

FABRIKASI NANOTUBES TiO₂ DENGAN TINGKAT NANOKRISTALINITAS TINGGI MELALUI PERLAKUAN KOMBINASI ANIL DAN PASCA-HIDROTERMAL UNTUK APLIKASI SEL SURYA TERSENSITISASI ZAT PEWARNA

Alfian Ferdiansyah¹, Akhmad Herman Yuwono^{1*}, Nofrijon Sofyan¹, Indriana Kartini², Tego Hadi Pujianto¹, Badrul Munir¹

¹Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik

Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok-Jawa Barat 16424

²Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Gajah Mada, Sekip Utara, Yogyakarta 55281

E- mail: ahyuwono@metal.ui.ac.id; alfian@metal.ui.ac.id

Masuk tanggal : 05-10-2011, revisi tanggal : 09-07-2012, diterima untuk diterbitkan tanggal : 20-07-2012

Intisari

FABRIKASI NANOTUBES TiO₂ DENGAN TINGKAT NANOKRISTALINITAS TINGGI MELALUI PERLAKUAN KOMBINASI ANIL DAN PASCA-HIDROTERMAL UNTUK APLIKASI SEL SURYA TERSENSITISASI ZAT PEWARNA. Dewasa ini struktur nanotubes telah mendapat perhatian yang sangat besar karena memiliki rasio luas permukaan yang tinggi. Hal ini penting dalam aplikasinya sebagai elektroda sel surya tersensitasi zat pewarna (*dye sensitized solar cell, DSSC*). Pada penelitian ini telah difabrikasi *nanotubes* TiO₂ melalui teknik hidrotermal standar dimana serbuk nano TiO₂ P25 Degussa dilarutkan pada larutan alkalin sodium hidroksida berkonsentrasi tinggi di dalam otoklaf tersegel. Untuk meningkatkan nanokristalinitas, dilakukan sebuah modifikasi dimana proses anil konvensional dikombinasikan dengan pasca hidrotermal. Detail struktur, morfologi dan kristalinitas diuji dengan XRD, spektroskopi Raman, SEM dan TEM, sedangkan sifat optik dari *nanotubes* diinvestigasi dengan spektroskopi UV-Vis. Hasil investigasi menunjukkan bahwa dengan memberikan kombinasi anil konvensional dan pasca hidrotermal pada *nanotubes*, nanokristalinitas dapat ditingkatkan secara signifikan dan pada saat yang sama integritas struktur rongga (*hollow*) tetap terjaga. Untuk sampel *nanotubes* yang sebelumnya diberikan anil 150 °C, ukuran kristalit anatase bertambah dari 6,93 sampai 7,82 nm setelah perlakuan pasca-hidrotermal 80-150 °C. Peningkatan nanokristalinitas lebih signifikan ditunjukkan ketika temperatur anil dinaikkan sampai 300 °C kemudian dilanjutkan pasca-hidrotermal yang sama, menghasilkan peningkatan ukuran kristalit mulai dari 17,20 sampai 18,30 nm. Energi celah pita yang dihasilkan nanotubes berbanding terbalik dengan ukuran kristalit, dimana nilai terendah sebesar 3,19 eV didapatkan dari ukuran kristalit terbesar yaitu 18,30 nm. *Nanotubes* ini juga memberikan sirkuit tegangan terbuka pada divais DSSC hasil fabrikasi sebesar 108 mV.

Kata kunci : TiO₂, Nanotubes, Pasca hidrotermal, Nanokristalinitas, DSSC

Abstract

FABRICATION OF HIGHLY NANOCRYSTALLINE TiO₂ NANOTUBES THROUGH A COMBINATION OF PRE-ANNEALING AND HYDROTHERMAL TREATMENT FOR DYE SENSITIZED SOLAR CELL APPLICATION. In the recent years TiO₂ nanotube structure has attracted a great attention due to its very high surface area to volume ratio. This property plays an important role on the dye sensitized solar cell electrodes applications. In this study, TiO₂ nanotubes have been fabricated through hydrothermal technique by dissolving Degussa P25 TiO₂ nanopowder in a highly concentrated alkaline solution of sodium hydroxide into a sealed autoclave. In order to improve nanocrystallinity of TiO₂ nanotubes structure, a modification was made by combining conventional annealing process and hydrothermal post. Details of the structure, morphology and crystallinity of products were analyzed by XRD, Raman spectroscopy, SEM and TEM, while the optical properties of the nanotubes was examined by UV-Vis spectroscopy. The investigation result showed that enhancing nanocrystallinity while at the same time maintaining the integrity of the nanotube hollow structure can be obtained by the combined process of conventional annealing and post-hydrothermal treatment. For the nanotube samples which have been previously annealed at 150 °C, the crystallite size of anatase TiO₂ increased from 6.93 to 7.82 nm after post-hydrothermal treatment of 80-150 °C. A more significant enhancement in the

nanocrystallinity can be achieved when the annealing temperature was raised to 300 ° C, followed by post-hydrothermal. This resulted in the crystallite size of anatase TiO₂ nanotubes increased from 17.20 to 18.30 nm. The band gap energy of resulting nanotubes is inversely proportional to crystallites size, where the lowest value of 3.19 eV obtained from the largest crystallite size is 18.30. In the DSSC fabrication device, this nanotubes also shown the highest open-circuit voltage of 108 mV.

