

Sintesis dan Kawalan Morfologi Struktur-Nano TiO₂ Menggunakan Kaedah Hidroterma untuk Aplikasi sebagai Elektrod Sel Suria Sensitif Pewarna

(Synthesis and Morphology Control of TiO₂ Nanostructures via Hydrothermal Method for Applications as Electrodes in Dye-Sensitized Solar Cells)

AN'AMT MOHAMED NOOR*, SHAHIDAN RADIMAN, HUANG NAY MING, LIM HONG NGEE, MOHD AMBAR YARMO, SAPIZAH RAHIM, SHAHRUL IZWAN AHMAD, SITI AISYAH SHAMSUDIN & MOHD SHAIFUL SAJAB

ABSTRAK

Struktur-nano TiO₂ dengan pelbagai saiz dan bentuk telah disintesis melalui kaedah hidrotermal menggunakan serbuk nanozarah TiO₂ sebagai prekursor. Sistem hidrotermal yang mudah, murah dan bebas templet pada suhu rawatan 180°C, pengaruh medium alkali dengan penambahan NaOH dan KOH ke atas saiz, morfologi dan sifat fotovoltai struktur-nano TiO₂ telah dikaji. Sampel telah diperincikan oleh mikroskopi elektron transmisi (TEM), analisis penyebaran tenaga sinar-x (EDAX) manakala keupayaan fotovoltai sel suria sensitif pewarna (DSSC) diukur menggunakan Gamry Potentiostat Series G-300. Hasil kajian dengan menggunakan agen alkali yang berlainan (NaOH dan KOH) jelas mempengaruhi morfologi TiO₂ dan sel suria sensitif pewarna yang terdiri daripada struktur nanorod TiO₂ menunjukkan keupayaan terbaik dengan voltan litar terbuka (V_{oc}) sebanyak 416.8 mV, ketumpatan arus litar terbuka (J_{sc}) sebanyak 0.169 mA/cm² dan kecekapan penukaran (η) sebanyak 0.0232% di bawah iluminasi lampu xenon AM 1.5.

Kata kunci: Hidroterma; nanokeping; nanorod; nanotiub; nanowayar

ABSTRACT

Nanostructured TiO₂ with different sizes and shapes were synthesized through the hydrothermal method using TiO₂ nanoparticles powder as the precursor. Hydrothermal system that is easy, inexpensive and free-templates at 180°C temperature treatment, the influence of alkaline medium with the addition of NaOH and KOH on the size, morphology and photovoltaic properties of TiO₂ nanostructures have been studied. Samples were characterized by transmission electron microscopy (TEM), energy dispersive X-ray analysis (EDAX) while the ability of the dye sensitized solar cells (DSSC) were measured using Potentiostat Gamry Series G-300. The study by using different alkaline agent (NaOH and KOH) clearly influence the morphology of TiO₂ and the dye sensitized solar cells consisting of TiO₂ nanorod structure shows the best capability with an open circuit voltage (V_{oc}) of 416.8 mV, a short circuit current density (J_{sc}) of 0.169 mA/cm² and a conversion efficiency (η) of 0.0232% under AM 1.5 xenon lamp illumination.

Keywords: Hydrothermal; nanorods; nanosheets; nanotubes; nanowires

PENGENALAN

Titanium dioksida (TiO₂) adalah bahan semikonduktor dengan jurang tenaga yang lebar antara 3.0-3.2 eV. TiO₂ digunakan secara meluas dalam industri kerana sifatnya yang tidak toksik, murah dan stabil daripada segi kimia. Sintesis TiO₂ berdimensi satu dengan morfologi yang spesifik seperti nanotiub (Prado & Costa 2009), nanokeping (Chen & Lou 2009), nanowayar (Centi & Perathoner 2007), nanofiber (Suzuki et al. 2007; Yuan & Su 2004), nanoriben (Li et al. 2008) dan nanorod (Bae & Ohno 2009; Shen et al. 2008) telah menarik banyak perhatian disebabkan oleh sifat fizikal dan kimianya yang unik dan berpotensi dalam fotomangkin, kosmetik, bahan sensor, penghasilan hidrogen dan elektrod dalam sel fotovoltai. Banyak teknik termasuk kaedah perantara mikroemulsi-hidroterma (Lu et al. 2008), misel songsang (Rana et al. 2005), proses suhu rendah (Nag et al. 2007), templat sol-gel (Attar et al. 2009), sonokimia (Prasad et al. 2010) dan hidroterma (An'amt et

al. 2010; Oh et al. 2009; Sikhwivhilu et al. 2009; Vasquez et al. 2009) telah dilakukan untuk mensintesis nanostruktur TiO₂ dengan morfologi yang berbeza.

Salah satu cara untuk meningkatkan nisbah luas permukaan dengan isi padu nanokristal bahan TiO₂ adalah dengan menukarnya kepada bentuk yang lain seperti nanotiub atau nanorod kerana struktur ini mempunyai nisbah luas permukaan dengan isi padu yang lebih tinggi daripada bentuk partikel. Sifat elektronik struktur ini juga berbeza dengan nanozarah TiO₂ dalam penggunaan sel suria sensitif pewarna. Daripada ini dapat dikatakan nisbah luas permukaan dengan isi padu TiO₂ pada filem elektrod dalam sel suria sensitif pewarna merupakan prasyarat untuk meningkatkan kecekapan sel suria. Ini juga menggambarkan penggunaan nanostruktur ini pada filem elektrod sel suria dapat meningkatkan pencapaian cahaya dan pemindahan elektron di dalam filem dan ini akan meningkatkan lagi arusfoto dalam sel suria.

