

## PENGGUNAAN EKSTRAK ANTOSIANIN KOL MERAH SEBAGAI FOTOSENSITIZER PADA SEL SURYA TiO<sub>2</sub> NANOKRISTAL TERSENSITISASI DYE

Akhiruddin Maddu, Mahfuddin Zuhri, dan Irmansyah

Departemen Fisika, FMIPA, Institut Pertanian Bogor, Bogor 16680, Indonesia

E-mail: [akhirmaddu@ipb.ac.id](mailto:akhirmaddu@ipb.ac.id); [akhirmaddu@yahoo.com](mailto:akhirmaddu@yahoo.com)

---

### Abstrak

Telah dipabrikasi sel surya TiO<sub>2</sub> nanokristal padat tersensitisasi *dye* menggunakan ekstrak antosianin dari kol merah sebagai fotosensitizer. Sel surya dibentuk dengan struktur sandwich, dimana dua elektroda mengapit elektrolit polimer yang mengandung kopel redoks I<sup>-</sup>/I<sub>3</sub><sup>-</sup>. Salah satu elektroda, yaitu elektroda kerja berupa lapisan TiO<sub>2</sub> pada substrat kaca berlapis bahan TCO (transparent conducting oxide) disensitisasi dengan *dye* antosianin sebagai donor elektron dalam sistem sel surya ini. Elektroda lain berupa lempengan karbon sebagai elektroda lawan. Elektrolit gel berbasis PEG (polyethylene glycol) mengandung kopel redoks I<sup>-</sup>/I<sub>3</sub><sup>-</sup> digunakan sebagai pengganti elektrolit cair pada sel fotoelektrokimia ini. Dua sel yang dipabrikasi memiliki luas 1 cm<sup>2</sup> direndam dengan *dye* antosianin masing-masing selama 1 jam dan 24 jam. Sel-sel ini diuji dengan penyinaran menggunakan lampu halogen 24 Watt dengan intensitas 4 mW/cm<sup>2</sup> pada jarak 30 cm. Hasil pengujian sel-sel ini memperlihatkan karakteristik I-V yang ideal dengan parameter keluaran: tegangan rangkaian buka (V<sub>OC</sub>) 500 mV, arus rangkaian pendek (ISC) 5,6 μA dan 7,2 μA untuk masing-masing sel, *fill factor* (ff) 48% untuk kedua sel, konversi energi (η) 0,023% dan 0,055% masing-masing untuk sel yang direndam dengan *dye* selama 1 jam dan 24 jam.

### Abstract

**The use of Red Cabbage's anthocyanine extract as a photosensitizer on a Dye-Sensitized Nanocrystalline TiO<sub>2</sub> Solar Cell.** A solid-state dye-sensitized nanocrystalline TiO<sub>2</sub> solar cell utilizing anthocyanin extract from red cabbage as photosensitizer was fabricated. The solar cell was formed in sandwich structure, which two electrodes sandwiching polymer electrolyte containing a redox couple (I<sup>-</sup>/I<sub>3</sub><sup>-</sup>). One of the electrodes, namely working electrode, TiO<sub>2</sub> layer on TCO (transparent conducting oxide) coated glass substrate was sensitized with anthocyanin dye as electron donor in the system. Another electrode was a carbon sheet as a counter electrode. Gel electrolyte based on PEG (polyethylene glycol) containing a redox couple (I<sup>-</sup>/I<sub>3</sub><sup>-</sup>) used instead of liquid electrolyte in this photoelectrochemical cell. Two fabricated cells have an active area of 1 cm<sup>2</sup> were soaked with anthocyanine dye for 1 hr and 24 hrs, respectively. The cells were tested by irradiation with halogen lamp of 24 Watt with intensity 4 mW/cm<sup>2</sup> at a distance 30 cm. The testing results of the cells show an ideal I-V characteristic with output parameters: open circuit voltage (V<sub>OC</sub>) of 500 mV, short circuit current (I<sub>SC</sub>) of 5,6 μA and 7,2 μA for each cells, fill factor (FF) of 48% for both cells, energy conversion (η) of 0.023 % and 0.055 % for the cells with 1 hr and 24 hrs dye soaked, respectively.

*Keywords: Dye-sensitized solar cell, TiO<sub>2</sub> electrode, Natural dye, Anthocyanine, Polymer electrolyte*

---

### 1. Pendahuluan

Sel surya TiO<sub>2</sub> tersensitisasi *dye* dikembangkan sebagai konsep alternatif piranti fotovoltaik konvensional (sel surya *p-n* silikon). Beberapa keuntungan sistem sel surya tersensitisasi *dye* ini adalah proses pabrikasinya

lebih mudah dan sederhana tanpa menggunakan peralatan canggih dan mahal sehingga dapat ditekan biaya pembuatannya, disamping itu bahan dasarnya mudah diperoleh di pasaran dan relatif lebih murah [1-3]. Sistem sel surya ini pertama kali dikembangkan oleh Gratzel *et.al.* sehingga disebut juga sel Gratzel. Efisiensi

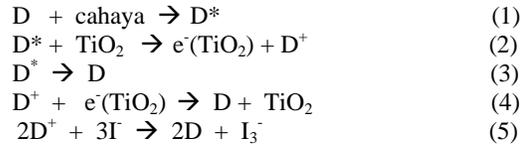
konversi yang dihasilkan dari sel surya TiO<sub>2</sub> tersensitisasi *dye* telah mencapai 10-11% [4,5].

