

## Uji karakterisasi I-V Sel Surya Tersensitisasi Pewarna Alami Chotimah<sup>1)</sup>, Indriana Kartini<sup>2)</sup>, Ngadiwyana<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Physics Department, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Gadjah Mada University, P.O. Box BLS 21, Yogyakarta, Indonesia 55281

<sup>2)</sup> Chemistry Department, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Gadjah Mada University, P.O. Box BLS 21, Yogyakarta, Indonesia 55281

<sup>3)</sup> Chemistry Department, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Diponegoro University, Semarang, Indonesia

### Abstrak

Sel surya tersensitisasi zat warna (dye sensitised solar sel = DSSC) telah berhasil dibuat dengan memanfaatkan ekstraksi zat warna dari bagian tumbuh-tumbuhan (buah pohon Joho, kulit batang pohon Tingi dan Tegeran, buah Trembilu, buah Duwet dan kulit buah manggis). Sel surya berbasis konsep fotoelektrokimia ini tersusun atas 3 bagian yaitu elektroda kerja (*working electrode* = WE), elektroda lawan (*counter electrode* = CE) dan larutan elektrolit. Elektroda kerja merupakan lapis tipis  $TiO_2$  pada substrat kaca transparan berkonduksi yang mengadsorp zat warna sebagai sensitiser. Elektroda lawan merupakan substrat kaca yang dilapisi emas. Larutan elektrolit yang digunakan adalah pasangan redoks  $I/I_3^-$  dalam pelarut organik..

Konfirmasi fotoaktivitas sensitiser alam ditentukan melalui pengujian sel surya menggunakan solar simulator (*white-light testing*). Dalam penelitian ini dilakukan karakterisasi I-V pada keadaan gelap dan terang pada masing-masing sel dengan sensitiser yang berbeda-beda secara tunggal maupun dalam modul yang tersusun dari 3 sel secara seri. Diperoleh hasil bahwa ekstrak zat warna tersebut mampu mensensitisasi semikonduktor  $TiO_2$  dengan rapat arus terbangkitkan antara  $0,12 - 3,52 \cdot 10^{-3} \text{ mA/cm}^2$ ; tegangan rangkaian terbuka antara  $0,05-0,15 \text{ V}$  dengan efisiensi antara  $5,625 \times 10^{-6} - 7,73 \times 10^{-4} \%$ . Modul sel surya rangkaian seri 3 sel tunggal dengan sistem *counter electrode* tertata zig-zag memberikan fotoaktivitas lebih tinggi dibanding sistem sel surya tunggalnya. Modul sel surya mampu menghasilkan rapat arus antara  $1,24 - 4,40 \cdot 10^{-3} \text{ mA/cm}^2$ ; tegangan rangkaian terbuka antara  $0,26 - 0,40 \text{ V}$  dengan efisiensi antara  $6,38 \times 10^{-4} - 2,20 \times 10^{-3} \%$ .

Kata kunci : DSSC, lapisan tipis  $TiO_2$ , fotoaktivitas, karakterisasi I-V

### I. PENDAHULUAN

Dengan semakin bertambahnya kebutuhan energi di dunia sementara ketersediaan sumber energi utama BBM semakin menipis, maka pemanfaatan tenaga matahari sebagai sumber energi pembangkit listrik perlu terus ditingkatkan. Penelitian dibidang solar sel, terus berkembang. Dimulai dari generasi pertama berbasis silikon dan germanium, kemudian bahan semikonduktor oksida dan generasi ketiga berupa solar sel dari bahan organik yang berupa *Dye-Sensitised Solar Cells* (DSSC).

Sel surya lapis tipis  $TiO_2$  tersensitisasi zat warna merupakan divais untuk konversi cahaya tampak menjadi energi listrik berdasarkan konsep sensitisasi bahan semikonduktor celah lebar (*wide bandgap semiconductor*). Konsep sensitisasi memungkinkan diperolehnya arus listrik dengan memanfaatkan energi yang lebih rendah dari energi celah bahan semikonduktor yaitu bagian cahaya tampak sinar matahari.

Pengembangan sistem sel surya berbasis sensitiser zat warna lebih banyak berpusat pada pencarian zat warna sebagai sensitiser untuk meningkatkan respon spektra dari sel surya. Sel Gratzel pertama menggunakan nanopartikel  $TiO_2$  yang tersensitisasi kompleks Ru(II) yaitu  $Ru(II)(4,4'-dikarboksi-2,2'-bipiridin)_2(NCS)_2$  yang mempunyai puncak serapan pada 550 nm. Sistem sel surya ini menunjukkan efisiensi konversi sebesar 7 % - 10 % (O'Regan dan Gratzel, 1991). DSSC dengan menggunakan sensitiser kompleks logam memiliki efisiensi yang cukup tinggi berkisar antara 2,6 – 11%. Namun demikian, penggunaan kompleks logam ini melibatkan proses pemurnian dan produksi yang rumit sehingga biaya produksi yang dibutuhkan mahal.

Penggunaan kompleks logam transisi Ru sebagai sensitiser membutuhkan lapisan semikonduktor minimal setebal 10  $\mu\text{m}$  agar menyerap radiasi matahari yang cukup untuk mencapai efisiensi konversi energi sebesar 10 % (Spitler *et al.*, 2002). Selain itu, penggunaan kompleks-kompleks logam ini bisa menimbulkan masalah bagi lingkungan karena sebagian besar kompleks logam bersifat toksik.

Hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa sel surya berbasis lapis tipis titania mesopori mampu memberikan efisiensi konversi energi sebesar ~5% menggunakan sensitiser ruthenium kompleks, cis-NCS<sub>2</sub>Bis(2,2'-bipyridil-4,4'dicarboxylate) Ru(II) (*N3-Ru red dye*) dengan waktu adsorpsi 20 jam (Kartini, 2004).

Secara umum, keaktifan pewarna alami diperoleh dari senyawa antosianin yang bertanggung jawab atas timbulnya warna dari rentang warna merah sampai biru (Hancock, 1997; Bentley, 1960). Maksud dan tujuan penelitian ini adalah mempelajari potensi penggunaan bahan alami (kulit batang pohon tinggi dan tegeran, buah joho, buah trembilu, buah duwet dan kulit buah manggis) yang melimpah di negara kita sebagai bahan sensitiser dalam pembuatan DSSC. Ekstrak buah Juwet sendiri telah dibuktikan bersifat fotoaktif untuk sel surya (Garcia, dkk., 2003b).

Dengan mengamati karakteristik I-V sel surya dapat diketahui performa DSSC dari besarnya efisiensi sel surya yang telah dibuat.

## II. METODE PENELITIAN

Sel surya yang dibuat merujuk pada sel Gratzel tersusun dari 3 komponen utama yaitu elektroda kerja (*working electrode*), elektroda lawan (*counter electrode*) dan larutan elektrolit (Kartini, 2004).

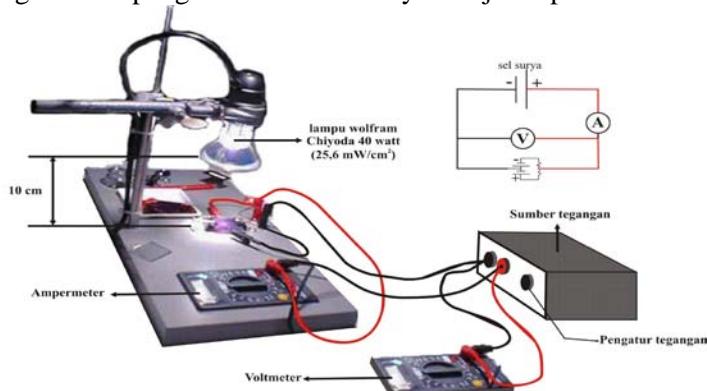
Elektroda kerja merupakan lapis tipis TiO<sub>2</sub> pada substrat kaca transparan berkonduksi yang mengadsorp zat warna sebagai sensitiser. Pelapisan TiO<sub>2</sub> dilakukan dengan teknik *spray coating*. Proses sensitisasi dilakukan dengan melakukan perendaman lapisan dalam larutan zat warna. Kajian sensitisasi dilakukan dengan membandingkan pola serapan elektronik ekstrak zat warna dengan serapan elektronik zat warna teradsorb pada lapis tipis titania.

Elektroda lawan merupakan substrat kaca transparan berkonduksi yang dilapisi emas. Proses pelapisan dilakukan dengan metode evaporasi kawat emas dalam vacum evaporator. Larutan elektrolit yang digunakan adalah pasangan redoks I/I<sub>3</sub><sup>-</sup> dalam pelarut organik.

### Karakterisasi I-V sel surya

#### Sel tunggal

Kinerja sel surya lapis dipelajari melalui pengukuran arus dengan variasi tegangan. Rangkaian pengukuran pada konstruksi sel surya sistem sandwich dilakukan menggunakan power supply DC, multimeter digital dan lampu bolam reflektor merk Chiyoda 40 watt (dengan jarak lampu – sel surya 10 cm). Pengukuran arus dan tegangan pada sel surya dilakukan pada kondisi gelap dan terang. Diagram alat pengukuran I-V sel surya disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alat pengukuran I-V sel surya

Dari kurva I-V dihitung efisiensi konversi daya (*power conversion efficiency, PCE*) DSSC dengan menggunakan persamaan 1 sebagai berikut:

$$PCE = \frac{V_{oc} J_{sc} FF}{P_{inc}} \quad (1)$$

dimana  $P_{inc}$  adalah rapat daya yang datang,  $V_{oc}$  nilai tegangan rangkaian terbuka (perpotongan kurva dengan sumbu x) dan  $J_{sc}$  merupakan rapat arus hubung singkat (perpotongan kurva dengan sumbu y) dan  $FF$  merupakan *fill factor* (faktor pengisian).

Nilai  $FF$  dihitung menggunakan karakteristik pada kuadran ke 4 (persamaan 2).

$$FF = \frac{V_m J_m}{V_{oc} J_{sc}} \quad (2)$$

### Modul (3 sel surya)

Kajian konstruksi modul dilakukan secara teoritik mengkaji dokumen paten USPTO No 6,469,243 (2002) tentang *Dye-sensitizing solar cell, method for manufacturing dye-sensitizing solar cell and solar cell module* dan USPTO No 6,657,119 (2003) tentang *Electric connection of electrochemical and photoelectrochemical cells*. Analisis desain dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi laboratorium serta ketersediaan material lokal. Konstruksi yang paling memungkinkan dipilih untuk uji fotoaktivitas skala laboratorium.