Penyerapan tinggi pewarna ke atas permukaan TiO_2 juga disebabkan oleh nisbah luas permukaan dengan isi padu pada nanostruktur.

Dalam kajian ini, penyediaan nanostruktur yang berbeza seperti nanorod, nanowayar, nanokeping dan nanotiub bergantung kepada sistem hidroterma dan kebolehan nanostruktur TiO_2 diaplikasikan sebagai elektrod sel suria sensitif pewarna untuk meningkatkan kecekapan penukaran tenaga suria merupakan aspek utama dalam bab ini.

BAHAN DAN KAEDAH

PENYEDIAAN SAMPEL

Sintesis Nanorod TiO_2 . Serbuk komersial nanozarah TiO_2 (0.2 g) dicampur dengan 10 M KOH larutan akues dan dikacau selama 1 jam. Campuran kemudian dimasukkan ke dalam teflon-autoclaf dan rawatan hidroterma dilakukan pada suhu 180°C selama 24 jam.

Sintesis Nanowayar TiO_2 . Asetilaseton (1 mL) dimasukkan ke dalam 40 mL air dinyahion. Selepas itu 3 mL titanium isopropoksida dimasukkan ke dalam campuran di atas. Campuran dikacau sehingga homogen kemudian 30 mL larutan ammonia dititiskan ke dalam campuran sehingga mendakan putih terhasil. Mendakan dimasukkan ke dalam teflon-autoclaf dan rawatan hidroterma dilakukan pada suhu 180°C selama 20 jam. Produk yang terhasil dicuci dan dikeringkan pada 60°C selama 5 jam. 0.2 g serbuk di atas kemudian dicampur dengan 20 mL larutan akues KOH dan dikacau selama 1 jam. Campuran dimasukkan ke dalam teflon-autoclaf dan rawatan hidroterma dilakukan pada 180°C selama 24 jam.

Sintesis Nanokeping dan Nanotiub TiO_2 . NaOH (10 M) larutan akues dicampur dengan bahan organik (etanol atau trietanolamin). 1 g serbuk komersial TiO_2 kemudian

dicampur dalam larutan di atas. Campuran dimasukkan kedalam Teflon-autoclaf dan rawatan hidroterma dilakukan pada suhu 180°C selama 24 jam.

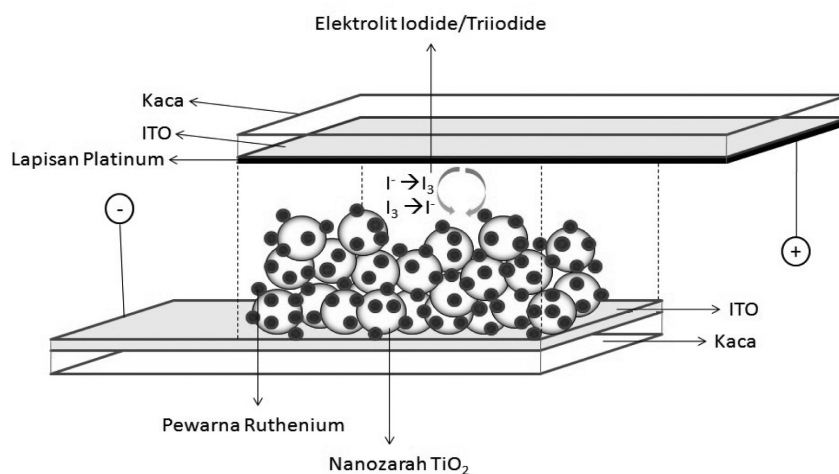
Fabrikasi Sel Suria Sensitif Pewarna. Sampel TiO_2 dicampur dengan etanol dan dikacau sehingga campuran likat terhasil. Campuran likat ini kemudian disebar atas kaca ITO (indium stanum oksida, $15\Omega/\text{cm}^2$) dengan menggunakan rod kaca dan dibiarkan kering pada suhu bilik. Selepas dipanaskan pada suhu 450°C selama 30 min untuk meningkatkan pelekatan pada kaca ITO, filem elektrod kemudian diredam dalam larutan etanol 0.3 mM pewarna N3 selama 16 jam. Filem elektrod ini dilekapkan pada elektrod balas (lapisan Platinum atas permukaan kaca ITO) dan beberapa titis elektrolit (Iodolyte MPN-100) dimasukkan sebelum dikapit dengan *clamps*. Luas permukaan aktif dengan 0.2 cm^2 diukur dan aktiviti fotovoltai dikaji menggunakan Gamry Potentiostat Series G-300 di bawah lampu xenon ($AM\ 1.5, 100\text{mW}/\text{cm}^2$). Rajah 1 menunjukkan komponen-komponen bagi struktur sel suria sensitif pewarna.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

