

## SEL FOTOVOLTAIK GENERASI KE-III: PENGEMBANGAN SEL FOTOVOLTAIK BERBASIS TITANIUM DIOKSIDA

Hari Sutrisno<sup>[1]</sup>

e-mail : sutrisnohari@uny.ac.id

<sup>[1]</sup>Jurusan Pendidikan Kimia, FMIPA, Universitas Negeri Yogyakarta

### Abstrak

Artikel ini bertujuan menjelaskan lapisan tipis generasi ke-III berbagai model sel fotovoltaik (sel surya) lapisan tipis generasi ke-III berbasis nanokristal TiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>-nanotubes dan quantum dot dan pengembangannya. Pengembangan sel fotovoltaik generasi ke-III menjadi prioritas untuk visi 2020 dari para saintis, dikarenakan sel fotovoltaik ini melewati batas perhitungan teoritik efisiensi enetrji Shockley-Queisser (efisiensi = 45-60 %) dengan biaya pembuatan yang murah. Pengembangan sel surya generasi ke-III dalam artikel ini dilakukan pada penambahan quantum dot sebagai sensitiser untuk semikonduktor nanokristal TiO<sub>2</sub> dan TiO<sub>2</sub>-nanotubes. Adanya quantum dot tersebut menyebabkan terjadinya peningkatan fotopotensial (photovoltage) dan fotoarus listrik (photocurrent). Peningkatan fotopotensial dihasilkan melalui fotokonverter dari elektron panas sebelum menjadi dingin, sedangkan peningkatan arus listrik terjadi karena elektron panas (hot e<sup>-</sup>) tersebut menjadi dingin membentuk dua atau lebih pasangan elektron-kekosongan yang selanjutnya dikenal dengan istilah multiple exciton generation (MEG). Nanopartikel yang digunakan memiliki morfologo nanotubes, sedangkan quantum dot yang digunakan terdiri dari CdS, InP dan ZnIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub>.

**Kata kunci** : sel fotovoltaik, titanium dioksida, generasi ke-III

### PENDAHULUAN

Krisis energi dan polusi merupakan dua masalah terbesar pada abad ini, oleh karena itu pemecahan masalah ini merupakan suatu misi utama dan mendesak untuk para saintis. Pemanfaatan energi pada peristiwa pasang surut air laut, angin dan matahari merupakan solusi yang tepat untuk mengatasi krisis energi mengingat energi tersebut tak terbatas keberadaannya. Pengembangan sel fotovoltaik (sel surya) merupakan salah satu bentuk pemecahan krisis energi tersebut, sedangkan fotodegradasi polutan berbahaya menjadi molekul-molekul kecil yang aman secara otomatis di lingkungan air dan udara merupakan pemecahan masalah polusi. Kedua penyelesaian tersebut merupakan bentuk penyelesaian yang sangat tepat dan prospektif secara ekonomi dikarenakan sel surya dan fotokatalisis memerlukan sumber energi dari sinar matahari yang merupakan sumber energi tak terbatas di alam.