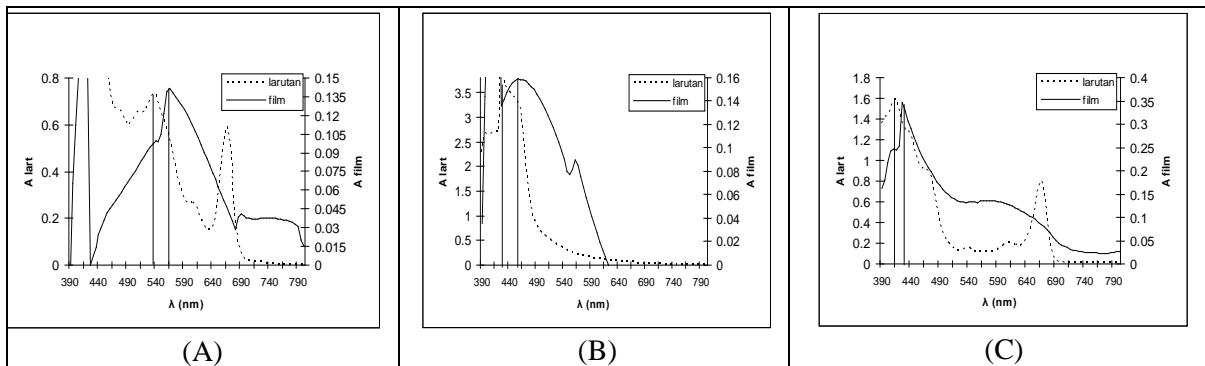
## III. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

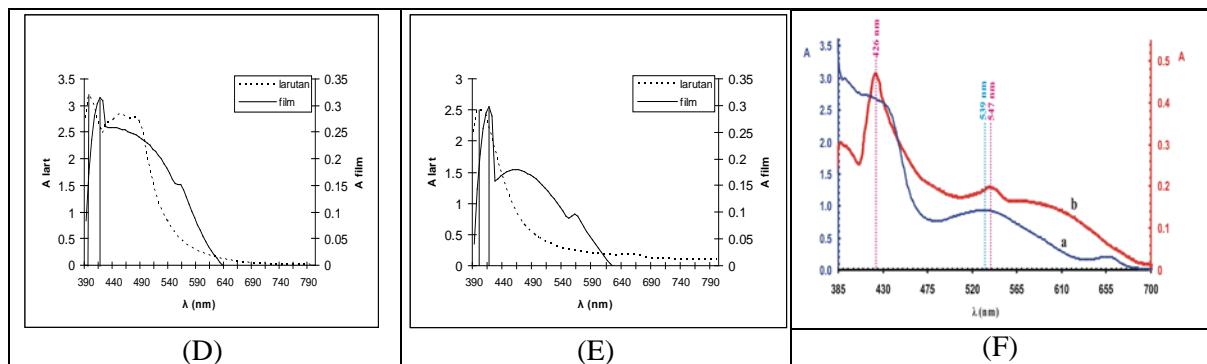
### a. Elektroda kerja $TiO_2$ yang tersensitisasi

Untuk melihat keberhasilan bahan pewarna mensensitisasi  $TiO_2$  dilihat pergeseran merah pada pola serapan elektronik sistem  $TiO_2$  – zat warna pada daerah cahaya tampak (Garcia 2003). Adanya pergeseran merah mengindikasikan terjadinya injeksi elektron dari keadaan tereksitasi zat warna menuju pita konduksi  $TiO_2$ . Menurut Smestad *et al.* (1998) zat warna yang dapat digunakan sebagai sensitiser adalah zat warna yang dapat teradsorp dan memiliki gugus fungsional yang dapat berikatan secara kimia dengan permukaan  $TiO_2$  serta memiliki tingkat energi yang tepat untuk melakukan injeksi elektron ke pita konduksi semikonduktor.

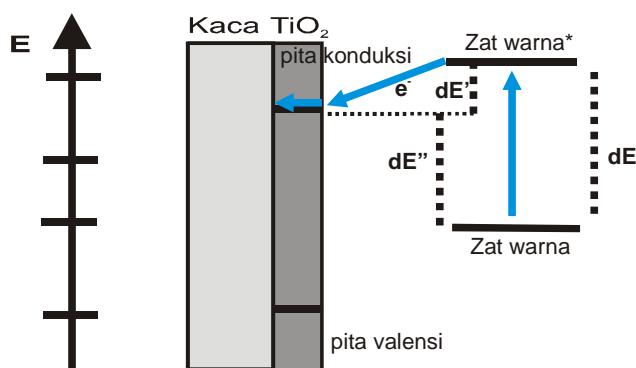
Hasil analisis dengan spektrofotometer DRUV-Vis di Lab.Kimia Anorganik FMIPA UGM pada panjang gelombang 350-900 nm ditampilkan pada Gambar 2.

Terlihat dari data tersebut, bahan yang diteliti setelah disensitisasi pada lapisan  $TiO_2$  menunjukkan pergeseran serapan elektronik zat warna ke arah merah. Dengan asumsi pergeseran serapan elektronik ke arah merah disebabkan karena terjadinya proses injeksi elektron menuju pita konduksi  $TiO_2$  dan terbentuknya ikatan antara  $TiO_2$ -zat warna, bukan karena pengaruh media/pelarut ataupun faktor lain. Pergeseran merah pada pola serapan elektronik sistem  $TiO_2$ -zat warna juga dapat diakibatkan adanya proses transfer elektron dari keadaan tereksitasi zat warna menuju pita konduksi  $TiO_2$ . Proses transfer elektron dari keadaan tereksitasi zat warna menuju pita konduksi  $TiO_2$  disajikan pada Gambar 3.