Keywords : TiO₂, Nanotubes, Hydrothermal post, Nanocrystallinity, DSSC (dye sensitized solar cell)

PENDAHULUAN

Perkembangan yang menarik dari teknologi sel surya saat ini salah satunya adalah sel surya tersensitisasi zat pewarna (DSSC) yang dikembangkan oleh O'Reagan dan Michael Grätzel pada tahun 1991^[1]. DSSC adalah divais sel surya yang bekerja menggunakan prinsip elektrokimia dimana zat pewarna tersensitisasi yang terserap pada lapisan fotoelektroda TiO₂ akan menangkap energi foton yang berasal dari cahaya kemudian dikonversi menjadi energi listrik melalui serangkaian transfer elektron yang sangat cepat dan siklik^[2-3]. Problem utama dari DSSC ini adalah masih rendahnya tingkat efisiensi konversi energi yang dihasilkan. Hal ini tidak lain disebabkan oleh keterbatasan difusi elektron pada lapisan TiO₂ yang memicu tingginya tingkat rekombinasi dari elektron bebas dengan molekul zat pewarna yang teroksidasi^[4]. Umumnya, untuk mengatasi hal ini dapat dilakukan dengan cara memberikan perlakuan panas. Namun, tingginya temperatur (>500 °C) dan durasi yang berlebihan dapat berakibat pada tingginya resistansi dari kaca konduktif^[5]. Oleh sebab itu, alternatif yang dapat dilakukan adalah perbaikan dari sifat-sifat TiO₂ itu sendiri. Hal yang perlu ditekankan adalah perbaikan pada sifat transfer elektron dan tetap memiliki rasio luas permukaan terhadap volum yang besar.

Terkait hal ini, material nano 1-dimensi (*nanotubes*) merupakan kandidat terkuat yang dapat dipilih. *Nanotubes* TiO₂ mendapat perhatian yang sangat besar karena selain memiliki rasio luas permukaan terhadap volume yang sangat tinggi^[6] juga memberikan sifat transport elektron satu arah (*unidirectional electron*

transport)^[7] yang disebut juga sebagai efek transport balistik^[8]. Bahkan Law *et al*^[9], melaporkan bahwa koefisien kecepatan difusi elektron pada struktur nano 1-dimensi ratusan kali lebih besar dari difusifitas tertinggi yang pernah dilaporkan dari partikel nano TiO₂ dan ZnO.

Titanium *nanotubes* dengan struktur yang teratur, telah dihasilkan dengan berbagai metode antara lain pendeposisian ke dalam *nanoporous alumina template* (reaksi *anodizing*)^[10-11], reaksi sol-gel^[12], dan proses hidrotermal^[13]. Pada metode reaksi *anodizing* yang menggunakan *template*, selain prosedur yang kompleks dan mahal, hasil yang diperoleh membutuhkan penghilangan *template* dan harus dilakukan proses kalsinasi pada temperatur yang lebih tinggi^[14]. Sedangkan metode hidrotermal, selain tidak membutuhkan *template*, metode ini memberikan kesederhanaan, kemudahan mengontrol dengan menetapkan beberapa variabel seperti *precursor*, pH, temperatur reaksi, lama *aging*, tekanan uap air dan karakteristik pelarut dan cocok untuk membuat struktur *nanotubes* dengan diameter yang lebih kecil, dinding yang tipis dan kristalinitas yang tinggi^[15].

Oleh karena itu, penelitian ini dimaksudkan untuk merekayasa ukuran dan bentuk dari *nanotubes* TiO₂ yang memiliki keunggulan pada sifat transport elektron dan tetap memiliki rasio luas permukaan terhadap volum yang besar untuk dapat diaplikasikan pada DSSC sehingga dapat meningkatkan efisiensi konversi energi yang dihasilkan.