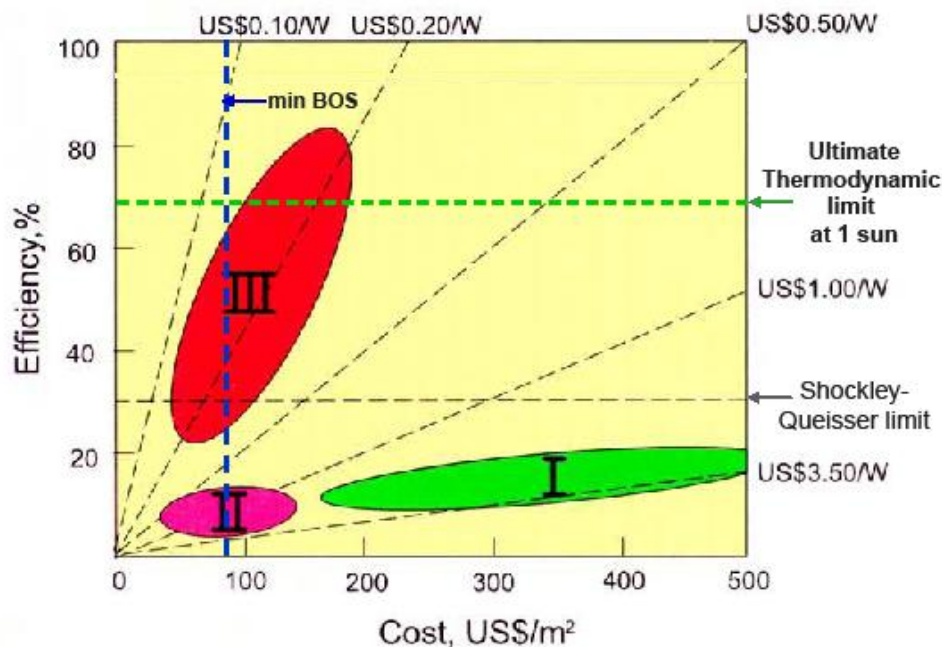
Titanium dioksida (TiO<sub>2</sub>) merupakan material yang menarik untuk pengembangan sel surya dan fotokatalis yang didasarkan atas fenomena fotoinduksi. Fenomena fotoinduksi terjadi karena TiO<sub>2</sub> mengabsorpsi energi foton ( $h\nu$ ) mengakibatkan terjadi transisi elektron dari pita valensi ke pita konduksi serta terbentuk kekosongan ( $h^+$ ). Elektron yang di pita konduksi dan kekosongan ( $h^+$ ) yang ada di pita valensi digunakan secara listrik untuk sel fotovoltaik, sedangkan secara kimia untuk fotokatalis. Dengan demikian dalam bidang energi, nanopartikel TiO<sub>2</sub> dapat diaplikasikan sebagai sel fotovoltaik berbasis pewarna (*Dye Sensitized Solar Cells/DSSC*) dan fotoelektrolisis air yang berkaitan dengan fotolektrokimia (O'regan & Grätzel, 1991; Grätzel, 2003; Grätzel, 2004; Grätzel, 2005). Dalam penyelesaian masalah polusi, kristal TiO<sub>2</sub> merupakan material pembersih otomatis permukaan yang berfungsi sebagai fotokatalis yang digunakan untuk pemurnian udara dan air (Rice & Raftery, 1999; Lu *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2008).

Kebutuhan sumber energi fosil semakin hari semakin bertambah seiring dengan kemajuan teknologi dan populasi manusia. Penggunaan energi nuklir juga dilakukan oleh beberapa negara untuk mencukupi kebutuhan energi. Namun dapat dipastikan bahwa sumber energi fosil dan nuklir merupakan sumber energi yang terbatas dan tak dapat diperbaharui. Oleh karena itu pengembangan sumber energi baru dan terbarukan mutlak diperlukan. Akhir-akhir ini, pengembangan sel fotovoltaik lapisan tipis begitu pesat seiring semakin berkurangnya sumber energi fosil. Ada tiga

tipe atau generasi sel fotovoltaik (Green, 2003):

- (1). **sel fotovoltaik generasi ke-I** (*silicon wafer-based photovoltaic cells*) yang terdiri semikonduktor monogap dari kristal tunggal silisium (Si) atau *poly-grain* Si,
- (2). **sel fotovoltaik generasi ke-II** (*thin film photovoltaic cells*) yang merupakan suatu sel fotovoltaik dengan teknologi lapisan tipis, terdiri dari bahan lapisan film tipis: silisium amorf, polikristalin silisium, CuInSe<sub>2</sub>, CuInGaS, CdTe, sel fotovoltaik berbasis pewarna (*Dye Sensitized Solar Cells/DSSC*) dan sel fotovoltaik organik,
- (3). **sel fotovoltaik generasi ke-III** (*advanced thin film photovoltaic cells*) merupakan sel fotovoltaik lapisan tipis yang lebih maju, terdiri dari: sel tandem multi celah (*multi-gap tandem cells*), sel surya pembawa elektron panas (*hot electron converters* atau *hot carrier converter cells*), sel surya pembentukan multi eksitasi (*multiple exciton generation solar cells*), sel fotovoltaik pita intermediat (*Intermediate band photovoltaics*), sel surya quantum dot (*quatum-dot solar cells*) dan sel termofotovoltaik (*thermophotovoltaic cells*).

Dari tipe atau generasi sel fotovoltaik tersebut di atas, pengembangan sel fotovoltaik generasi ke-III menjadi prioritas untuk visi 2020 dari para saintis, dikarenakan sel fotovoltaik ini melewati batas perhitungan teoritik efisiensi energi Shockley-Queisser (efisiensi = 45-60 %), dengan biaya pembuatan yang murah, sebagaimana pada Gambar 2 yang dinyatakan oleh Green (2003).