Gambar 2 Spektra serapan elektronik ekstrak zat warna dan sistem lapis tipis  $\text{TiO}_2$  - zat warna dari ekstrak (A) buah duwet, (B) buah trembilu, (C) kayu tegeran, (D) kayu tinggi, (E) buah joho, dan (F) kulit luar buah Manggis (a dalam pelarut etanol, b pada lapis tipis  $\text{TiO}_2$ )



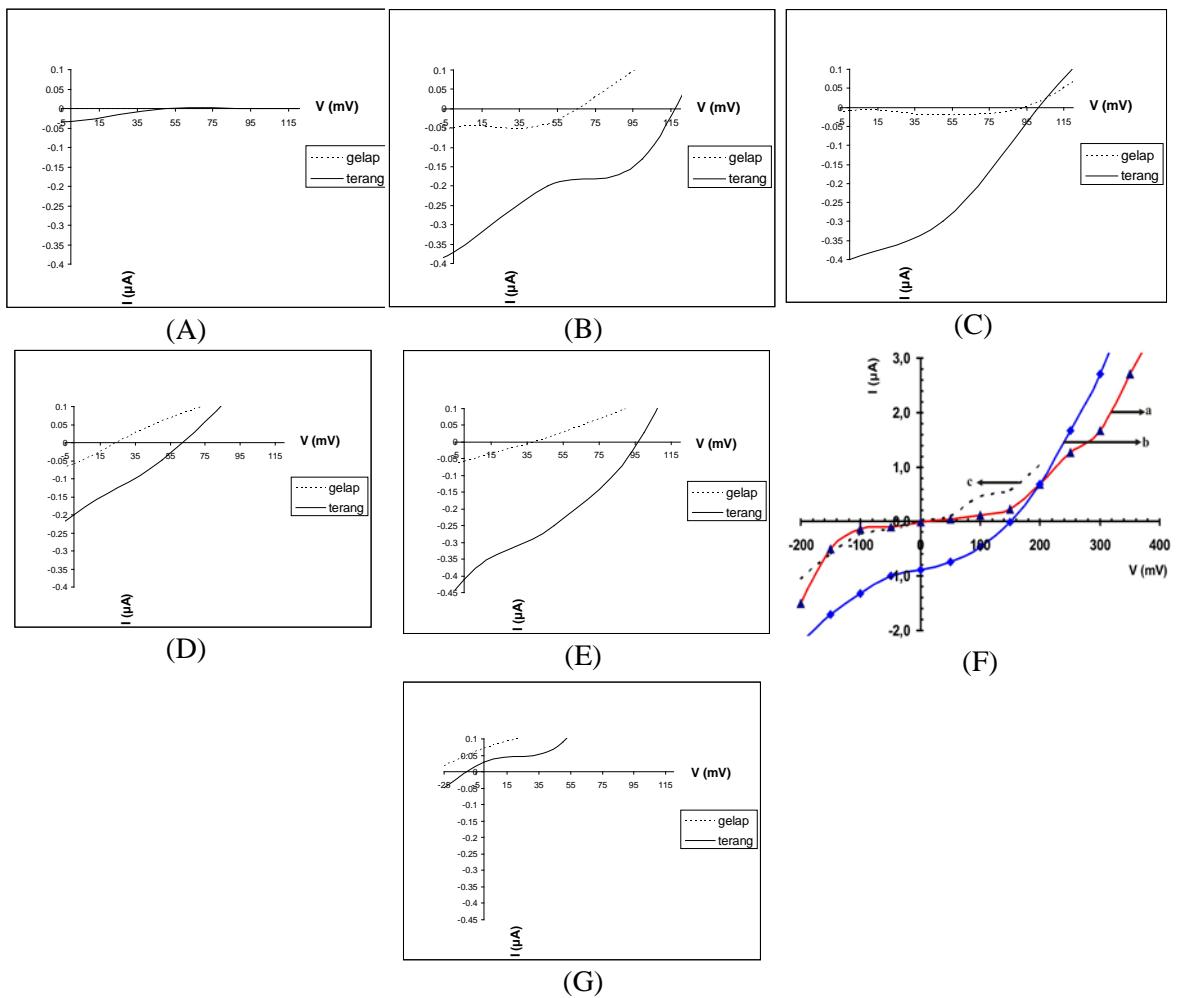
Gambar 3. Sensitisasi  $\text{TiO}_2$  oleh zat warna ( diambil dari Kartini, 2004)

Perbedaan tingkat energi keadaan dasar dengan keadaan tereksitasi zat warna adalah tertentu sehingga panjang gelombang yang diserap untuk melakukan transisi elektronik juga memiliki nilai tertentu. Ketika zat warna dalam sistem larutan dianalisis dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis, energi yang diserap untuk melakukan transisi elektron adalah sebesar  $dE$  yang memiliki nilai panjang gelombang tertentu. Sedangkan dalam sistem  $\text{TiO}_2$ -zat warna ketika dikenai dengan cahaya yang energinya sesuai maka akan terjadi transisi elektron menuju keadaan tereksitasi, namun karena tidak stabil elektron akan terinjeksi dengan cepat menuju pita konduksi  $\text{TiO}_2$  yang memiliki energi lebih rendah dengan melepaskan kembali sejumlah energi ( $dE'$ ). Menurut Hagfeldt dan Grätzel (2000) proses injeksi elektron dari keadaan tereksitasi menuju pita konduksi  $\text{TiO}_2$  berlangsung sangat cepat berkisar antara 50 fs hingga 1,7 ps.