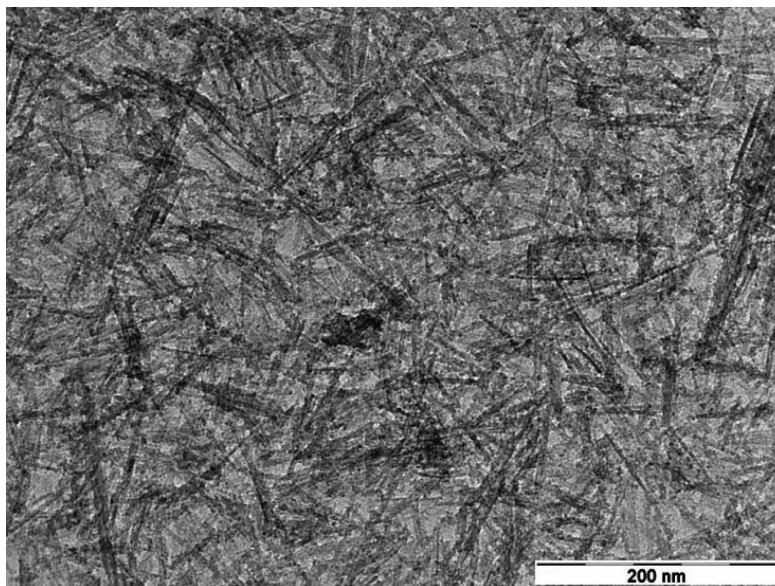
TEKNIK MIKROSKOPI ELEKTRON TRANSMISI

Daripada keputusan mikroskopi elektron transmisi, nanostruktur TiO_2 yang diperoleh mempamerkan morfologi yang berbeza dengan rawatan hidroterma yang berlainan. Semasa proses sintesis nanostruktur TiO_2 , penambahan bahan organik (NaOH dan KOH) dan pelarut organik (etanol dan trietanolamin) menentukan sifat morfologi produk. Sifat larutan seperti pemalar dielektrik akan berlainan dengan kehadiran etanol atau trietanolamin dan ini akan mempengaruhi morfologi produk.

Rajah 2 menunjukkan fotograf TEM nanorod TiO_2 . Panjang dan lebar nanorod TiO_2 ini dalam julat 50-150 nm dan 2-5 nm. Morfologi nanorod TiO_2 yang disintesis



RAJAH 1. Gambarajah struktur sel suria sensitif pewarna yang terdiri daripada nanostruktur TiO_2



RAJAH 2. Mikrograf TEM bagi nanorod TiO_2 yang disintesis dalam akues alkali 10 M KOH

memberikan bentuk yang sama dan hampir sekata. Nanorod-nanorod ini bertaburan secara dekat dan melekat antara satu sama lain. Pelekatan dan sedikit tompok hitam adalah disebabkan kehadiran larutan akueus KOH yang tidak dapat dicuci sepenuhnya semasa proses pengekstrakan.

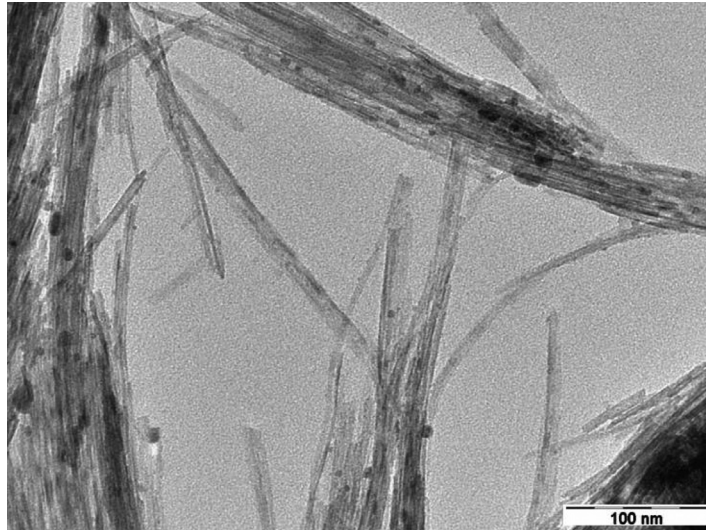
Mekanisme yang tepat dalam pembentukan nanowayar menggunakan kaedah hidroterma masih lagi menjadi topik hangat dalam perbincangan saintis di seluruh dunia. Dalam kajian ini serbuk TiO_2 yang disediakan telah berubah morfologinya apabila rawatan hidroterma diberikan pada suhu tinggi. Rajah 3 menunjukkan nanowayar TiO_2 yang disintesis dengan rawatan hidroterma ke atas serbuk partikel TiO_2 yang disediakan terlebih dahulu. Dapat diperhatikan penggunaan serbuk TiO_2 yang berbeza memberikan kesan yang ketara ke atas morfologi TiO_2 apabila rawatan hidroterma dilakukan. Panjang nanowayar ini boleh mencapai sehingga ke 500 nm dan beberapa mikrometer.

Rajah 4 menunjukkan nanokeping sampel yang diperoleh. Daripada mikrograf dapat dikatakan kepingan dan bentuk seperti rod yang besar terhasil. Diameter nanokeping TiO_2 ini dalam lingkungan 50-100 nm dan panjangnya boleh mencapai sehingga ke mikrometer. Nanotiub TiO_2 dapat dilihat menerusi Rajah 5. Diameter luar nanotiub ini sekitar 10-11 nm manakala diameter dalam pula sekitar 4-5 nm dan panjang nanotiub ini boleh mencapai 100 nm. Dapat diperhatikan nanotiub ini terbentuk secara sekata dan homogen. Pelarut organik memainkan peranan penting dalam proses pembentukan dalam kajian ini. Pada permulaan, serbuk komersial TiO_2 bertindak balas dengan NaOH menghasilkan nanokeping titanat yang nipis dengan cepat. Nanokeping titanat ini adalah tidak stabil dan cenderung untuk pecah atau mengurai kepada bentuk rod atau bentuk yang lain. Dalam