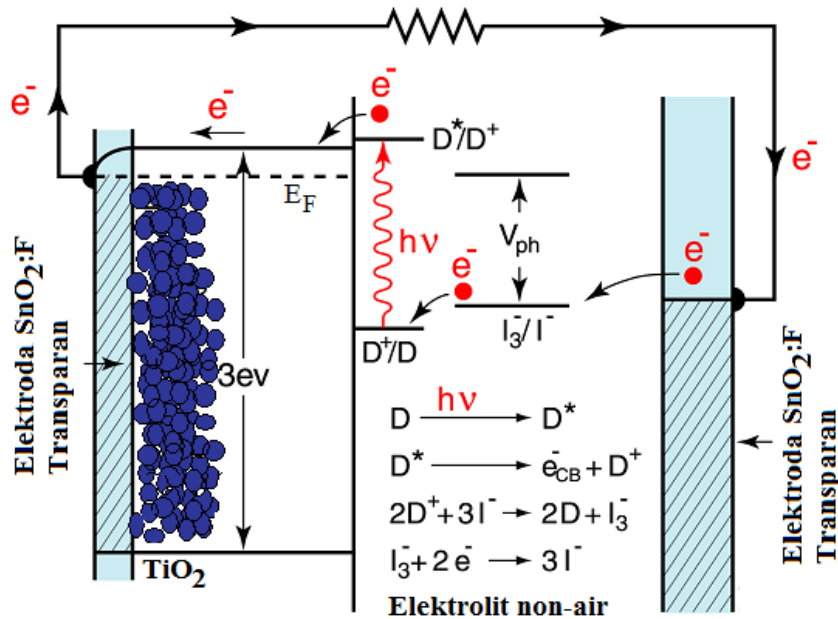
**Gambar 1.** Efisiensi dan biaya pembuatan sel fotovoltaik generasi ke- I, II dan III

Berdasarkan hal-hal di atas, artikel ini akan menjelaskan pengembangan sel fotovoltaik (sel surya) generasi ke-III yang berbasis lapisan tipis nanopartikel TiO<sub>2</sub>. Konsep sel fotovoltaik yang dikembangkan grup Brohan berdasarkan pembentukan pita antara (*intermediate band*) pada celah pita valensi dan pita konduksi dalam polimer sol-gel berbasis titanium oksida sehingga disebut sel fotovoltaik pita intermediat (*intermediate band photovoltaics*), sedangkan artikel ini berdasarkan *impact ionization* atau eksitasi elektron secara multipel yang dikenal dengan *multiple exciton generation (MEG)* yang ada dalam *quantum dot*.

## PEMBAHASAN

### Sel Fotovoltaik Berbasis Titanium Dioksida: Sel Fotovoltaik Generasi Ke-II

Sel fotovoltaik generasi ke-II yang menggunakan semikonduktor TiO<sub>2</sub> atau ZnO sebagai komponen semikonduktor yaitu sel fotovoltaik berbasis zat pewarna (*Dye Sensitized Solar Cells/DSSC*) atau sel Grätzel. Sel fotovoltaik ini dikembangkan di awal tahun 1990 oleh grup Grätzel (Gambar 1).



**Gambar 2.** Skema prinsip sel fotovoltaik berbasis zat pewarna (*Dye Sensitized Solar Cells*)

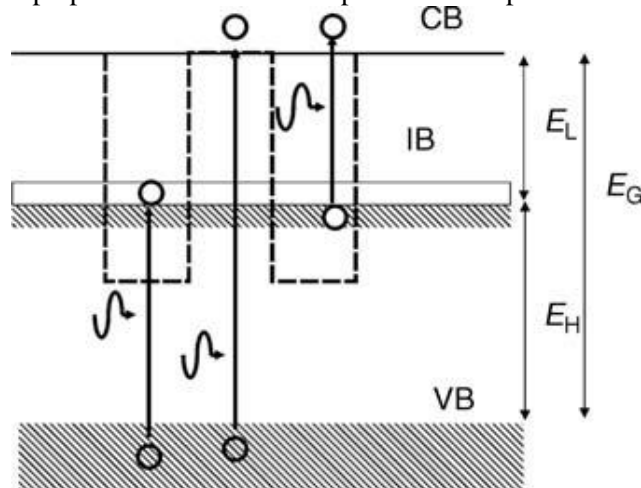
Transfer elektron pada sel fotovoltaik ini berdasarkan sensitifikasi suatu semikonduktor oleh suatu molekul berwarna (*dye*) memungkinkan terbentuk tingkat energi elektronik baru. Gambar 1 menampilkan skema fungsional suatu sel fotovoltaik berbasis zat pewarna atau sel Grätzel. Foton dengan energi  $h\nu$  yang mencukupi terabsorpsi oleh pewarna mengakibatkan elektron tereksitasi dari HOMO ke LUMO yang disimbolkan  $D(dye)$  menjadi  $D(dye)^*$ . Energi  $D(dye)^*$  terletak di atas pita konduksi dari semikonduktor tipe n. Selanjutnya elektron bergerak ke pita konduksi semikonduktor dan pewarna menjadi bermuatan positif,  $D(dye)^+$ . Setelah elektron bergerak atau bersirkulasi melewati elektroda, elektron bereaksi dengan elektrolit membentuk reaksi redoks  $I_3^-/I^-$ , dan kehadiran reduktor  $I^-$  dalam lingkungan pewarna memungkinkan reaksi cepat terbentuknya suatu keadaan stabil dari keadaan  $D(dye)^+$  menjadi  $D(dye)$ . Fenomena ini dapat berfungsi karena regenerasi pewarna jauh lebih cepat dari pada waktu rekombinasi muatan (Hagfeldt & Grätzel, 1995). Sel fotovoltaik berbasis zat pewarna (DSSC) atau sel Grätzel memiliki efisiensi energi pada skala laboratorium sebesar 7-11 %, sedangkan sel fotovoltaik organik memiliki efisiensi sekitar 5 %.