PROSEDUR PERCOBAAN

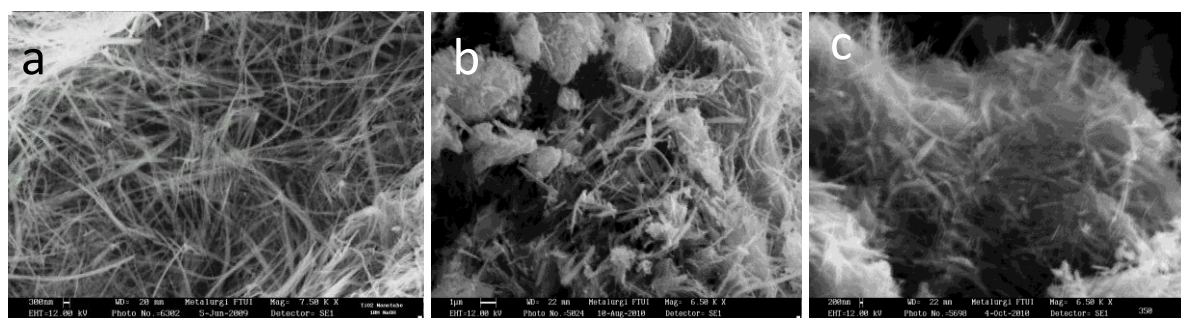
Titanium dioksida *nanotubes* (TiNT) disintesis melalui metode hidrotermal menggunakan serbuk nanopartikel komersial P25 (Degussa) sebagai material awalan. Konversi dari nanopartikel menjadi *nanotubes* dicapai dengan memberikan hidrotermal serbuk nanopartikel pada larutan NaOH 10 M di dalam Teflon-lined otoklaf pada temperatur 150 °C selama 48 jam. Presipitat yang dihasilkan dicuci dengan larutan HCl 0,1 M dan aquades hingga mencapai pH netral. Untuk perbandingan, serbuk hasil pencucian yang telah dikeringkan (*as dried*) kemudian dibagi menjadi dua. Kelompok pertama, diberikan anil konvensional pada temperatur bervariasi (200 °C, 300 °C, 450 °C dan 600 °C) selama 3 jam, sampel yang dihasilkan diberi notasi (A, B, C, D dan E). Sedangkan kelompok kedua yaitu hanya dilakukan anil pada 300 °C selama 3 jam kemudian dilakukan modifikasi pasca-hidrotermal, dimana sampel dimasukkan kembali ke Teflon-lined otoklaf pada temperatur 80 °C, 100 °C, 120 °C dan 150 °C selama 24 jam tanpa kontak langsung dengan air, sampel yang dihasilkan diberi notasi (F, G, H, dan I).

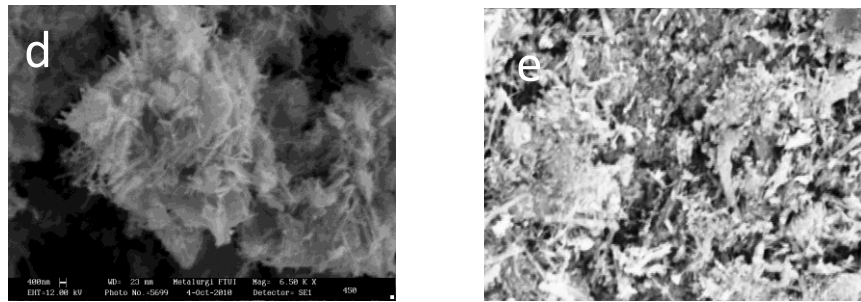
Morfologi TiNT dinvestigasi menggunakan *scanning electron microscope* (SEM, Leo 420i) dan *transmission electron microscope* (TEM, JEOL, JEM-1400). Struktur kristal yang dihasilkan dianalisis menggunakan *X-Ray diffraction* (XRD, Phillips PW 1710) dengan radiasi Cu- α 1,5404 Å dan

dikonfirmasi melalui Raman spektroskop. Persamaan Scherrer^[16] digunakan untuk mengestimasi besar kristalit *nanotubes* yang dihasilkan. Karakteristik optik dari TiNT yang dihasilkan diamati menggunakan *diffuse reflectance spectra* (Shimadzu, UV-2450). Besar energi celah pita (E_g) *nanotubes* diestimasi menggunakan persamaan Kubelka-Munk^[17].