Energi yang diserap pada panjang gelombang tertentu yang energinya sesuai dengan energi eksitasi zat warna sebagian dilepaskan kembali dengan cepat dalam proses injeksi elektron, sehingga seolah-olah sistem  $\text{TiO}_2$ -zat warna hanya menyerap energi sebesar  $dE''$  yang nilainya lebih rendah. Energi yang diserap pada panjang gelombang yang nilainya setara dengan  $dE$  sebagian dilepaskan kembali sehingga nilai serapan/absorbansi pada panjang gelombang tersebut menjadi lebih kecil dari yang sebenarnya, akibatnya serapan pada panjang gelombang tersebut tidak menjadi serapan optimum pada pola serapan elektronik. Hal ini akan menyebabkan terjadinya pergeseran panjang gelombang optimum pada pola serapan elektronik sistem  $\text{TiO}_2$ -zat warna.

### b. Karakterisasi I-V sel surya tunggal

Hasil pengukuran I-V pada potensial bias masing-masing sel pada keadaan gelap dan terang dinyatakan dalam gambar 4. Dari gambar 4 terlihat bahwa kurva I-V sel surya yang dibuat menunjukkan bekerjanya divais sebagai sebuah sel surya. Kinerja sel surya ini dapat dievaluasi dari harga *Fill Factor* dan efisiensinya. Data tentang harga  $J_{sc}$ ;  $V_{oc}$  dan  $FF$  setiap sistem sel surya dengan luas permukaan aktif  $0,5 \times 0,5 \text{ cm}^2$  dan intensitas sumber ( $P_{input}$ ) sebesar  $25,6 \text{ mW/cm}^2$  disajikan pada tabel 1. ( Kartini, 2006)



Gambar 4. Kurva I-V sel surya : A. duwet; B. trembilu; C. tegeran; D. tingi; E. joho; F. manggis (a terang, b gelap, c tanpa sensitiser), dan G.  $\text{TiO}_2$  tanpa sensitiser

Tabel 1. Karakteristik sel surya dengan sensitiser zat warna alam

Kode	Zat warna alam	$J_{sc} (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	$V_{oc} (\text{V})$	FF	$\eta (\%)$
A	Duwet	0,12	0,05	0,24	$5,62^5 \cdot 10^{-6}$
B	Trembilu	1,44	0,12	0,35	$2,36 \cdot 10^{-4}$
C	Tegeran	1,60	0,10	0,38	$2,38 \cdot 10^{-4}$
D	Tingi	0,80	0,07	0,21	$4,59 \cdot 10^{-5}$
E	Joho	1,60	0,10	0,31	$1,94 \cdot 10^{-4}$
F	Manggis	3,52	0,15	0,37	$7,73 \cdot 10^{-4}$

Luas area aktif sel surya  $0,25 \text{ cm}^2$  dengan daya masukan  $P_{in} = 25,6 \text{ mW/cm}^2$

Berdasarkan data Tabel 1 diperoleh fakta bahwa semua sistem sel surya dapat menghasilkan arus listrik meskipun kecil. Adanya arus yang terbaca menunjukkan bahwa sensitiasi pada lapis tipis  $\text{TiO}_2$  oleh zat warna alami yaitu transfer elektron dari keadaan tereksitasi zat warna menuju pita konduksi  $\text{TiO}_2$  dalam sistem lapis tipis  $\text{TiO}_2$  - zat warna alami dapat berlangsung. Fenomena ini diperkuat dengan membandingkan kurva I-V sistem sel surya yang tersensitasi zat warna alami dengan sistem sel surya tanpa sensitiser zat warna. Pada sistem sel surya tak tersensitasi menunjukkan pola kurva I-V yang cenderung menghasilkan arus positif. Hal ini menunjukkan bahwa tidak terjadi aliran elektron dari kutub negatif ke positif yaitu dari elektroda kerja ke elektroda lawan pada sel surya.

Efisiensi yang dihasilkan pada penelitian ini sangat kecil yaitu antara  $5,63 \cdot 10^{-6} \text{ \%}$ - $7,73 \cdot 10^{-4} \text{ \%}$  dengan efisiensi terbesar diperoleh pada sensitiser tegeran ( golongan pewarna batik) dan kulit