Sejauh ini *dye* yang digunakan sebagai sensitizer dapat berupa *dye* sintesis maupun *dye* alami. *Dye* sintesis umumnya menggunakan organik logam berbasis ruthenium kompleks, *dye* sintesis ini cukup mahal. Sedangkan *dye* alami dapat diekstrak dari bagian-bagian tumbuhan seperti daun, bunga atau buah. Berbagai jenis ekstrak tumbuhan telah digunakan sebagai fotosensitizer pada sistem sel surya tersensitisasi *dye*. Sebuah kelompok peneliti di Jepang, Minoura *et.al.* [6] telah mencoba lebih dari dua puluh jenis *dye* alami dari ekstrak tumbuhan sebagai fotosensitizer pada sistem sel surya ini, diantaranya kol merah, kunyit, teh hijau, dan sebagainya. Kelompok lain dari Brazil, Iha *et.al.* [7] juga intensif mengembangkan sel surya berbasis *dye* alami, selain itu Smestad *et.al.* [8] juga telah menguji beberapa jenis *berry* seperti strawberry dan blackberry sebagai fotosensitizer pada sistem sel surya tersensitisasi *dye*. Ekstrak *dye* atau pigmen tumbuhan yang digunakan sebagai fotosensitizer berupa ekstrak klorofil [9], karoten [10] atau antosianin [11].

Sel surya TiO<sub>2</sub> tersensitisasi *dye* terdiri dari lapisan nanokristal TiO<sub>2</sub> berpori sebagai fotoanoda, *dye* sebagai fotosensitizer, elektrolit redoks dan elektroda lawan (katoda) yang diberi lapisan katalis [12]. Sel surya tersensitisasi *dye* berbentuk struktur *sandwich*, dimana dua elektroda yaitu elektroda TiO<sub>2</sub> tersensitisasi *dye* dan elektroda lawan terkatalisasi mengapit elektrolit membentuk sistem sel fotoelektrokimia. Berbeda dengan sel surya *p-n* silikon, pada sel surya tersensitisasi *dye* cahaya foton diserap oleh *dye* yang melekat (*attached*) pada permukaan partikel TiO<sub>2</sub> yang bertindak sebagai donor elektron dan berperan sebagai pompa fotoelektrokimia. Elektron-elektron dari level HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) dieksitasi ke tingkat energi yang lebih tinggi, LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) ketika molekul *dye* menyerap foton dengan energi yang sesuai, mirip dengan fungsi klorofil pada proses fotosintesis tumbuhan. Sedangkan lapisan TiO<sub>2</sub> bertindak sebagai akseptor atau kolektor elektron yang ditransfer dari *dye* yang teroksidasi. Elektrolit redoks, biasanya berupa pasangan iodide dan triiodide (I<sup>-</sup>/I<sub>3</sub><sup>-</sup>) yang bertindak sebagai mediator redoks sehingga dapat menghasilkan proses siklus di dalam sel [8].

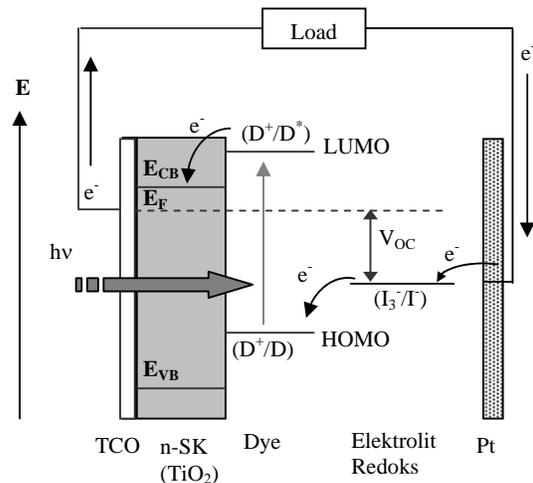
Prinsip kerja sel surya TiO<sub>2</sub> tersensitisasi *dye* ditunjukkan secara skematik pada Gambar 1, sedangkan urutan proses yang terjadi di dalam sel surya dirangkum pada persamaan (1-5). *Dye* (D) menyerap sebuah foton mengakibatkan elektron tereksitasi dari level HOMO ke LUMO pada molekul *dye*. *Dye* tereksitasi (D\*) menginjeksi sebuah elektron kedalam pita konduksi (CB) semikonduktor (TiO<sub>2</sub>) yang berada sedikit lebih tinggi daripada level konduksi TiO<sub>2</sub>. Elektron tersebut

melintas melewati partikel-partikel TiO<sub>2</sub> menuju kontak belakang berupa lapisan konduktif transparan ITO (indium tin oxide), selanjutnya ditransfer melewati rangkaian luar menuju elektroda lawan. Elektron masuk kembali ke dalam sel dan mereduksi sebuah donor teroksidasi (I<sup>+</sup>) yang ada di dalam elektrolit. *Dye* teroksidasi (D<sup>+</sup>) akhirnya menerima sebuah elektron dari donor tereduksi (I<sub>3</sub><sup>-</sup>) dan tergenerasi kembali menjadi molekul awal (D). Rangkaian reaksi kimia di dalam sel adalah sebagai berikut [12]:



Tegangan yang dihasilkan oleh sel surya nanokristal tersensitisasi *dye* berasal dari perbedaan tingkat energi konduksi elektroda semikonduktor TiO<sub>2</sub> dengan potensial elektrokimia pasangan elektrolit redoks (I<sup>-</sup>/I<sub>3</sub><sup>-</sup>). Sedangkan arus yang dihasilkan dari sel surya ini terkait langsung dengan jumlah foton yang terlibat dalam proses konversi dan bergantung pada intensitas penyinaran serta kinerja *dye* yang digunakan [12].

Salah satu kekurangan dari sel surya fotoelektrokimia ini adalah stabilitasnya yang rendah, terutama akibat degradasi dan kebocoran pada elektrolit cair yang digunakan. Oleh karena itu, akhir-akhir ini pengembangan penelitian sel surya fotoelektrokimia ini diarahkan pada penggunaan elektrolit padat untuk mengurangi degradasi dan kebocoran elektrolit yang dapat meningkatkan stabilitas sel, misalnya elektrolit berbasis polimer yang mengandung kopel redoks [2,3,12-14] atau berbasis bahan organik atau anorganik sebagai konduktor *hole* [4,15,16].



Gambar 1. Skema prinsip sel surya fotoelektrokimia tersensitisasi *dye*

Dalam penelitian ini sel surya yang dikembangkan menggunakan elektroda nanokristal  $\text{TiO}_2$  yang dibuat dari koloid  $\text{TiO}_2$  (TiNano, Altair USA) dan *dye* antosianin yang diekstrak dari kol merah. Sedangkan untuk mengurangi degradasi elektrolit digunakan elektrolit padat berbasis gel polimer PEG (polyethylene glycol) yang mengandung kopel redoks ( $\text{I}^-/\text{I}_3^-$ ) sebagai pengganti elektrolit cair. Penggunaan matriks polimer bagi kopel redoks sebagai elektrolit padat pada sel surya tersensitasi *dye* telah dilakukan oleh beberapa kelompok peneliti, diantaranya menggunakan PEO (polyethylene oxide) [3,17], PAN (polyacrylonitrile) [13] dan PEG [14]. Namun, sejauh ini belum ada yang menggabungkan penggunaan *dye* alami dan elektrolit padat berbasis gel polimer secara bersamaan pada sistem sel surya fotoelektrokimia tersensitisasi *dye*.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Bahan dan Alat

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi substrat kaca berlapis bahan *transparent conductive oxide* (TCO), koloid  $\text{TiO}_2$  (TiNano 40, ALTAIR USA), Iodolyte (TG-50, SOLARONIX SA), Polietilen Glikol 4000 (PEG 4000), asetilaseton, etanol, metanol, asam asetat, aseton, Triton X-100, kloroform, kol merah dan lempengan karbon. Peralatan yang digunakan antara lain multimeter, reostat 100 k $\Omega$ , Magnetic Stirrer Hotplate, pensil, Scotch (3M) tape, batang gelas (*glass stirring rod*), neraca Ohaus 311, kertas tisu, filter, mortar, pH Indikator Acilit (pH 0-6), YSI-Kettering Radiometer Model 65, Lampu Halogen 24 Watt, Spektrofotometer UV-Vis Genesys<sup>TM</sup> 10 Series, XRD XD-610 SHIMADZU.

### 2.2 Pembuatan Elektroda $\text{TiO}_2$

Larutan  $\text{TiO}_2$  dibuat dengan menambahkan 1 ml asetilaseton pada 1 ml koloid  $\text{TiO}_2$  sampai terbentuk pasta, lalu ditambahkan dua tetes detergen (Triton X-100) untuk memfasilitasi penyebaran koloid pada substrat. Selanjutnya dilakukan deposisi  $\text{TiO}_2$  pada substrat kaca berlapis TCO dengan teknik *casting*. Sebelumnya substrat TCO terlebih dahulu dicuci dengan sabun dan dibilas dengan etanol dan aseton. Selanjutnya pada ke dua sisi TCO yang berhadapan ditutup dengan selotip scotch (3M) sekitar 2 mm dan pada kedua sisi lainnya ditutup sekitar 6 mm, sehingga bagian TCO yang dikosongkan seluas 1  $\text{cm}^2$ . Setelah itu larutan koloid  $\text{TiO}_2$  didistribusikan secara merata di atas substrat kaca TCO dengan batang gelas. Kemudian di keringkan di udara dan scotch tape dibuka, selanjutnya dipanaskan pada suhu 130°C selama 25 menit. Hasil deposisi  $\text{TiO}_2$  tersebut kemudian dikarakterisasi XRD untuk mengetahui kristalografi  $\text{TiO}_2$ .

