.1007/s11671-010-9608-z.

Wu, J. J., Chen, G. R., Yang, H. H., Ku, C. H., dan Lai, J. Y. 2007. Effects of Dye Adsorption on the Electron Transport Properties in ZnO-Nanowire Dye-Sensitized Solar Cells. *Applied Physics Letters*. Vol. 90, 1-3. DOI: 10.1063/1.2742639.

Yang, L.L. 2010. Synthesis and Characterization of ZnO Nanostructures (Disertasi Tidak Diterbitkan). Linköping University. Norrköping, Sweden.