### Sel Fotovoltaik Berbasis Titanium Dioksida: Sel Fotovoltaik Generasi Ke-III

Sel fotovoltaik generasi ke-III menggunakan konsep fisika baru yang efisiensinya memungkinkan melewati efisiensi energi Queisser-Shockley dari semikonduktor monocel. **Sel fotovoltaik generasi ke-III** (*advanced thin film photovoltaic cells*) merupakan sel fotovoltaik lapisan tipis yang lebih maju, terdiri dari: sel tandem multi celah (*multi-gap tandem cells*), sel surya pembawa elektron panas (*hot electron converters* atau *hot carrier converter cells*), sel surya pembentukan multi eksitasi (*multiple exciton generation solar cells*), sel fotovoltaik pita intermediat (*Intermediate band photovoltaics*), sel surya quantum dot (*quantum-dot solar cells*) dan sel termofotovoltaik (*thermophotovoltaic cells*).

Semikonduktor *quantum dot* yang digunakan dalam sel fotovoltaik generasi ke-III memiliki efisiensi energi fotokonversi tinggi karena dua proses: (1). pembentukan eksitasi multiple (*multiple excitation*) dari foton tunggal dan (2). pembentukan pita antara (*intermediate bands*) pada celah pita dan terbentuknya pasangan elektron-kekosongan pada sub-pita. Peningkatan potensial dalam sel fotovoltaik dilakukan pembentukan pita antara (*intermediate-band cells*), material absorber merupakan semikonduktor dengan celah yang besar tersisipkan tingkat energi intermediat. Struktur sel ini memungkinkan menyerap energi dengan berbagai panjang gelombang: foton-foton yang memiliki energi lebih tinggi digunakan untuk eksitasi elektron dari pita valensi (*valence band/VB*) ke pita konduksi (*conduction band/CB*) dalam semikonduktor, sedangkan foton-foton dengan

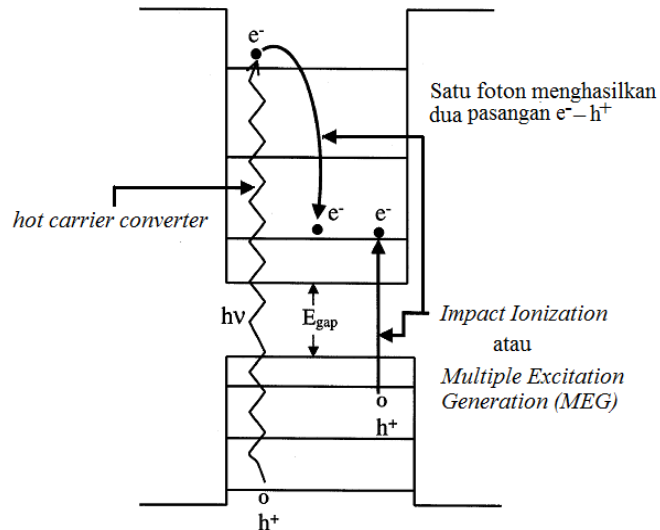
energi lebih rendah untuk eksitasi elektron dari pita valensi (VB) ke pita intermediat (*intermediate band/IB*) atau dari pita intermediat (IB) ke pita konduksi (CB). Akibat dari hal tersebut, sistem ini akan menghasilkan arus yang lebih tinggi. Skema transisi elektron dalam sel fotovoltaik pembentukan pita antara tersebut dapat dilihat pada Gambar 2. Agar sel ini berfungsi dengan baik, pita antara harus terisi secara parsial. Apabila pita antara terisi penuh elektron, perpindahan elektron tidak akan terjadi dari pita valensi ke pita antara, sebaliknya apabila pita antara kosong elektron akibatnya tidak ada perpindahan elektron dari pita antara ke pita konduksi.