HASIL DAN PEMBAHASAN

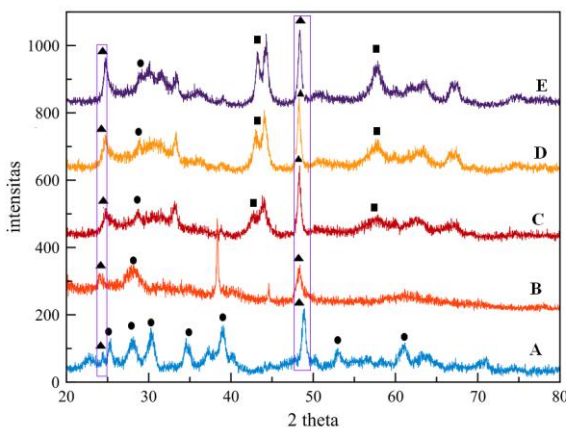
Gambar 1 memperlihatkan foto hasil SEM dari material hasil sintesis hidrotermal pada temperatur yang berbeda. Pada Gambar 1a di atas diperlihatkan bahwa struktur yang dihasilkan dari proses hidrotermal berbentuk serabut, hal ini mengindikasikan bahwa struktur ini merupakan *nanotubes* titanium dioksida. Kemudian dapat diketahui dari Gambar 1b-1e, struktur *tube* ini mulai mengalami perubahan struktur saat dilakukan anil pada temperatur lebih tinggi. Pada temperatur anil 450 °C yang ditunjukkan oleh Gambar 1d, *tube* mengalami kehancuran, puncaknya pada temperatur 600 °C (Gambar 1e), dimana material kembali berbentuk seperti awalnya (partikel). Hal ini pula yang memperkuat alasan untuk dilakukannya peningkatan kristalinitas *nanotubes* melalui *post-hydrothermal* pada sampel-sampel kelompok kedua yaitu diberikan anil pada temperatur 300 °C kemudian dilanjutkan pasca hidrotermal.





Gambar 1. Foto SEM dari kelompok pertama hasil proses hidrotermal pada temperatur 150 °C selama 48 jam dengan menggunakan larutan NaOH dengan konsentrasi 10 M dimana (a) serbuk *as dried nanotube* TiO₂ Degussa (sampel A); dan yang telah mengalami anil pada temperatur (b) 200 °C (sampel B), (c) 300 °C (sampel C), (d) 450 °C (sampel D) dan (e) 600 °C (sampel E)

Gambar 2 di bawah ini memperlihatkan difraktogram dari TiO₂ *nanotubes* dan yang telah mengalami anil pada temperatur 200 °C - 600 °C selama 3 jam.



Gambar 2. Difraktogram XRD dari kelompok pertama hasil proses hidrotermal pada T=150 °C selama 48 jam dengan menggunakan larutan NaOH dengan konsentrasi 10 M dimana serbuk *as dried nanotube* TiO₂ Degussa (sampel A) dan yang telah mengalami anil pada temperatur 200 °C (sampel B), 300 °C (sampel C), 450 °C (sampel D) dan 600 °C (sampel E) (▲ = anatase , ■ = rutile dan ● = sodium titanate nanotubes)

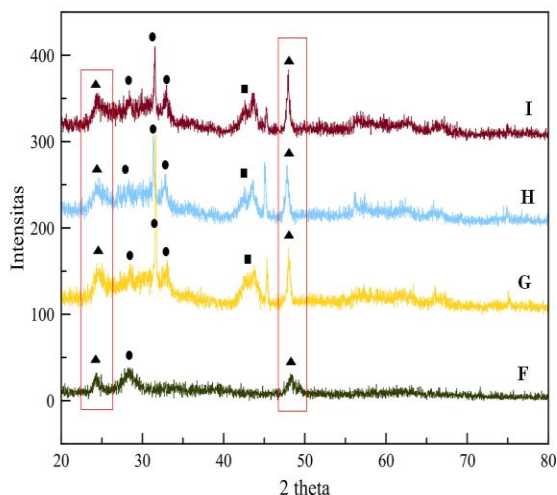
Menurut Kim *et.al.*,^[18] perubahan fasa menjadi anatase yang terjadi selama peningkatan temperatur disebabkan terjadinya dehidrasi dari gugus *interlayered* Ti-OH *nanotube* yang menghasilkan struktur kristalin Ti-O-Ti. Dari hasil XRD pada Gambar 2, berdasarkan persamaan Scherrer dapat diestimasi ukuran kristalit (*t*) dari kelima jenis sampel tersebut. Hasil perhitungan ukuran kristalit kelima jenis sampel dapat dilihat pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Ukuran kristalit, *t* hasil perhitungan dengan persamaan Scherrer untuk sampel TiO₂ *nanotubes* dengan berbagai variasi temperatur anil

Sampel	Ukuran kristalit (nm)
P25	27,42
A	8,06
B	10,21
C	11,24
D	12,46
E	27,41

Bila hasil ukuran kristalit ini dikaitkan dengan yang diperoleh dari hasil SEM, maka terlihat bahwa kristalinitas meningkat sejalan dengan meningkatnya temperatur anil, namun pada temperatur tertinggi yaitu 600 °C struktur *tube* mengalami kehancuran sehingga kembali ke bentuk semula berupa serbuk. Hal ini diperkuat dengan hasil perhitungan, dimana ukuran kristal serbuk P25 dengan hasil anil 600 °C tidak jauh berbeda yaitu sekitar 27 nm.