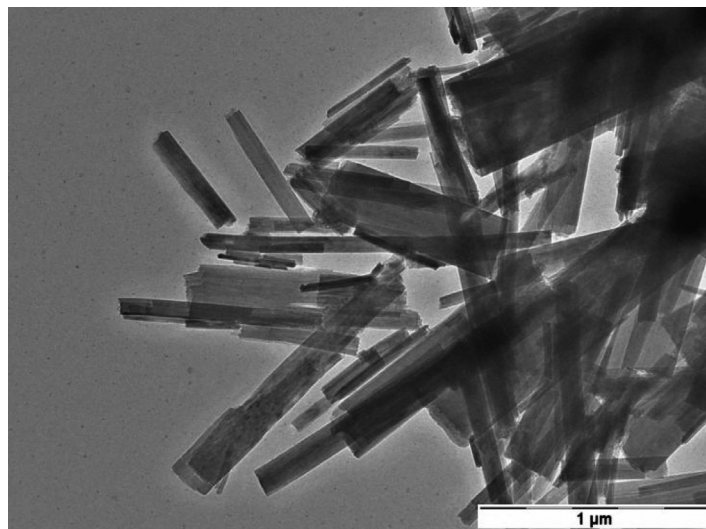
kes nanotiub, rawatan hidroterma dengan tekanan tinggi dan suhu yang tinggi (180°C) lapisan nipis tadi akan menggulung ke atas membentuk struktur tiub disebabkan ketegangan/penarikan permukaan. Sifat pelarut seperti pemalar dielektrik bagi trietanolamin semasa proses pembentukan mempengaruhi ketegangan permukaan dan mempengaruhi morfologi TiO_2 yang disintesis.

Berdasarkan TEM fotograf dan hasil eksperimental, mekanisme pembentukan nanostruktur TiO_2 dengan pelbagai morfologi dicadangkan. Pada permulaan peringkat, serbuk komersial TiO_2 dan serbuk TiO_2 yang disediakan dijadikan sebagai bahan pemula untuk pembentukan nanostruktur TiO_2 . Peringkat seterusnya (dirawat pada 180°C selama 24 jam) bahan pemula ini mudah dipengaruhi oleh struktur kristal TiO_2 , rawatan hidroterma dan keadaan eksperimental dijalankan. Semasa TiO_2 bertindak balas dengan larutan akues alkali NaOH/KOH berkepekatan tinggi, ikatan Ti-O-Ti bahan pemula mula pecah atau rosak dan lapisan titanat dengan ion Na^+/K^+ di permukaannya terbentuk dalam bentuk lapisan kecil yang nipis. Pembentukan nanowayar mula timbul daripada tindak balas dan pemecahan yang cepat pada lapisan nipis titanat dalam larutan alkali yang tinggi. Selepas dibasuh dan dibilas dengan HCl dan air suling, titanat hidrat ($\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) terbentuk oleh penukaran ion Na^+/K^+ dengan H^+ . Produk tulen TiO_2 terhasil melalui proses pengeringan dan pemanasan untuk menyingkirkan ion H^+ dan bahan organik yang lain.

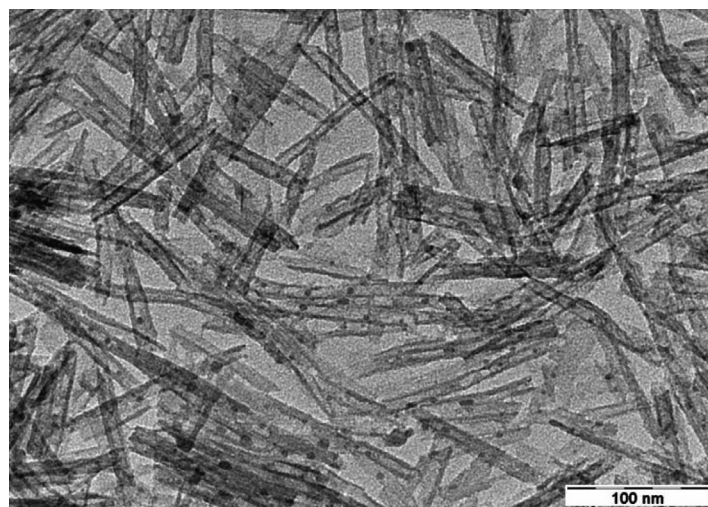
Kajian terdahulu melaporkan nanotiub terbentuk di dalam larutan akueus alkali yang tinggi pada suhu yang rendah iaitu 110°C - 150°C (Qamar et al. 2006; Wang et al. 2008). Dalam kajian ini nanotiub TiO_2 terbentuk pada suhu yang tinggi (180°C) dengan kehadiran trietanolamin. Walaupun begitu fungsi utama trietanolamin dalam proses pembentukan nanostruktur bahan masih lagi dalam kajian. Semasa proses tindak balas, serbuk TiO_2 bertindak



RAJAH 3. Mikrograf TEM bagi nanowayar TiO_2 yang disintesis dalam akues alkali 10 M KOH



RAJAH 4. Mikrograf bagi nanokeping TiO_2 yang disintesis dalam akues alkali 10 M NaOH