**Gambar 3.** Struktur pita suatu sel pita intermediat (*Intermediate-Band Cells*)

Material yang diketahui terbentuk dari penyisipan pita antara dalam pita yang luas dari suatu *quantum dot* oleh suatu gap yang lebih rendah yaitu semikonduktor GaAs tersisipi InAs. Tipe material ini sangat sulit dihasilkan dalam skala besar. Studi teoritik secara intensif telah dilakukan untuk mengidentifikasi material kristalin yang memiliki suatu pita antara yaitu material tipe  $Ga_4P_3M$  (dengan  $M =$  unsur transisi), tetapi teknik dan metode sintesisnya dalam pengembangan. Sel fotovoltaik tipe ini memiliki efisiensi energi sekitar 40,7 % dari sel fotovoltaik tipe GaAs yang dikembangkan oleh Grup Spectrolab pada tahun 2006.

Ada dua cara untuk mencegah kehilangan termalisasi akibat suatu *quantum dot* mengabsorpsi foton yaitu peningkatan fotopotensial (*photovoltage*) dan peningkatan fotoarus listrik (*photocurrent*). Peningkatan fotopotensial dihasilkan melalui fotokonverter dari elektron panas sebelum menjadi dingin, sedangkan peningkatan arus listrik terjadi karena elektron panas (*hot  $e^-$* ) tersebut menjadi dingin membentuk dua atau lebih pasangan elektron-kekosongan yang selanjutnya dikenal dengan istilah *multiple exciton generation (MEG)* (Gambar 3). Proses yang terakhir ini dalam semikonduktor sering disebut *impact ionization* yang merupakan proses inversi Auger dimana satu dari dua pasangan elektron-kekosongan melakukan rekombinasi untuk menghasilkan tunggal pasangan elektron-kekosongan yang memiliki energi tinggi (Luque, Marti & Nojik, 2007).



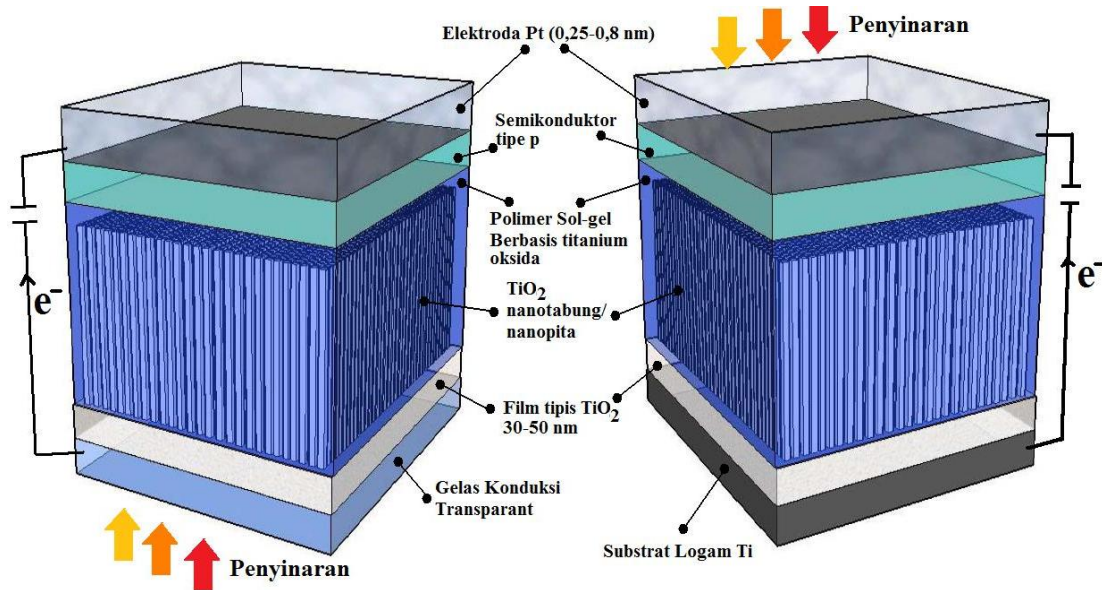
**Gambar 4.** Peningkatan pasangan elektron ( $e^-$ ) – kekosongan ( $h^+$ ) melalui *hot carrier converter* dan *impact ionization* atau *multiple excitation generation (MEG)* dalam *quantum dot*