### 2.3 Ekstraksi *Dye* Antosianin

*Dye* antosianin diekstrak dari kol merah, 20 gram kol merah segar yang telah dipotong kecil-kecil digerus dengan sebuah mortar hingga halus, selanjutnya direndam (maserasi) di dalam pelarut yang terdiri dari 50 ml metanol, 8 ml asam asetat, dan 42 ml aquades selama 24 jam. Selama perendaman, larutan ekstrak antosianin harus disimpan di tempat gelap. Setelah direndam selama 24 jam, selanjutnya ekstrak *dye* antosianin disaring menggunakan kertas saring ke dalam botol berwarna gelap atau botol yang telah dilapisi aluminium foil. Kemudian larutan ekstrak *dye* antosianin diukur pH-nya menggunakan pH Indikator Acilit (pH 0-6 MERCK). Setelah itu larutan ekstrak *dye* antosianin diuji spektrum serapan optiknya dengan spektrofotometer UV-Vis.

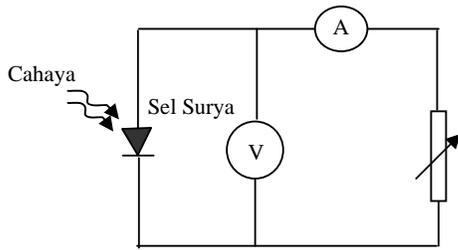
### 2.4 Pembuatan Elektrolit Gel Polimer

Elektrolit padat yang digunakan berbasis polimer PEG (polyethylene glycol) dengan berat molekul (BM) 4000. Sebanyak 7 g PEG dilarutkan dengan 25 ml kloroform hingga membentuk gel, selanjutnya dimasukkan beberapa tetes larutan Iodolyte (Solaronix) yang mengandung elektrolit redoks  $\text{I}^-/\text{I}_3^-$ . Campuran tersebut diaduk dengan pengaduk magnetik sambil dipanaskan pada suhu 80°C selama satu jam hingga homogen dan membentuk gel.

### 2.5 Pembuatan dan Karakterisasi Sel Surya

Dua buah elektroda  $\text{TiO}_2$  pada substrat kaca TCO direndam di dalam larutan ekstrak antosianin masing-masing selama 1 jam dan 24 jam untuk menghasilkan pewarnaan lapisan  $\text{TiO}_2$ . Kemudian lapisan  $\text{TiO}_2$  dikeluarkan dari larutan *dye* antosianin dan dibilas pertama kali dengan aquades lalu dengan etanol dan dikeringkan dengan kertas tisu. Lapisan  $\text{TiO}_2$  yang telah direndam di dalam larutan ekstrak antosianin disebut  $\text{TiO}_2$  tersensitisasi *dye*. Kemudian elektroda  $\text{TiO}_2$  tersensitisasi dengan ekstrak antosianin dikarakterisasi spektrum serapan optiknya untuk mengetahui pengaruh *dye* antosianin terhadap absorpsi elektroda  $\text{TiO}_2$ , masing-masing untuk yang direndam selama 1 jam dan 24 jam. Setelah itu larutan elektrolit polimer diteteskan di atas  $\text{TiO}_2$  tersensitisasi *dye*, lalu ditutup dengan elektroda lawan (*counter electrode*) berupa lempengan karbon.

Sel surya yang dihasilkan diukur karakteristik arus-tegangan (I-V) dengan merangkainya dengan sebuah voltmeter (V) dan sebuah amperemeter (A) serta sebuah reostat atau potensiometer untuk mengatur arus di dalam rangkaian (Gambar 2). Sumber cahaya lampu halogen 24 Watt dengan intensitas 4  $\text{mW}/\text{cm}^2$  diarahkan tegak lurus terhadap permukaan sel surya.



Gambar 2. Rangkaian Pengukuran Karakteristik I-V

Nilai arus dan tegangan sel surya diukur pada setiap posisi reostat yang divariasikan mula-mula pada resistansi maksimum hingga nilai minimumnya. Hasil pengukuran yang diperoleh dibuat kurva I-V untuk menentukan performa energi sel surya.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Analisis XRD Elektroda TiO<sub>2</sub>

Sebelum dipabrikasi menjadi sel surya, elektroda TiO<sub>2</sub> pada substrat kaca TCO dikarakterisasi dengan difraksi sinar-X (XRD) untuk mengamati kristalografinya. Karakterisasi XRD dilakukan menggunakan alat XD-610 SHIMADZU dengan sumber Cu pada tegangan 30kV dan arus 30mA. Hasil karakterisasi XRD berupa pola difraksi (difraktogram) yang terdiri dari puncak-puncak karakteristik TiO<sub>2</sub>, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