Gambar 3 memperlihatkan pola hasil XRD dari kelompok sampel kelompok kedua, *nanotubes* yang diberikan perlakuan anil pada temperatur 300 °C selama 3 jam dan pasca hidrotermal 80 °C, 100 °C, 120 °C dan 150 °C selama 24 jam (sampel F, G, H dan I).



Gambar 3. Hasil XRD kelompok sampel dengan perlakuan anil 300 °C dilanjutkan dengan pasca hidrotermal pada T= 80 °C (sampel F), 100 °C (sampel G), 120 °C (sampel H), dan 150 °C (sampel I). (▲ = anatase , ■ = rutile dan ● = sodium titanate nanotubes)

Pada Gambar 3 di atas diperlihatkan difraktogram dari sampel F, G, H dan I. Seperti pada gambar sebelumnya (Gambar 2), perwakilan titanate pada 2θ sekitar 12° dan anatase pada 25° dan 48° tetap terlihat. Bahkan intensitas puncak difraksi anatase pada 2θ sekitar 48° menunjukkan peningkatan, dimana terlihat bahwa semakin ke atas (F ke I) puncak terlihat semakin sempit. Hal ini mengindikasikan terjadinya kenaikan kristalinitas. Estimasi ukuran kristalit untuk sampel F, G, H dan I dapat dilihat pada Tabel 2 di bawah ini. Dapat dilihat bahwa pada kelompok sampel ini pun terjadi peningkatan kristalinitas seperti kelompok sebelumnya. Sebagaimana tujuan dari penelitian ini yaitu peningkatan kristalinitas namun struktur *nanotubes* tetap terjaga maka untuk memastikannya dilakukan karakterisasi

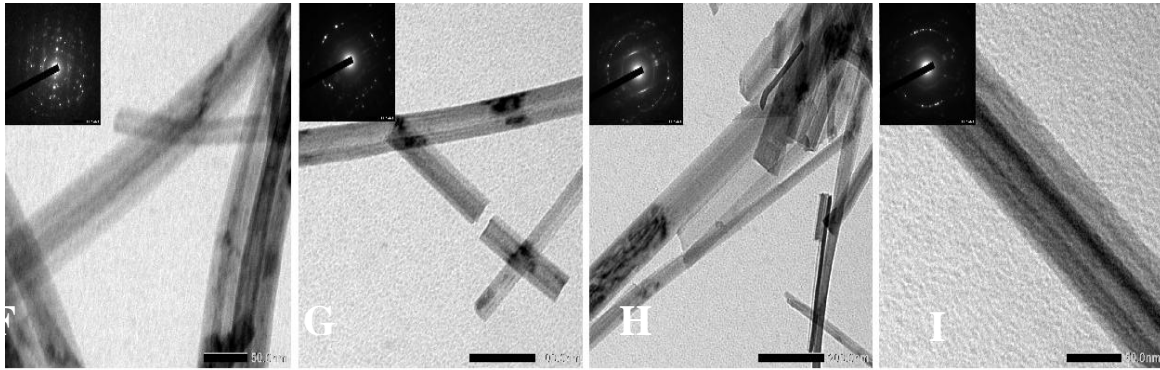
TEM yang diperlihatkan pada Gambar 4 di bawah ini.

Tabel 2. Ukuran kristalit, *t* hasil perhitungan dengan persamaan Scherrer untuk sampel TiO₂ *nanotubes* dengan berbagai variasi temperatur pasca hidrotermal

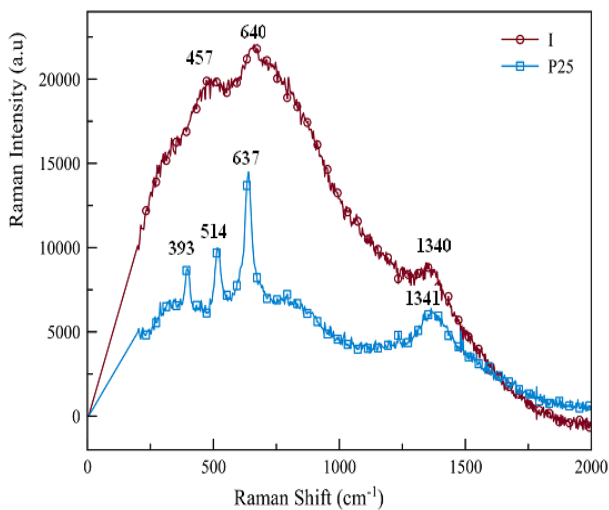
Sampel	Ukuran kristalit (nm)
F	11,20
G	17,20
H	18,03
I	8,30