#### **Pengembangan Sel Fotovoltaik generasi ke-III Berbasis Titanium Dioksida**

Penggunaan nanopartikel  $\text{TiO}_2$  sebagai bahan untuk sel fotovoltaik telah dilakukan pertama kali oleh grup Grätzel dari EPFL, Swis sejak tahun 1990 yang dikenal dengan sel Grätzel atau sel fotovoltaik berbasis zat pewarna (*Dye Sensitized Solar Cells/DSSC*) (O’regan & Grätzel, 1991). Sel fotovoltaik ini terdiri lapisan film tipis dari bahan: semikonduktor, sensitizer (bahan pewarna), larutan elektrolit ( $\text{I}_3^-/\text{I}^-$ ) dan elektroda. Semikonduktor yang sering digunakan yaitu  $\text{TiO}_2$  (anatase) atau ZnO. Penelitian tentang DSSC berkembang pesat hingga saat ini (Durr *et al.*, 2005; Law *et al.*, 2005; Tan & Wu, 2006; Yamaguchi *et al.*, 2007; Qin *et al.*, 2008) dan efisiensi yang dapat dicapai sampai saat sebesar 11 %.

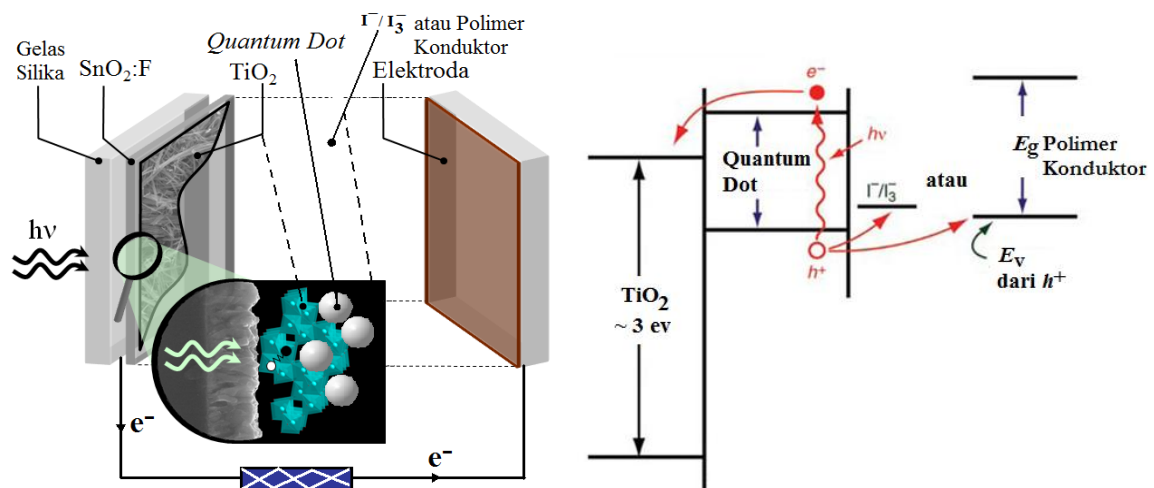
Akhir-akhir ini, Grup Brohan dari IMN Jean Rouxel-Université de Nantes, Perancis, menggunakan nanopartikel  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ -nanotube dan -nanoribbon serta polimer sol-gel berbasis titanium oksida untuk mengembangkan fotobaterai dan sel fotofoltaik generasi ke-III yaitu sel fotofoltaik pita intermediat (*Intermediate band photovoltaics*) (Sutrisno, 2008). Skema sel fotofoltaik yang dikembangkan tersebut terlihat pada Gambar 4. Analog dengan sel Grätzel (DSSC) walaupun secara konseptual sangat berbeda, sel fotofoltaik ini menggunakan semikonduktor nanopartikel  $\text{TiO}_2$  dan  $\text{TiO}_2$ -nanotube atau  $\text{TiO}_2$ -nanoribbons, sedangkan sensitizernya berupa polimer sol-gel berbasis titanium oksida.