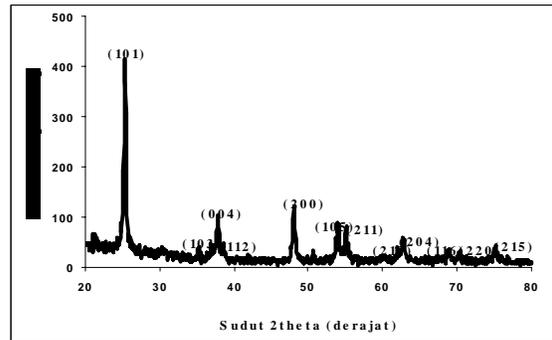
Puncak-puncak karakteristik TiO<sub>2</sub> muncul sangat jelas pada difraktogram dengan orientasi *prefer* pada sudut  $2\theta=25,23^\circ$  yang bersesuaian dengan bidang [101]. Puncak-puncak karakteristik berikutnya muncul signifikan berturut-turut pada sudut ( $2\theta$ ) 47,98 [200]; 37,79 [004]; 53,94 [105]; 55,03 [211]; dst. Puncak-puncak karakteristik TiO<sub>2</sub> ini merupakan puncak-puncak kristal anatase.

Pola difraktogram yang diperoleh juga dapat digunakan untuk menentukan ukuran kristal (crystallite size) TiO<sub>2</sub> berdasarkan nilai FWHM (full width at half-maximum) pada berbagai puncak dengan menggunakan persamaan Scherrer,

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (6)$$

dengan  $D$  adalah ukuran kristal,  $\lambda=0,154$  nm adalah panjang gelombang sinar-X,  $\beta$  adalah nilai FWHM masing-masing puncak karakteristik,  $\theta$  adalah sudut difraksi dan  $k\approx 0,94$  adalah sebuah konstanta. Hasil perhitungan masing-masing puncak diperoleh ukuran kristalit TiO<sub>2</sub> sekitar 16,43 nm.

Dalam aplikasinya pada sistem sel surya TiO<sub>2</sub> tersensitisasi *dye*, ukuran partikel TiO<sub>2</sub> berukuran nanometer ini dapat menampung jumlah molekul *dye*



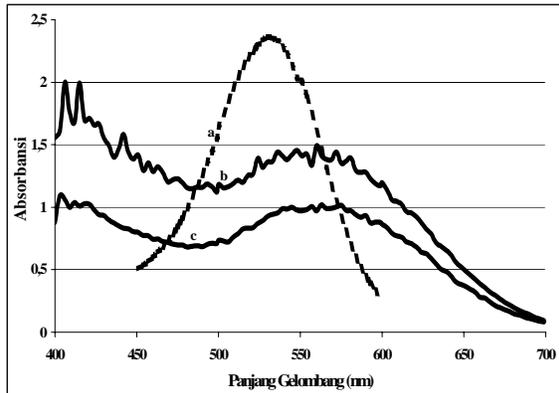
Gambar 3. Pola XRD elektroda TiO<sub>2</sub>

lebih banyak karena terdapat volume pori yang besar. Sebaliknya jika ukuran partikelnya besar (mikrometer), volume pori menjadi lebih kecil sehingga hanya menampung sedikit molekul *dye*. Dengan demikian, dengan jumlah besar molekul *dye* yang teradsorpsi pada permukaan partikel TiO<sub>2</sub> menyebabkan peluang penyerapan foton lebih besar sehingga meningkatkan jumlah elektron terinjeksi ke dalam partikel TiO<sub>2</sub>, sehingga secara keseluruhan dapat meningkatkan performa sel surya.

#### 3.2 Karakteristik Absorbansi *dye* Ruthenium kompleks

Sebelum digunakan sebagai sensitizer, ekstrak antosianin terlebih dahulu diuji spektrum absorpsinya menggunakan Spektrofotometer UV-Vis. Spektrum absorbans diukur pada rentang panjang gelombang 400 nm – 700 nm. Spektrum absorbans masing-masing diukur untuk *dye* antosianin dalam bentuk larutan metanol/asam asetat/ aquades (25:4:21) dan pada lapisan TiO<sub>2</sub>. Hasil karakterisasi spektrum absorbans (Gambar 4) memperlihatkan bahwa spektrum serapan ekstrak antosianin cukup lebar yang mencakup dari pita biru hingga kuning (450-570 nm) dengan maksimum ( $\lambda_{max}$ ) pada sekitar 530 nm. Dengan demikian berarti ekstrak antosianin sangat signifikan dan dominan menyerap spektrum hijau (500-550 nm), ini bersesuaian dengan warna ekstrak yang kemerahan.

Karakteristik absorbans elektroda TiO<sub>2</sub> yang telah direndam dengan ekstrak antosianin juga diukur, masing-masing untuk 1 jam dan 24 jam perendaman. Seperti diperlihatkan pada kurva spektrum absorbans (Gambar 4), spektrum absorbans elektroda TiO<sub>2</sub> tersensitisasi antosianin menunjukkan pergeseran ke arah panjang gelombang lebih panjang mencakup dari spektrum hijau hingga merah (500-650 nm) dengan puncak pada sekitar 570 (spektrum kuning) dan lebih lebar namun intensitasnya menurun. Selain itu, muncul pula pita absorbansi pada daerah spektrum ungu (400-430 nm), yang merupakan karakteristik serapan TiO<sub>2</sub>.