RAJAH 5. Mikrograf TEM bagi nanotiub TiO_2 yang disintesis dalam akues alkali 10 M NaOH dengan kehadiran trietanolamin

dengan campuran NaOH dan trietanolamin membentuk lapisan titanat berkali dan dapat diandaikan berlaku pada permulaan tindak balas. Lapisan titanat yang nipis ini mudah untuk mengelupas membentuk nanokeping dengan anisotropik dalam 2D (Wang et al. 2007; Yuan & Su 2004). Rawatan hidroterma pada suhu dan tekanan tinggi menyebabkan struktur lapisan titanat seakan bersambung dengan pertemuan hujung dengan hujung lapisan titanat tadi melalui penggulangan lapisan. Proses ini akan berterusan sehingga terbentuknya nanotub di samping kehadiran kesan elektrostatik dan ketegangan permukaan. Oleh itu di sini kami mengandaikan struktur tiub pada TiO_2 terbentuk melalui proses rawatan hidroterma dalam larutan akueus alkali. Kajian mekanisme pembentukan dan pertumbuhan morfologi nanostruktur masih lagi diteruskan untuk dijadikan rujukan pada masa akan datang.

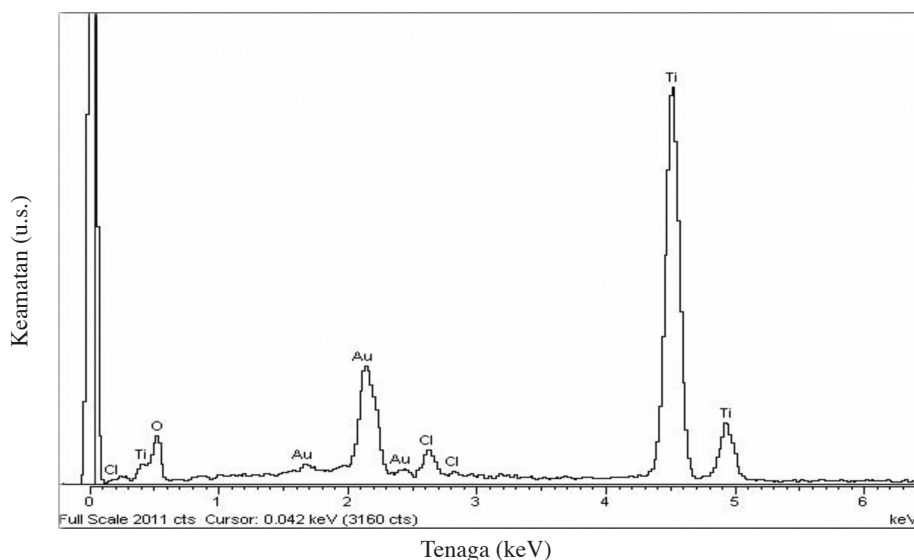
ANALISIS PENYEBARAN TENAGA SINAR-X

Analisis penyebaran tenaga sinar-X (EDAX) telah dilakukan ke atas sampel nanowayar TiO_2 sebagai sampel pilihan untuk mengenal pasti unsur-unsur yang hadir dalam nanostruktur yang disediakan melalui kaedah hidroterma. Spektrum tenaga dan peratus kandungan unsur-unsur dalam sampel ditunjukkan dalam Rajah 6 dan Jadual 1 masing-masing. Didapati kandungan Ti dan O ialah sebanyak 32.41% dan 65.91% masing-masing. Puncak Cl dalam spektrum disebabkan oleh proses pencucian dengan asid hiroklorik yang masih terlekat pada nanostruktur; peratusnya ialah 1.69%. Nisbah Ti kepada O menurut

keputusan EDAX ialah 2.034 sementara nisbah Ti kepada O dalam TiO_2 ialah 2. Di sini boleh dikatakan bahawa proses pembentukan nanowayar TiO_2 adalah lengkap melalui kaedah hidroterma. Tiga puncak tenaga bagi Ti dalam spektrum wujud akibat sesaran elektron pada petala K oleh elektron dari senapang elektron. Nilai tenaga ini adalah diskrit dan bernilai 0.45 keV, 4.55 keV dan 4.95 keV. Sementara nilai tenaga bagi puncak O ialah 0.55 keV dan Cl masing-masing ialah 0.25 keV, 2.65 keV dan 2.80 keV. Puncak spektrum yang pertama adalah disebabkan oleh penapis untuk mengawal keamanan alur elektron yang keluar daripada senapang elektron manakala puncak Au disebabkan penyalutan emas untuk meningkatkan kekonduksian elektron ke atas sampel bagi mendapatkan imej yang lebih jelas.

PENCIRIAN DAN PENGUKURAN SEL SURIA SENSITIF PEWARNA

Nanostruktur TiO_2 telah digunakan di dalam fabrikasi sel suria sensitif pewarna. Elektrod kerja (working electrode) disambung pada anode manakala elektrod balas (counter electrode) disambung pada katod. Lengkuk I-V dijana bermula pada voltan litar terbuka dan berakhir pada 0 V. Untuk plot I-V, ketumpatan arus J diplot melawan voltan V ; ketumpatan arus litar pintas, J_{sc} (arus yang dihasilkan ketika tiada voltan yang dikenakan), voltan litar terbuka, V_{oc} (voltan yang dihasilkan ketika tiada arus mengalir), faktor pengisi, FF dan kecekapan penukaran kuasa, η ditentukan menggunakan persamaan seperti berikut:



RAJAH 6. Spektrum analisis penyebaran tenaga sinar-X

JADUAL 1. Peratus kandungan unsur-unsur Ti, O dan Cl dalam sampel

Unsur	Peratus, %
Ti	32.41
O	65.91
Cl	1.69

$$FF = \frac{J_{pp} V_{pp}}{J_{sc} V_{oc}}, \quad (1)$$

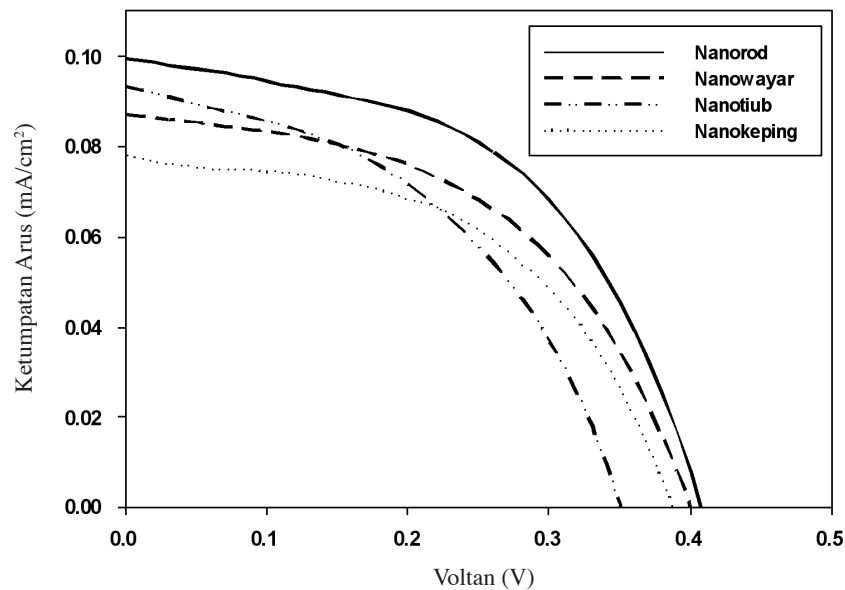
$$P_{max} = J_{sc} V_{oc} FF, \quad (2)$$

$$\eta = \frac{P_{max}}{I_s}, \quad (3)$$

dengan J_{pp} dan V_{pp} adalah titik ketumpatan arus dan voltan maksimum pada lengkung I-V, P_{max} adalah kuasa maksimum yang diekstrak daripada sel suria dan I_s adalah intensiti sumber cahaya sinaran (100 mW/cm^2). Ciri arus sebagai fungsi voltan yang diambil daripada sel suria yang terbentuk daripada nanozarah TiO_2 dengan menggunakan nanostruktur yang berlainan adalah dipaparkan dalam Rajah 7. Kecekapan penukaran kuasa yang paling optimum (0.0232%) diperolehi daripada sistem suria yang terdiri daripada nanorod TiO_2 . Jadual 2 memaparkan nilai-nilai arus litar terbuka (J_{sc}), voltan litar terbuka (V_{oc}), faktor pengisi (FF) dan kecekapan penukaran kuasa (η) yang dikira melalui plot I-V bagi sel suria yang terdiri daripada nanostruktur berlainan.

Nanostruktur TiO_2 berbeza yang digunakan dalam sel suria didapati mampu untuk mempengaruhi penukaran kuasa dalam sistem sel suria. Berbeza daripada bahan pukat TiO_2 , nanostruktur TiO_2 menunjukkan sifat istimewa seperti berikut, nisbah luas permukaan dengan isi padu yang tinggi dan ini membantu pendedahan berkesan kepada cahaya dan memudahkan tindak balas fotokimia pada permukaan TiO_2 , meningkatkan pergerakan cas fotoaruhan dengan menghasilkan dan menderma elektron yang dihasilkan oleh fotoaruhan dan tiada pengurangan pembentukan lapisan pada permukaan yang mengakibatkan perubahan pada sifat fotoelektrokimia.

Dengan mengubah struktur nanozarah ini nisbah luas permukaan dengan isi padu semakin meningkat dan ini membawa kepada proses penyerapan pewarna pada permukaan TiO_2 semakin tinggi. Permukaan nanorod yang panjang dan nanowayar memainkan peranan dengan mengumpul lebih banyak elektron pada permukaan dan jangka hayat fotoelektron yang dihasilkan lebih lama dan ini meningkatkan lagi kecekapan penukaran kuasa sel suria seperti ditunjukkan dalam Rajah 7 (Lee et al. 2007; Pan et al. 2007; Quintana et al. 2007). Nanostruktur ini juga



RAJAH 7. Pencirian I-V sel suria sensitif pewarna yang terdiri daripada nanostruktur TiO_2

JADUAL 2. Parameter yang dijana oleh sel-suria sensitif pewarna yang terdiri daripada nanostruktur TiO_2

Nanostruktur	Kutumpatan Arus, J_{sc} (mAcm ⁻²) ± 0.0001	Voltan Litar Terbuka, V_{oc} (V) ± 0.0001	Faktor Pengisi, FF (%)	Kecekapan Penukaran Kuasa, η (%)
Nanorod	0.1069	0.4168	0.52	0.0232
Nanotiub	0.0980	0.3500	0.57	0.0196
Nanokeping	0.0790	0.3901	0.55	0.0170
Nanowayar	0.0936	0.4000	0.54	0.0202

menghasilkan permukaan antara muka yang lebih luas dan memudahkan pemisahan serta meningkatkan kadar pengangkutan cas dan proses kehilangan elektron atau kebarangkalian proses rekombinasi dapat dikurangkan. Kehadiran struktur tiub pada nanotiub seperti ditunjukkan dalam imej TEM juga memberikan kadar pengangkutan elektron yang tinggi. Disamping itu, seperti yang dilaporkan oleh Qu et al. (2009) proses rekombinasi berlaku dengan serius disebabkan permukaan yang cacat pada struktur nanotiub dan ini menyebabkan kecekapan penukaran kuasa sel suria menurun serta pemerangkapan elektron pada satu tempat spesifik meningkatkan proses rekombinasi (Pan et al. 2007).