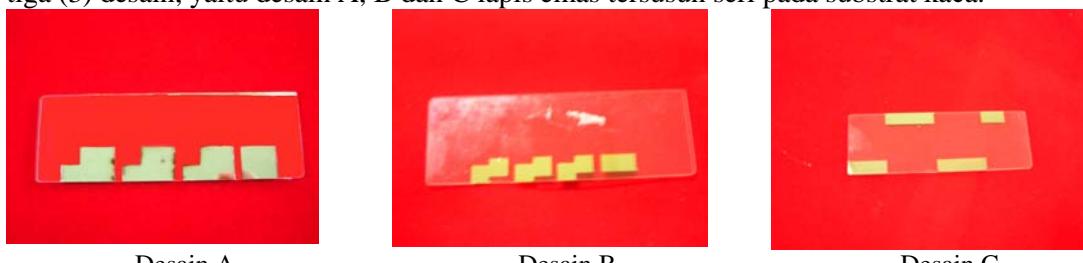
buah manggis (golongan buah) buah. Hal ini sesuai dengan data pergeseran pita serapan pada tabel 1, dimana sistem tegeran diharapkan mempunyai efisiensi yang paling besar karena mempunyai pergeseran pita serapan yang paling besar diantara sistem lainnya. Efisiensi terendah terjadi pada sensitiser duwet. Duwet mempunyai nilai intensitas serapan yang sangat kecil dibandingkan sensitiser yang lain. Intensitas serapan yang kecil menunjukkan jumlah cahaya tampak yang terserap oleh sistem semakin kecil sehingga kinerja sel surya juga akan berkurang. Selain itu bisa juga disebabkan oleh sempitnya pergeseran merah yang terjadi pada spektra elektronik sistem lapis tipis-duwet jika dibandingkan dengan zat warna lain terutama pada pergeseran merah  $\lambda_{tepi}$ . Dapat disimpulkan pula bahwa semua zat warna yang digunakan pada penelitian ini memberikan model sensitisasi melalui pembentukan ikatan kimia dengan  $TiO_2$ . Sensitisasi melalui pembentukan ikatan kimia akan menghasilkan pergeseran merah yang lebar baik pada  $\lambda_{maks}$  ataupun  $\lambda_{tepi}$ .

Rendahnya rapat arus yang dibangkitkan oleh sel surya diperkirakan karena belum optimumnya konstruksi sel karena keterbatasan ketersediaan material dan teknologi di laboratorium. Beberapa keterbatasan yang teridentifikasi dan belum ditemukan pemecahan permasalahannya meliputi: 1) penggunaan etilen glikol sebagai pelarut pasangan redoks, 2) penggunaan lapis emas sebagai pengganti platina untuk bahan katalis pada elektroda lawan, dan 3) penggunaan kertas saring sebagai bahan insulator dan penahan larutan elektrolit dari penguapan pada sistem *sandwich* sel surya. Larutan elektrolit yang dipakai sebaiknya dilarutkan dalam pelarut asetonitril. Hambatan yang muncul kemudian disebabkan sifat asetonitril yang sangat volatil. Sel surya dengan pelarut asetonitril tidak mampu bertahan untuk pengukuran I-V pada penelitian ini. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan etilen glikol sebagai pelarut larutan elektrolit. Masalah kedua lebih disebabkan mahalnya harga Pt jika digunakan sebagai lapis elektroda lawan. Berasumsi pada fungsi kerja (*work function*) yang setara antara emas (Au) dan platina (Pt) maka pada penelitian ini digunakan emas yang telah dimurnikan sebagai bahan pelapis elektroda lawan dengan teknik evaporasi. Adanya kenyataan rendahnya harga arus terukur memberikan kemungkinan bahwa meskipun Au mempunyai fungsi kerja setara dengan Pt, namun diperkirakan bahwa kemampuan katalisasi Au jauh lebih rendah dibanding Pt sebagai pembawa ion-ion larutan elektrolit. Pembuatan lapis platina menggunakan asam heksakloroplatinat yang dilarutkan dalam etanol anhidrous diharapkan mampu memecahkan persoalan ini, namun pembuatan larutan tersebut memerlukan ruang hampa udara untuk mencegah Pt teroksidasi oleh oksigen atmosferik. Pemakaian kertas saring diduga menyumbang berkurangnya laju aliran elektron dari hasil reaksi redoks menuju elektroda kerja.

Selain itu konstruksi pengukuran yang belum sempurna, pembuatan kontak dan ketersediaan meter yang peka dapat menjadi faktor kecilnya arus terukur, Kontak listrik yang kurang baik bisa menurunkan efisiensi sel surya. Dalam penelitian ini kontak listrik yang tidak efektif melalui penjepit buaya memberikan kemungkinan rendahnya arus yang terukur.