Gambar 4. Spektrum absorbansi (a) dye antosianin dalam metanol/asam asetat/aquades (25:4:21), (b) elektroda  $\text{TiO}_2$  rendam dye 24 jam, dan (c) rendam dye 1 jam

Pada kurva juga tampak bahwa perendaman dengan waktu yang lebih lama (24 jam) menghasilkan intensitas absorbansi yang lebih besar daripada yang direndam lebih singkat (1 jam), ini karena semakin lama waktu perendaman semakin tinggi konsentrasi molekul antosianin yang teradsorpsi pada permukaan partikel  $\text{TiO}_2$ .

Spektrum absorbansi dye antosianin pada lapisan  $\text{TiO}_2$  mengalami pergeseran akibat perubahan warna dye antosianin setelah teradsorpsi pada lapisan  $\text{TiO}_2$  (dari warna kemerahan menjadi keunguan). Perubahan warna ini sebagai akibat terjadinya ikatan antara kromofor dye dari antosianin dengan Ti (IV) dari  $\text{TiO}_2$ , dimana sebuah ion  $\text{OH}^-$  dari Ti (IV) berikatan dengan sebuah ion  $\text{H}^+$  dari dye antosianin membentuk satu molekul  $\text{H}_2\text{O}$ . Jerapan (adsorpsi) pada permukaan  $\text{TiO}_2$  ini membentuk *quinoidal* yang mengakibatkan permukaan  $\text{TiO}_2$  terlihat menjadi berwarna ungu dan hanya sedikit mengandung bentuk *flavilium* (sebagai penyebab warna merah) [11]. Semakin lama perendaman semakin gelap (ungu tua) warna elektroda  $\text{TiO}_2$ . Sedangkan nilai absorbansi dipengaruhi oleh kandungan antosianin yang ada dalam larutan dan yang terjerap (teradsorpsi) pada permukaan  $\text{TiO}_2$ , dimana kandungan antosianin sebanding dengan cahaya yang diserap (absorbansi).

### 3.3 Karakteristik Arus-Tegangan Sel Surya

Untuk mengetahui kinerja sel surya dilakukan pengukuran karakteristik arus-tegangan (I-V) pada kondisi tersinari dengan menggunakan sumber cahaya lampu Halogen 24 watt dengan intensitas  $4 \text{ mW/cm}^2$ . Hasil karakterisasi arus-tegangan sel surya ditunjukkan pada Gambar 5, masing-masing untuk sel yang direndam dye antosianin selama 1 jam dan 24 jam. Kedua kurva arus-tegangan yang diperoleh menunjukkan pola yang belum cukup ideal, dimana

kelengkungan kurva masih agak landai. Hal ini diakibatkan oleh konduktivitas elektrolit yang rendah dan merupakan salah satu kendala dari elektrolit polimer. Hasil ini mirip dengan hasil-hasil yang diperoleh oleh peneliti-peneliti terdahulu dengan menggunakan polimer sebagai matriks elektrolit [16,17]. Bahkan kurva I-V yang dihasilkan masih lebih baik daripada yang diperoleh oleh Freitas *et.al.* [3]. Tampak juga bahwa kurva untuk sampel yang direndam selama 24 jam lebih tinggi daripada yang direndam dye selama 1 jam mengindikasikan bahwa kinerja sel dengan perendaman dye lebih lama memiliki performa lebih baik.

Dari kurva arus-tegangan (I-V) yang diperoleh dapat ditentukan parameter-parameter keluaran dari sel surya, yaitu arus rangkaian pendek ( $I_{sc}$ ), tegangan rangkaian buka ( $V_{oc}$ ), arus maksimum ( $I_{max}$ ), tegangan maksimum ( $V_{max}$ ), daya maksimum ( $P_{max}$ ), *fill factor* (FF) dan efisiensi konversi ( $\eta$ ). Efisiensi konversi sel surya dihitung menurut hubungan

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \times 100 \% \quad (7)$$

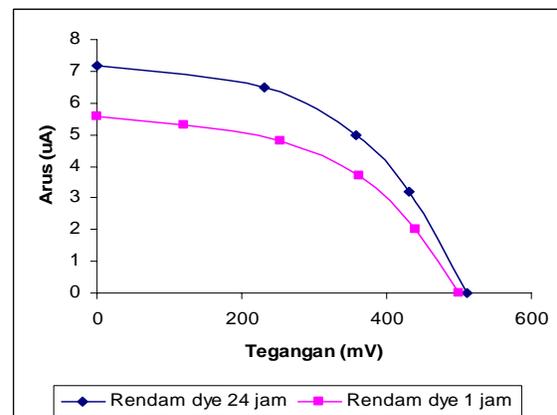
dimana  $P_{max}$  adalah daya maksimum yang dihasilkan sel surya dan  $P_{in}$  adalah daya sumber cahaya yang digunakan. Daya maksimum diberikan oleh hubungan

$$P_{max} = V_{max} I_{max} = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF \quad (8)$$

dengan *fill factor* (FF) diberikan oleh

$$FF = \frac{V_{max} I_{max}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (9)$$