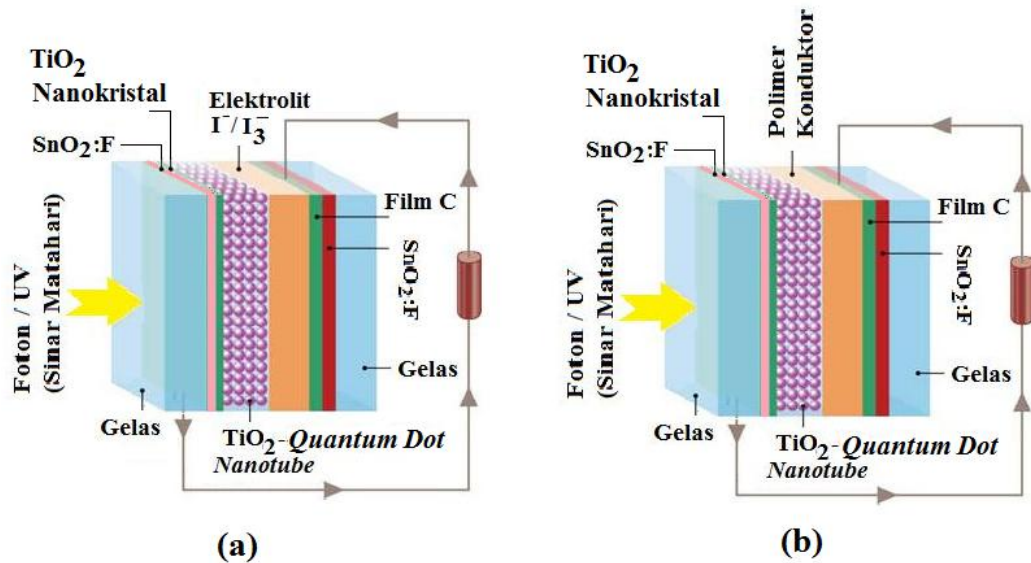
**Gambar 4.** Sel fotovoltaik pita intermediaat (*Intermediate band photovoltaics*) berbasis polimer sol-gel « titanium oksida »: (a) *Front-side illuminated photovoltaic cell* dan (b). *Back-side illuminated foil-based photovoltaic cell*

Skema garis besar model sel fotovoltaik generasi ke-III yang dikembangkan dapat dilihat pada Gambar 5 dan 6. Semikonduktor  $\text{TiO}_2$  yang digunakan ada dua macam yaitu nanokristal  $\text{TiO}_2$  dan  $\text{TiO}_2$ -nanotubes. Transfer elektron dari pita valensi ke pita konduksi pada sel fotovoltaik ini berdasarkan sensitifikasi *quantum dot* melalui *multiple excitation generation* (MEG) atau *impact ionization* oleh energi foton. Selanjutnya elektron bergerak dari pita valensi *quantum dot* ke pita konduksi  $\text{TiO}_2$ -nanotubes dan nanokristal  $\text{TiO}_2$ . Setelah elektron bergerak atau bersirkulasi melewati elektroda, elektron bereaksi dengan elektrolit membentuk reaksi redoks  $\text{I}_3^-/\text{I}^-$  atau bergerak ke pita valensi polimer konduktor mengakibatkan rekombinasi kekosongan. Kehadiran  $\text{I}^-$  atau polimer konduktor menyebabkan terjadinya rekombinasi kekosongan ( $h^+$ ) menghasilkan *quantum dot* menjadi stabil.



**Gambar 5.** Skema garis besar model fotovoltaik generasi ke-III yang dikembangkan: **Sel Surya Lapisan Tipis Titanium Dioksida-Nanotubes tersensitifkan Quantum Dot**

Model sel fotovoltaik generasi ke-III (6 model) dan susunan detail lapisan tipis komponen penyusun sel fotovoltaik generasi ke-III yang dikembangkan berbasis quantum-dot dan titanium dioksida *nanotube* oleh penulis dapat dilihat pada Gambar 6.



**Gambar 6.** Susunan lapisan tipis dalam model fotovoltaik generasi ke-III yang dikembangkan dengan penggunaan elektrolit rekombinasi kekosongan ( $h^+$ ) (a).  $I^-/I_3^-$  atau (b). polimer konduktor (poly (2-methoxy,5-(2'-ethyl)-hexyloxy-p-phenylenevinylene) (*Quantum dot*: CdS, InP dan  $ZnIn_2S_4$ )

## PENUTUP

Sel surya generasi ke-III berbasis nanokristal titanium dioksida *nanotubes* dan *quantum dot* dikembangkan dalam 6 model. Konsep yang dikembangkan pada sel surya ini berdasarkan transfer elektron dari pita valensi ke pita konduksi pada TiO<sub>2</sub> berdasarkan sensitifikasi *quantum dot* melalui *multiple excitation generation* (MEG) atau *impact ionization* oleh energi foton. Titanium dioksida yang digunakan memiliki morfologi *nanotubes*, sedangkan quantum dot yang dipakai yaitu CdS, InP dan  $ZnIn_2S_4$ .