### c. Karakterisasi I-V modul sel surya ( 3 buah sel)

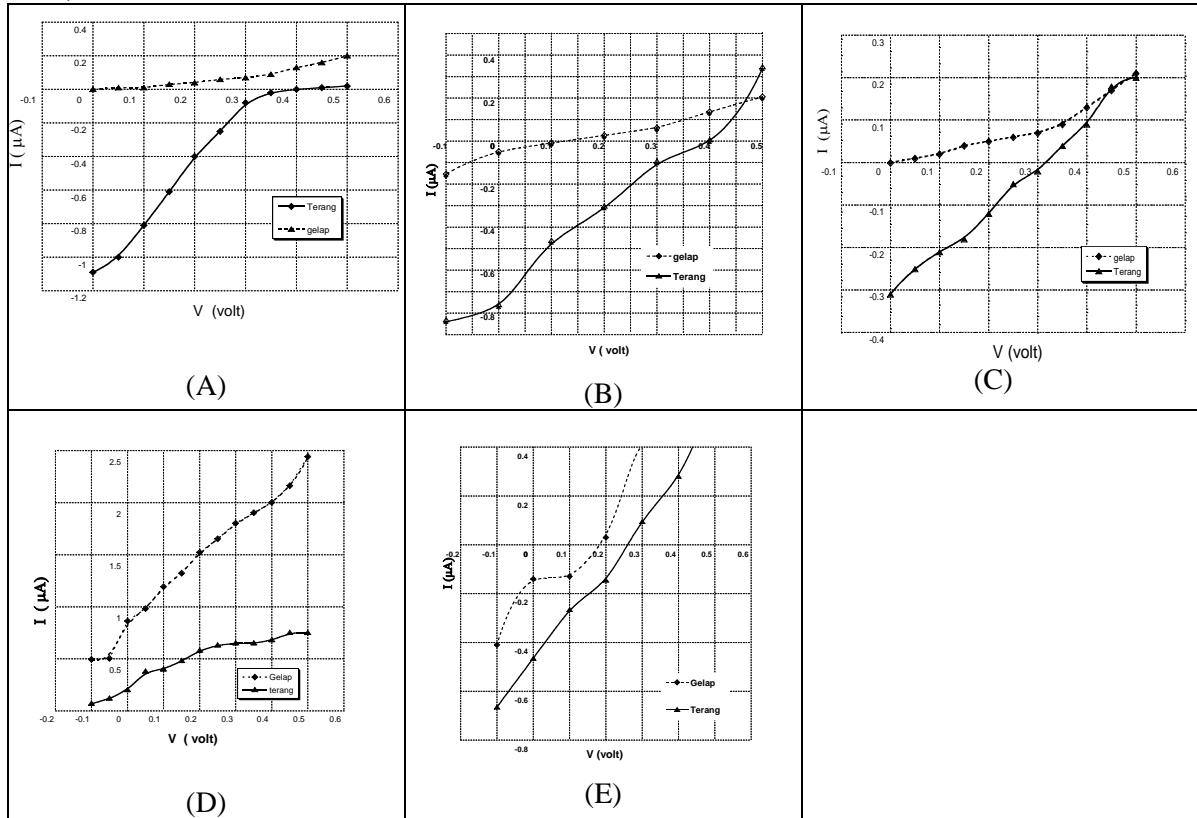
Oleh karena itu, berangkat dari pemahaman konstruksi secara umum dari kajian dokumen paten sebelumnya mengenai koneksi listrik dalam sel surya DSSC maka dilakukan kajian desain elektroda lawan yang tersusun seri dalam satu lembar substrat konduktif. Gambar 5 menyajikan tiga (3) desain, yaitu desain A, B dan C lapis emas tersusun seri pada substrat kaca.



Gambar 5. Desain elektroda lawan modul dengan 3 sel surya yang dipasang seri

Saat diujicobakan dalam bentuk *sandwich* dengan elektrode kerja desain A dan B mengalami beberapa kali “short”, terjadi kontak antara emas dan kaca konduktif (FTO). Oleh karena itu, pada tahap penelitian selanjutnya dipilih desain C

Kurva I-V serta karakter modul sel surya tersensitisasi zat warna rangkaian seri disajikan secara berurutan pada gambar 6 dan tabel 2. Dari gambar 6, nampak bahwa semua modul bekerja dengan baik menghasilkan arus, kecuali modul sel surya tersensitisasi zat warna alam ekstrak Joho. Kurva I-V sel surya tersensitisasi Joho memberikan karakter I-V bahan logam dan tidak menunjukkan sistem dioda sel surya. Oleh karena itu, karakter sel surya Joho tidak bisa ditentukan. Sementara modul sel surya tersensitisasi zat warna ekstrak Manggis belum dilakukan ( Kartini, 2006)



Gambar 6 Kurva I-V modul seri model zig-zag dengan komponen 3 sel surya DSSC zat warna alam (A) Duwet, (B) trembilu, (C) tingi, (D) joho dan (E) tegeran

Tabel 2 Perbandingan karakter sel surya antara modul sel surya berbasis lapis tipis  $TiO_2$  tersensitisasi sensitiser alam rangkaian seri dan sel tunggalnya

Sensitiser alam	Jsc ( $\mu A/cm^2$ ) .		Voc (V)		FF (%)		$\eta (%)$	
	Sel tunggal	Modul	Sel tunggal	Modul	Sel tunggal	Modul	Sel tunggal	Modul
Duwet	0,12	4,40	0,05	0,40	24,00	21,00	$5,62^5 \cdot 10^{-6}$	$2,20 \cdot 10^{-3}$
Trembilu	1,44	3,04	0,12	0,40	35,00	20,00	$2,36 \cdot 10^{-4}$	$1,45 \cdot 10^{-3}$
Tegeran	1,60	1,88	0,10	0,26	38,00	25,00	$2,38 \cdot 10^{-4}$	$7,27 \cdot 10^{-4}$
Tingi	0,80	1,24	0,07	0,32	21,00	27,00	$4,59 \cdot 10^{-5}$	$6,38 \cdot 10^{-4}$
Joho	1,60	n.a	0,10	n.a	31,00	n.a	$1,94 \cdot 10^{-4}$	n.a
Manggis	3,52	n.a	0,15	n.a	37,50	n.a	$7,73 \cdot 10^{-4}$	n.a

n.a = not applicable

Luas area aktif sel surya  $0,25 cm^2$  dengan daya masukan ( $P_{input}$ ) =  $16,8 mW/cm^2$