Berdasarkan Gambar 4 diperlihatkan bahwa keempat sampel tersebut tetap memiliki struktur *tubes*. Sehingga jika dikaitkan dengan hasil difraktogram XRD sebelumnya, dapat diambil kesimpulan bahwa dengan metode pasca hidrotermal, struktur *nanotubes* dapat tetap terjaga sejalan dengan peningkatan kristalinitas, sehingga ini memberikan nilai lebih dibandingkan dengan kelompok sebelumnya. Untuk memberikan keterangan tambahan sekaligus penguat bahwa titanium dioksida *nanotubes* ini memiliki kristalinitas lebih baik yang diwakili dengan adanya fase anatase (sebagai pembandingnya yaitu material awalan P25) di bawah ini diperlihatkan juga hasil pengujian Raman spektroskopi.

Pada Gambar 5 diperlihatkan mode pita raman pada 393, 514 dan 637 cm⁻¹ yang merupakan identitas terhadap struktur anatase dari TiO₂. Selanjutnya, sampel I memiliki mode pita pada 457 dan 640 cm⁻¹ berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Gao^[19], pita-pita raman tersebut bersesuaian dengan pita yang dimiliki titanate *nanotube*.



Gambar 4. Foto TEM dari kelompok kedua hasil proses hidrotermal kemudian dianil pada 300 °C selama 3 jam dan dilanjutkan dengan pasca hidrotermal selama 24 jam pada T = 80 °C (sampel F), 100 °C (sampel G), 120 °C (sampel H), dan 150 °C (sampel I)



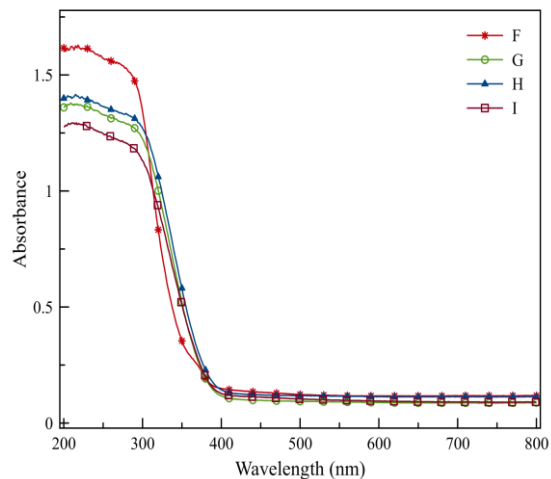
Gambar 5. Hasil Raman dari P25 Degussa dan *nanotubes* TiO₂ yang mengalami anil 300 °C selama 3 jam dilanjutkan pasca-hidrotermal pada T=150 °C selama 24 jam (Sampel I)

Pengaruh Temperatur Terhadap Sifat Optis Nanotubes TiO₂

Pada aplikasi sel surya, karakteristik elektrik dan optis memainkan peranan penting. Terkait hal ini, dilakukan karakterisasi UV-Visual Spektroskop dari sampel titania *nanotubes* yang dihasilkan. Diharapkan sampel titania *nanotubes* yang dihasilkan memiliki energi celah pita yang lebih kecil dari material ruahnya sehingga eksitasi yang dihasilkan mencapai optimal. Energi celah pita titania dilaporkan sebesar 3,2 eV untuk anatase dan 3,0 eV untuk rutile^[15]. Berikut di bawah ini hasil karakterisasi UV-Vis dari sampel

kelompok pertama yaitu sampel F, G, H dan I.

Untuk mendapatkan nilai energi celah pita dari masing-masing sampel, dapat dilakukan melalui pendekatan ekstrapolasi linear ke arah sumbu X. Energi celah pita yang dihasilkan sebagaimana pada Tabel 3.