Berdasarkan hasil pengukuran nilai arus dan tegangan yang telah dibuat dalam bentuk kurva arus-tegangan (I-V), diperoleh parameter-parameter keluaran sel surya seperti dirangkum di dalam Tabel 1. Tegangan



Gambar 5. Kurva I-V sel surya dengan waktu rendam dye selama 1 dan 24 jam

rangkaian buka ( $V_{OC}$ ) sel surya mencapai 500 mV dan 510 mV masing-masing untuk sel dengan perendaman *dye* selama 1 dan 24 jam. Nilai tegangan  $V_{OC}$  ini cukup signifikan untuk prototipe sel surya skala laboratorium, jika dibandingkan dengan hasil-hasil peneliti terdahulu seperti Wang *et.al.* [9] memperoleh nilai  $V_{OC}$  sebesar 540 mV [9], Lancelle-Beltran *et.al.* [15] memperoleh 540-580 mV [15] dan Hao *et.al.* [1] memperoleh 530-590 mV [1]. Bahkan hasil ini sedikit lebih baik daripada yang dihasilkan oleh Stathatos and Lianos antara 440-470 mV [18] dan Wang *et.al.* [10] dibawah 500 mV [10]. Namun demikian nilai  $V_{OC}$  ini masih perlu ditingkatkan hingga sekitar 700 mV seperti yang dihasilkan oleh beberapa peneliti [2,14,16,17,19]. Sedangkan tegangan maksimum untuk masing-masing sel adalah 362 mV dan 358 mV.

Arus keluaran sel surya (disebut juga arus foto) masih sangat rendah yaitu dalam orde mikroAmper ( $\mu A$ ). Arus rangkaian pendek ( $I_{SC}$ ) masing-masing sebesar 5,6  $\mu A$  dan 7,2  $\mu A$ , sedangkan arus maksimum ( $I_{maks}$ ) masing-masing adalah 3,7  $\mu A$  dan 5  $\mu A$ . Kecilnya arus keluaran yang dihasilkan disebabkan oleh resistansi lapisan elektroda semikonduktor  $TiO_2$  dan elektrolit polimer yang sangat besar, dari hasil pengukuran diketahui nilai resistansi lapisan  $TiO_2$  dalam orde megaOhm ( $M\Omega$ ). Dengan nilai resistansi yang sangat besar ini mengakibatkan elektron yang diinjeksi dari *dye* mengalami hambatan yang sangat besar di dalam lapisan  $TiO_2$  sehingga jumlah elektron yang mengalir ke rangkaian luar menjadi kecil, akibatnya arus yang dihasilkan juga kecil. Penyebab lainnya dapat diakibatkan oleh belum optimalnya fungsi *dye* dalam pembangkitan dan injeksi elektron ke lapisan elektroda  $TiO_2$ .

Karena arus keluaran yang masih sangat kecil, daya maksimum keluaran juga kecil yaitu dalam orde mikroWatt ( $\mu W$ ) jika dibandingkan dengan sel surya ideal yaitu dalam orde milliWatt (mW). Nilai faktor pengisian (*fill factor*) sel surya adalah 48%, ini bersesuaian dengan bentuk kurva arus-tegangan (I-V) yang masih agak landai. Namun demikian hasil ini masih lebih baik daripada yang diperoleh oleh Senadeera *et.al.* [16] yaitu 41% dan Freitas *et.al.* [3]

**Tabel 1. Parameter-parameter sel surya**

Karakterisasi I-V	Sampel A (Rendam 1 jam)	Sampel B (Rendam 24 jam)
$V_{max}$ (mV)	362	358
$P_{max}$ ( $\mu W$ )	1,34	1,8
$I_{sc}$ ( $\mu A$ )	5,6	7,2
$V_{oc}$ (mV)	500	510
Fill Factor (%)	48	48
Efisiensi (%)	0,034	0,055

yaitu 47%. Kurva I-V paling ideal adalah berbentuk kotak segiempat, namun demikian kurva ideal seperti itu tidak akan pernah tercapai karena resistansi dari sel surya. Sejauh ini nilai *fill factor* yang dicapai untuk sistem sel surya ini adalah antara 55-68% [2,13,14,17,19]. Untuk meningkatkan nilai *fill factor* salah satunya dengan mengurangi nilai resistansi sel surya.