Ketebalan filem elektrod juga mempengaruhi kecekapan penukaran kuasa (Huang et al. 2006) tetapi kajian ketebalan ke atas kecekapan penukaran kuasa tidak dihuraikan dalam kajian ini. Walau bagaimanapun, nilai faktor pengisian (FF) mempengaruhi kesan kecekapan penukaran kuasa sel suria dan boleh menggantikan kajian ketebalan filem elektrod. Nilai faktor pengisian bagi nanokeping lebih tinggi tetapi penghasilan arus dari panel sel suria lebih rendah kerana kecacatan permukaan pada nanokeping. Walau bagaimanapun, nilai kecekapan nanorod, nanotiub, nanokeping dan nanowayar yang disintesis lebih rendah jika dibandingkan dengan 1.8% ~ 5.8% (nanorod), 1.05% (nanotiub) dan 0.86% (nanowayar) seperti yang dilaporkan oleh Bwana (2009), Pan et al. (2007), Qu et al. (2009) dan Wang et al. (2009) masing-masing. Untuk nanokeping pula, perbandingan nilai kecekapan tidak dapat dilakukan dengan tepat kerana nilai kecekapan bagi sel suria sensitif pewarna yang terdiri daripada nanokeping TiO₂ gagal diperolehi dan sepanjang pengetahuan penulis tiada laporan pernah dibentangkan untuk mengkaji kesan penggunaan nanokeping TiO₂ ke atas kecekapan penukaran tenaga suria.

KESIMPULAN

Kajian yang dilakukan menunjukkan nanorod, nanotiub, nanokeping dan nanowayar TiO₂ dapat disintesis melalui kaedah hidroterma menggunakan serbuk nanozarah TiO₂ dan sampel nanozarah yang disintesis terlebih dahulu sebagai prekursor pembentukan nanostruktur di dalam medium alkali. Serbuk nanostruktur yang diperolehi kemudian disalutkan ke atas kaca ITO untuk dijadikan filem elektrod sel suria sensitif pewarna. Keputusan menunjukkan kecekapan penukaran kuasa bagi nanorod TiO₂ memberikan kecekapan tertinggi berbanding nanostruktur yang lain.

PENGHARGAAN

Kami merakamkan setinggi-tinggi penghargaan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia atas pembiayaan melalui geran UKM-OUP-NBT-27-138/2008 dan geran FRGS no. FP012/2010A oleh Kementerian Pengajian Tinggi (KPT). Terima kasih juga diucapkan kepada Unit Mikroskopi Elektron UKM atas bantuan pencirian TEM dan EDAX.

RUJUKAN

- An'amt, M.N., Radiman, S., Huang, N.M., Yarmo, M.A., Ariyanto, N.P., Lim, H.N. & Muhamad, M.R. 2010. Sol-gel hydrothermal synthesis of bismuth-TiO₂ nanocubes for dye-sensitized solar cell. *Ceramics International* 36: 2215-2220.
- Attar, A.S., Ghamsari, M.S., Hajiesmaeilbaigi, F., Mirdamadi, S., Katagiri, K. & Koumoto, K. 2009. Sol-gel template synthesis and characterization of aligned anatase-TiO₂ nanorod arrays with different diameter. *Materials Chemistry and Physics* 113: 856-860.
- Bae, E. & Ohno, T. 2009. Exposed crystal surface-controlled rutile TiO₂ nanorods prepared by hydrothermal treatment in the presence of poly(vinyl pyrrolidone). *Applied Catalysis B: Environmental* 91: 634-639.
- Bwana, N.N. 2009. Comparison of the performances of dye-sensitized solar cells based on different TiO₂ electrode nanostructures. *Journal of Nanoparticle Research* 11: 1917-1923.
- Centi, G. & Perathoner, S. 2007. Nano-architecture and reactivity of Titania catalytic materials. Quasi-1D nanostructures. *Catalysis* 20: 367-402.
- Chen, J.S. & Lou, X.W. 2009. Anatase TiO₂ nanokeping: An ideal host structure for fast and efficient lithium insertion/extraction. *Electrochemistry Communications* 11(12): 2332-2335.
- Huang, E.Y., Hsu, Y.C., Chen, J.G., Suryanarayanan, V., Lee, K.M. & Ho, K.C. 2006. The effects of hydrothermal temperature and thickness of TiO₂ film on the performance of a dye-sensitized solar cell. *Solar Energy Materials and solar cells* 90: 2391-2397
- Lee, K.M., Suryanarayanan, V. & Ho, K.C. 2007. A study on the electron transport properties of TiO₂ electrodes in dye-sensitized solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 91: 1416-1420.
- Li, Q., Zhang, J., Liu, B., Li, M., Yu, S., Wang, L., Li, Z., Liu, D., Hou, Y., Zou, Y., Zou, B., Cui, T. & Zou, G. 2008. Synthesis and electrochemical properties of TiO₂-B@C core-shell nanoribbons. *Crystal Growth and Design* 8: 1812-1814.
- Lu, C.H., Wu, W.H. & Kale, R.B. 2008. Microemulsion-mediated hydrothermal synthesis of photocatalytic TiO₂ powders. *Journal of Hazardous Materials* 154: 649-654.
- Nag, M., Basak, P. & Manorama, S.V. 2007. Low-temperature hydrothermal synthesis of phase-pure rutile titania nanocrystals: Time temperature tuning of morphology and photocatalytic activity. *Materials Research Bulletin* 42: 1691-1704.
- Oh, J.K., Lee, J.K., Kim, S.J. & Park, K.W. 2009. Synthesis of phase- and shape-controlled TiO₂ nanoparticles via hydrothermal process. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 15: 270-274.
- Pan, K., Zhang, Q., Wang, Q., Liu, Z., Wang, D., Li, J. & Bai, Y. 2007. The photoelectrochemical properties of dye sensitized solar cells made with TiO₂ nanoribbons and nanorods. *Thin Solid Films* 515: 4085-4091.
- Prado, A.G.S. & Costa, L.L. 2009. Photocatalytic decoloration of malachite green dye by application of TiO₂ nanotubes. *Journal of Hazardous Materials* 169: 297-301.
- Prasad, K., Pinjari, D.V., Pandit, A.B. & Mhaske, S.T. 2010. Phase transformation of nanostructured titanium dioxide from anatase-to-rutile via combined ultrasound assisted sol-gel technique. *Ultrasonics Sonochemistry* 17: 409-415.