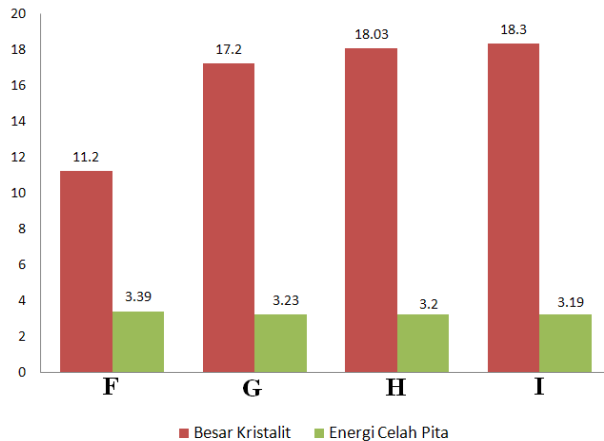


Gambar 6. Hasil uji UV-Vis dari kelompok kedua hasil proses hidrotermal kemudian dianil pada 300 °C selama 3 jam dan dilanjutkan dengan pasca hidrotermal selama 24 jam pada T= 80 °C (sampel F), 100 °C (sampel G), 120 °C (sampel H), dan 150 °C (sampel I)

Tabel 3. Energi celah pita sampel F, G, H dan I

Sampel	Energi Celah Pita (eV)
F	3,39
G	3,23
H	3,20
I	3,19

Dari hasil yang tertera pada tabel di atas dikaitkan dengan serangkaian proses yang mengiringi pada kelompok sampel ini (F-I), perilaku yang ditunjukkan memberikan indikasi yaitu peningkatan temperatur



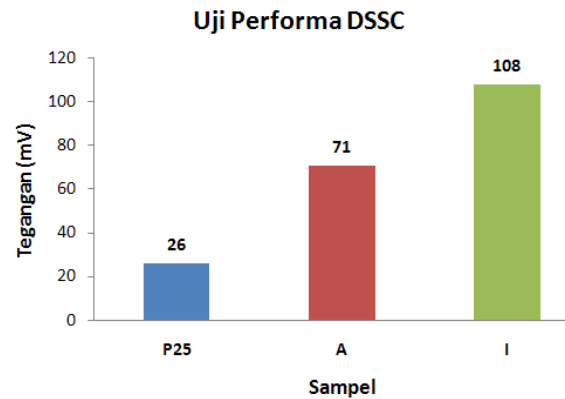
Gambar 7. Hubungan besar kristalit dan energi celah pita dari kelompok kedua hasil proses hidrotermal kemudian dianil pada 300 °C selama 3 jam dan dilanjutkan dengan pasca hidrotermal selama 24 jam pada T= 80 °C (sampel F), 100 °C (sampel G), 120 °C (sampel H), dan 150 °C (sampel I)

Dapat diambil kesimpulan bahwa peningkatan ukuran kristalit mengakibatkan berkurangnya energi celah pita. Terkait hal ini, Pellegrini *et al.*^[20] menyatakan bahwa fenomena ini berkaitan dengan *quantum confinement effect* pada material nano. Li *et al.*,^[21] menerangkan bahwa semikonduktor dengan struktur nano kristal memiliki salah satu karakteristik dimana energi celah pita menurun seiring dengan bertambahnya diameter kristal nano tersebut.

Uji Performa DSSC

Tahap terakhir dari penelitian ini adalah uji performa pada DSSC. Sampel yang diuji yaitu serbuk P25 berfungsi sebagai pembanding, sampel A dan I yang mewakili nilai ekstrim dari besar kristalit dan energi celah pita yang didapat. Hasil uji performa diperlihatkan pada Gambar 7 berikut.

pasca hidrotermal mengakibatkan berkurangnya energi celah pita. Hubungan besar kristalit dengan energi celah pita diperlihatkan pada Gambar 7 berikut.



Gambar 8. Hasil Uji Performa DSSC pada P25 Degussa, sampel A dan I

Berdasarkan diagram di atas, dapat diambil kesimpulan bahwa struktur dalam hal ini *nanotubes*, kristalinitas dan sifat optis mempengaruhi tegangan sirkuit terbuka yang dihasilkan. Dimana struktur *nanotubes* dengan kristalinitas tertinggi sekaligus energi celah pita terkecil memberikan aktivitas fotonik yang paling baik diwakili oleh sampel I yang menghasilkan tegangan sirkuit terbuka sebesar 108 mV.

KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah dilakukan fabrikasi titanate *nanotubes* dengan ukuran kristalit 8,06 nm menggunakan teknik hidrotermal, dengan bahan dasar TiO₂ P25 Degussa dan 30 mL NaOH 10 M. Perlakuan anil konvensional dapat memberikan peningkatan kristalinitas, namun beresiko kepada hancurnya struktur *tube*. Selanjutnya modifikasi pasca hidrotermal yang dilakukan memberikan peningkatan kristalinitas TiO₂ *nanotubes* dengan tetap mempertahankan struktur *tube*-nya. Hasil uji performa DSSC menunjukkan *nanotube* dengan