## DAFTAR PUSTAKA

- Durr, M., Schmid, A., Obermaier, M., Rosselli, S., Yasuda, A. & Nelles, G. (2005). Low-Temperature Fabrication of Dye-Sensitized Solar Cells by Transfer of Composite Porous Layers. *Nature Materials*. 4: 607-611.
- Grätzel, M. (2003). Dye-sensitized Solar Cells. *Journal Photochemistry Photobiology C: Photochemistry Review*. 4:145-153.
- Grätzel, M. (2004). Conversion of Sunlight to Electric Power by Nanocrystalline Dye-sensitized Solar Cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 164: 3-14.
- Grätzel, M. (2005). Solar Energy Conversion by Dye-Sensitized Photovoltaic Cells. *Inorganic Chemistry*. 44: 6841-6851.
- Green, M.A (2003). *Third Generation Photovoltaics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Hagfeldt, A. & Grätzel, M. (1995). Light-Induced Redox Reactions in Nanocrystalline Systems.. *Chemical Review*. (95): 49-68.
- Law, M., Greene, L.E., Johnson, J.C., Saykally, R. & Yang, P. (2005). Nanowire Dye-Sensitized Solar Cells. *Nature Materials*. 4: 455-459.
- Lu, C-H., Wu W-H., & Kale, R.B. (2008). Microemulsion-Mediated Hydrothermal Synthesis of Photocatalytic TiO<sub>2</sub> Powders. *Journal of Hazardous Materials*. 154: 649-654.
- Luque, A., Martí, A., & Nozik, A.J. (2007). Solar Cells Based on Quantum Dots: Multiple Exciton Generation and Intermediate Bands. *MRS Bulletin*. 32: 236-241.

- Nojik, A.J. (2002). Quantum Dot Solar Cells. *Physica E*. 14: 115-120.
- O'regan, B. & Grätzel, M. (1991). A low-cost high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films. *Nature*. 353, 737-740.
- Qin, H., Wenger, S., Xu, M., Gao, F., Jing, X., Wang, P., Zakeeruddin, S.M. & Grätzel, M. (2008). An Organic Sensitizer with a Fused Dithienothiophene Unit for Efficient and Stable Dye-Sensitized Solar Cells. *Journal of America Chemical Society*. 130: 9202-9203.
- Ratanatawanate, C., Xiong, C. & Balkus Jr., K. J. (2008). Fabrication of PbS Quantum Dot Doped TiO<sub>2</sub> Nanotubes. *ACS Nano*. 2 (8): 1682-1688.
- Rice, C.V. & Raftery, D. (1999). Photocatalytic Oxidation of Trichloroethylene using TiO<sub>2</sub> Coated Optical Microfibers. *Journal of Chemical Society Chemical Communication*. 895-896.
- Shah, M.S.A.S., Nag, M., Kalagara, T., Singh, S. & Manorama, S.V.. (2008). Silver on PEG-PU-TiO<sub>2</sub> Polymer Nanocomposite Films: An Excellent System for Antibacterial Applications. *Chemistry of Material*. 20: 2455–2460
- Smestad, G.P. & Grätzel, M. (1998). Demonstrating Electron Transfer and Nanotechnology: A Natural Dye-Sensitized Nanocrystalline Energy Converter. *Journal of Chemical Education*. 75(6): 752-756.
- Sutrisno, H. (2008). *Preparasi Titanium Oksida-Nanopartikel melalui Rekayasa Titanium Akuo-Oksida Klorida dengan Proses Kimia Larutan Basa*. FMIPA-UNY : Laporan Penelitian Mandiri.
- Sutrisno, H. (2008). *Ox-Ti-Photovoltaique III<sup>ème</sup> génération (MIB) et Photobatterie*. Post-doctorale Programme. IMN Jean Rouxel-Université de nantes, France
- Tan, B. & Wu, Y. (2006). Dye-Sensitized Solar Cells Based on Anatase TiO<sub>2</sub> Nanoparticle/Nanowire Composites. *Journal of Physical Chemistry B*. 110: 15932-15938.
- Yamaguchi, T., Tobe, N., Matsumoto, D. & Arakawa, H. Highly Efficient Plastic Substrate Dye-Sensitized Solar Cells Using a Compression Method For Preparation of TiO<sub>2</sub> Photoelectrodes. *Chemical Communication*. 4767–4769.
- Zhao, Y., Qiu, X. & Burda, C. (2008). The Effects of Sintering on the Photocatalytic Activity of N-Doped TiO<sub>2</sub> Nanoparticles. *Chemistry Material*. 20: 2629–2636