Dari data Tabel 2 tampak bahwa fotoaktivitas konstruksi sel surya tersusun seri relatif lebih tinggi dibandingkan fotoaktivitas sel tunggalnya, meskipun saat efisiensinya berada pada orde yang sama ( $10^4$ ). Hal ini menunjukkan bahwa konstruksi modul mampu meningkatkan fotoaktivitas sel surya tunggal. Rapat arus dan tegangan rangkaian terbuka yang dibangkitkan sistem seri lebih tinggi dibandingkan sel tunggalnya meskipun hubungannya tidak mempunyai pola matematika tertentu (tidak linier). Sensitiser duwet dan trembilu bahkan mempunyai harga  $V_{OC}$  mendekati sel Gratzel. Hal ini menunjukkan bahwa beda tingkat energi Fermi bahan semikonduktor terhadap tingkat energi pasangan redoks larutan elektrolit yang digunakan pada konstruksi seri mendekati harga konstruksi sistem sel Gratzel (Nazeeruddin *et al.*, 2001) yang menggunakan koloidal  $TiO_2$  dan pasangan redoks  $LiI/I_2$  dalam pelarut asetonitril. Sementara itu, rapat arus yang dibangkitkan jauh lebih kecil, akibatnya efisiensi global sel surya yang diperoleh juga menjadi lebih kecil. Rendahnya arus yang dibangkitkan disebabkan banyak hal yang saling berkaitan. Hal ini terefleksi dari harga FF yang relatif rendah, yaitu di bawah 50%. FF merupakan parameter sel surya yang memberikan informasi kualitas konstruksi komponen sel surya secara keseluruhan.

#### IV. SIMPULAN , SARAN DAN REKOMENDASI

Dari analisis antara kurva serapan elektronik dan karakteristik I-V sel surya diperoleh kenyataan bahwa adanya serapan elektronik pada rentang cahaya tampak yang lebar memberikan potensi ditangkapnya cahaya matahari lebih banyak sehingga berpotensi menaikkan efisiensi sel surya. Karakter serapan elektronik zat warna yang mencakup daerah cahaya tampak lebih lebar lebih disukai sebagai karakter sensitiser dalam sistem DSSC, dan dipenuhi oleh ekstrak dari bahan yang diteliti. Meskipun demikian, fotoaktivitas tidak hanya bergantung pada lebarnya karakter serapan elektronik. Konfirmasi fotoaktivitas sensitiser alam ditentukan melalui pengujian sel surya. Diperoleh hasil bahwa ekstrak zat warna tersebut mampu mensensitisasi semikonduktor  $TiO_2$  dengan rapat arus terbangkitkan antara  $0,12 - 3,52 \cdot 10^{-3} \text{ mA/cm}^2$ ; tegangan rangkaian terbuka antara  $0,05-0,15 \text{ V}$  dengan efisiensi antara  $5,625 \times 10^{-6} - 7,73 \times 10^{-4} \%$ . Modul sel surya rangkaian seri 3 sel tunggal dengan sistem *counter electrode* tertata zig-zag memberikan fotoaktivitas lebih tinggi dibanding sistem sel surya tunggalnya. Modul sel surya mampu menghasilkan rapat arus antara  $1,24 - 4,40 \cdot 10^{-3} \text{ mA/cm}^2$ ; tegangan rangkaian terbuka antara  $0,26 - 0,40 \text{ V}$  dengan efisiensi antara  $6,38 \times 10^{-4} - 2,20 \times 10^{-3} \%$ .

Untuk meningkatkan efisiensi sel surya dan modulnya perlu kajian lebih lanjut tentang :

1. kajian kuantitatif hubungan antara jumlah zat warna teradsorp pada lapis tipis  $TiO_2$  dengan rapat arus yang dibangkitkan.
2. kajian konstruksi sel yang paling optimum untuk sistem DSSC menggunakan redoks larutan elektrolit.
3. kajian konstruksi modul paralel atau kombinasi.

#### V. DAFTAR PUSTAKA

- Garcia, C. G., Polo, A. S., Murakami Iha, N. Y., *Photoelectrochemical solar cell using extract of Eugenia jambolana, Lam as a natural sensitizer*, An. Acad. Bras. Cienc. , 2003b, 75, 163-165.
- Hagfeldt, A. and M. Gratzel, *Molecular photovoltaics*. Acc. Chem. Res, 2000. **33**: p. 269-277.
- Hancock, M., 1997, *Potential for colourants from plant sources in England & Wales*, st0106, Arable crops & horticulture division, Adas boxworth, Cambridge
- Kartini, I., Chotimah, Ngadiwiyana. 2006, Pembuatan sel surya berbasis lapis tipis titania mesopori dengan memanfaatkan sensitiser alami Indonesia , Laporan RUT XII TA 2006.
- Kartini, I., 2004, *Synthesis and Characterisation of Mesostructured Titania for Photoelectrochemical Solar Cells*, PhD Thesis, Chemical Engineering, The University of Queensland, Australia.
- Nazeeruddin, M.K., P. Pechy, T. Renouard, S.M. Zakeeruddin, R. Humphry-Baker, P. Comte, P. Liska, L. Cevey, E. Costa, V. Shklover, L. Spiccia, G.B. Deacon, C.A. Bignozzi, and M. Gratzel, *Engineering of efficient panchromatic sensitizers for nanocrystalline  $TiO_2$ -based solar cells*. J. Am. Chem. Soc., 2001. 123: p. 1613-1624.
- O'Regan, B. and M. Gratzel, *A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal  $TiO_2$  film*, Nature, 1991. 353: 737-739
- Smestad, G.P. and Gratzel, M., 1998, Demonstrating Electron Transfer and Nanotechnology : A Natural Dye-Sensitized Nanocrystalline Energy Converter, *J. Chem. Educ.*, 75, 752-756.
- Spitler, Mark, T., Ehret, Anne, Stuhl, Louis, S., 2002, *Spectral Sensitization of Nanocrystalline Solar Cells*, United States Patent 6, 359, 211.