- Qamar, M., Yoon, C.R., Oh, H.J. & Kim, S.J. 2006. The effect of synthesis conditions on the formation of titanate nanotubes. *Journal of the Korean Physical Society* 49: 1493-1496.
- Qu, J., Gao, X.P., Li, G.R., Jiang, Q.W. & Yan, T.Y. 2009. Structure transformation and photoelectrochemical properties of TiO₂ nanomaterials calcined from titanate nanotubes. *Journal of Physical Chemistry C* 113: 3359-3363.
- Quintana, M., Edvigion, T., Hugfeldt, A. & Boschloo, G. 2007. Comparison of dye - sensitized ZnO and TiO₂ solar cells: Studies of charge transport and carrier lifetime. *Journal of Physical Chemistry C* 111: 1035-1041.
- Rana, S., Rawat, J. & Misra, R.D.K. 2005. Anti-microbial active composite nanoparticles with magnetic core and photocatalytic shell: TiO₂-NiFe₂O₄ biomaterial system. *Acta Biomaterialia* 1: 691-703.
- Sikhwihlu, L.M., Sinha Ray, S. & Coville, N.J. 2009. Influence of bases on hydrothermal synthesis of titanate nanostructures. *Applied Physics A: Materials Science and Processing* 94: 963-973.
- Suzuki, Y., Pavasupree, S., Yoshikawa, S. & Kawahata, R. 2007. Direct synthesis of an anatase-TiO₂ nanofiber/nanoparticle composite powder from natural rutile. *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials* 204: 1757-1761.
- Vasquez, J., Lozano, H., Lavayen, V., Lira-Cantu, M., Gomez-Romero, P., Ana, M.A.S., Benavente, E. & Gonzalez, G. 2009. High-Yield preparation of titanium dioxide nanostructures by hydrothermal conditions. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 9: 1103-1107.
- Wang, B., Shi, Y. & Xue, D. 2007. Large aspect ratio titanate nanowire prepared by monodispersed titania submicron sphere via simple wet-chemical reactions. *Journal of Solid State Chemistry* 180: 1028-1037.
- Wang, D., Zhou, F., Liu, Y. & Liu, W. 2008. Synthesis and characterization of anatase TiO₂ nanotubes with uniform diameter from titanium powder. *Materials Letters* 62: 1819-1822.
- Wang, D., Yu, B., Zhou, F., Wang, C. & Liu, W. 2009. Synthesis and characterization of anatase TiO₂ nanotubes and their use in dye-sensitized solar cells. *Materials Chemistry and Physics* 113: 602-606.
- Yuan, Z.Y. & Su, B.L. 2004. Titanium oxide nanotubes, nanofibers and nanowires. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 241: 173-183.
- An'amt Mohamed Noor*
Jabatan Sains Bumi
Fakulti Agro Industri Dan Sumber Asli
Universiti Malaysia Kelantan
Kampus Jeli, Beg Berkunci No. 100
17600 Jeli, Kelantan
Malaysia
- Huang Nay Ming & Lim Hong Ngee
Solid State Physics Research Group
Department of Physics
Faculty of Science University of Malaya
50603 Kuala Lumpur
Malaysia
- Shahidan Radiman, Sapizah Rahim, Shahrul Izwan Ahmad & Siti Aisyah Shamsudin
Program Sains Nuklear
Pusat Pengajian Fizik Gunaan
Fakulti Sains dan Teknologi
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 Bangi, Selangor, D.E.
Malaysia
- Mohd Ambar Yarmo
Pusat Pengajian Sains Kimia dan Teknologi Makanan
Fakulti Sains dan Teknologi
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 Bangi, Selangor, D.E.
Malaysia
- Mohd Shaiful Sajib
Pusat Pengajian Sains Bahan
Fakulti Sains dan Teknologi
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 Bangi, Selangor, D.E.
Malaysia

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: anamt_1003@yahoo.com

Diserahkan: 21 Februari 2012

Diterima: 23 Januari 2013