kristalinitas yang tinggi (18,30 nm) menunjukkan aktivitas fotonik terbaik diwakili dengan tegangan sirkuit terbuka tertinggi sebesar 108 mV.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] O'Regan, B. and M. Gratzel. 1991. „A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films". *Nature*. : 353, 6346, 737-740.
- [2] Flores, I.C., et al. 2007. „Dye-sensitized solar cells based on TiO₂ nanotubes and a solid-state electrolyte". *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. : 189, 2-3, 153-160.
- [3] Wongcharee, K. and V. Meeyoo. 2008. „Improvement of TiO₂ properties for dye-sensitized solar cell by hydrothermal and sol-gel processes, in Technology and Innovation for Sustainable Development Conference". Khon Kaen University, Thailand. : 485-488.
- [4] Hara, K., et al. 2000. „Highly efficient photon-to-electron conversion with mercurochrome-sensitized nanoporous oxide semiconductor solar cells". *Solar Energy Materials and Solar Cells*. : 64, 2, 115-134.
- [5] Ngamsinlapasathian, S., et al. 2005. „Single- and double-layered mesoporous TiO₂/P25 TiO₂ electrode for dye-sensitized solar cell". *Solar Energy Materials and Solar Cells*. : 86, 2, 269-282.
- [6] Adachi, M., et al. 2004. „Highly Efficient Dye-Sensitized Solar Cells with a Titania Thin-Film Electrode Composed of a Network Structure of Single-Crystal-like TiO₂ Nanowires Made by the "Oriented Attachment" Mechanism". *Journal of the American Chemical Society*. : 126, 45, 14943-14949.
- [7] Nosheen, S., F.S. Galasso, and S.L. Suib. 2009. „Role of Ti-O Bonds in Phase Transitions of TiO₂". *Langmuir*. : 25, 13, 7623-7630.
- [8] Ando, T., H. Matsumura, and T. Nakanishi. 2002. „Theory of ballistic transport in carbon nanotubes". *Physica B: Condensed Matter*. : 323, 1-4, 44-50.
- [9] Law, M., et al. 2005. „Nanowire dye-sensitized solar cells". *Nat Mater*. : 4, 6, 455-459.
- [10] Qiu, J., et al. 2007. „Fabrication and characterization of TiO₂ nanotube arrays having nanopores in their walls by double-template-assisted sol-gel Nanotechnology". : 18, 29, 1-5.
- [11] Hoyer, P. 1996. „Formation of a Titanium Dioxide Nanotube Array". *Langmuir*. : 12, 6, 1411-1413.
- [12] Ou, H.-H. and S.-L. Lo. 2007. „Review of titania nanotubes synthesized via the hydrothermal treatment: Fabrication, modification, and application". *Separation and Purification Technology*. : 58, 1, 179-191.
- [13] Hoda, S.H., et al. 2009. „Hydrothermal Preparation of Gd³⁺-Doped Titanate Nanotubes: Magnetic Properties and Photovoltaic Performance". *International Journal of Photoenergy*. : 1-8.
- [14] Morgado Jr, E., et al. 2006. „A study on the structure and thermal stability of titanate nanotubes as a function of sodium content". *Solid State Sciences*. : 8, 8, 888-900.
- [15] Ngamsinlapasathian, S., et al. 2004. „Highly efficient dye-sensitized solar cell using nanocrystalline titania containing nanotube structure". *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. : 164, 1-3, 145-151.
- [16] Cullity, B.D. Elements of X-ray diffraction. 1956, Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co.
- [17] A.B, M. 2007. „Band-gap determination from diffuse reflectance measurements of semiconductor films, and application to

- photoelectrochemical water-splitting". *Solar Energy Materials and Solar Cells.*: 91, 14, 1326-1337.
- [18] Kim, G.-S., et al. 2006. „Hydrothermal synthesis of titanate nanotubes followed by electrodeposition process". *Korean Journal of Chemical Engineering.* : 23, 6, 1037-1045.
- [19] Gao, T., H. Fjellvåg, and P. Norby. 2009. „Crystal Structures of Titanate Nanotubes: A Raman Scattering Study". *Inorganic Chemistry.* : 48, 4, 1423-1432.
- [20] Pellegrini, G., G. Mattei, and P. Mazzoldi. 2005., Finite depth square well model: Applicability and limitations". *Journal of Applied Physics.* : 97, 7, 073706-8.
- [21] Li, M. and J.C. Li. 2006. „Size effects on the band-gap of semiconductor compounds". *Materials Letters.* : 60, 20, 2526-2529.

RIWAYAT PENULIS

Alfian Ferdiansyah, lahir di Jakarta, S1 dan S2 Fak. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia, sedang melanjutkan studi S3 di IMTEK Micro Energy Harvesting Graduate School, University of Freiburg, Jerman. Bekerja sebagai Dosen tidak tetap di Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas.