Efisiensi konversi sel surya sebesar 0,034 % dan 0,055 % untuk masing-sing sel masih sangat rendah dibandingkan dengan hasil-hasil yang diperoleh oleh peneliti-peneliti terdahulu. Untuk sistem sel surya tersensitisasi *dye* alami telah dicapai efisiensi antara 0,3 – 1,5 % oleh Zhang, *et.al.* [7]. Sedangkan untuk sel surya tersensitisasi *dye* sintesis dengan elektrolit padat berbasis polimer telah dicapai efisiensi konversi energi hingga 4% [2,14]. Rendahnya nilai efisiensi konversi terutama akibat rendahnya arus yang dihasilkan, salah satunya akibat resistansi sistem sel surya yang terdiri dari lapisan elektroda semikonduktor  $TiO_2$  dan elektrolit polimer yang sangat besar. Untuk mengurangi resistansi sel surya dapat dilakukan dengan mengurangi ketebalan atau modifikasi lapisan elektroda  $TiO_2$ .

Karakteristik keluaran sel surya yang direndam lebih lama (24 jam) lebih baik dibandingkan dengan sel yang direndam lebih singkat (1 jam). Hal ini bersesuaian dengan karakteristik absorbans dimana sel dengan waktu perendaman selama 24 jam memperlihatkan nilai absorbansi yang lebih besar. Akibatnya, arus keluaran sel surya lebih besar untuk sel dengan perendaman lebih lama sehingga secara keseluruhan menghasilkan efisiensi konversi energi yang lebih besar.

#### 4. Kesimpulan

Telah dipabrikasi sel surya fotoelektrokimia berbasis elektroda nanokristal  $TiO_2$  tersensitisasi menggunakan *dye* antosianin ekstrak kol merah dan elektrolit padat polimer mengandung kopel redoks  $I/I_3^-$ . Dua sel dibuat dengan perbedaan waktu perendaman *dye* antosianin masing-masing selama 1 dan 24 jam. Hasil karakterisasi arus-tegangan memperlihatkan kemampuan konversi energi cahaya menjadi energi listrik. Kedua sel surya menghasilkan arus rangkaian pendek ( $I_{SC}$ ) 5,6  $\mu A$  dan 7,2  $\mu A$  masing-masing untuk sel dengan perendaman *dye* 1 dan 24 jam, dan tegangan rangkain buka ( $V_{OC}$ ) 500 mV dan 510 mV untuk masing-masing sel. Sedangkan fill factor (ff) 48 % sama untuk kedua sel, dan efisiensi konversi 0,023 % dan 0,055 %.

#### Daftar Acuan

- [1] S. Hao, J. Wu, L. Fan, Y. Huang, J. Lin, Y. Wei, Solar Energy 76 (2004) 745.

- [2] M. Huang, H. Yang, J. Wu, J. Lin, Z. Lan, P. Li, S. Hao, P. Han, Q. Jiang, *J. Sol-Gel Sci. Techn.* 42 (27) 65.
- [3] J.N. de Freitas, V. Nogueira, B.I. Ito, M.A. Soto-Oviedo, C. Longo, M.-A. De Paoli, A.F. Nogueira, *Intern'l. J. Photoenergy* (2006) 1.
- [4] L. Schmidt-Mende and M. Gratzel, *Thin Solid Films* 500 (2006) 296.
- [5] Y. Chiba, A. Islam, Y. Watanabe, R. Komiya, N. Koide, L. Han, *Jpn. J. Appl. Phys.* 45 (2006) L638
- [6] C.G. Garcia, A.S. Polo, N.Y. M. Iha, *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 160 (2003) 87.
- [7] D. Zhang, N. Yamamoto, T. Yoshida, H. Minoura, *Transac. Mater. Res. Soc. Jpn.* 27 (2002) 811.
- [8] G.P. Smestad and M. Gratzel, *J. Chem. Educ.* 75 (6) (1998) 1.
- [9] X.-F. Wang, A. Matsuda, Y. Koyama, H. Nagae, S.-i. Sasaki, H. Tamiaki, Y. Wada, *Chem. Phys. Lett.* 423 (2006) 470.
- [10] X.-F. Wang, J. Xiang, P. Wang, Y. Koyama, S. Yanagida, Y. Wada, K. Hamada, S.-i. Sasaki, H. Tamiaki, *Chem. Phys. Lett.*, 408 (2006) 409.
- [11] Q. Dai and J. Rabani, 2002, *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 148 (2002) 17.
- [12] B. Li, L. Wang, B. Kang, P. Wang, Y. Qiu, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 90 (2006) 549.
- [13] G. Wang, X. Zhou, M. Li, J. Zhang, J. Kang, Y. Lin, S. Fang, X. Xiao, *Mater. Res. Bull.* 39 (2004) 2113.
- [14] J. Joseph, K.M. Son, R. Vittal, W. Lee, K.-J. Kim, *Semicond. Sci. Technol.* 21 (2006) 697.
- [15] E. Lancelle-Beltran, P. Prene, C. Boscher, P. Belleville, P. Buvet, C. Sanchez, *Advanced Materials* 18 (2006) 2579.
- [16] G.K.R. Senadeera, S. Kobayashi, T. Kitamura, Y. Wada, S. Yanagida, *Bull. Mater. Sci.* 28 (2005) 635.
- [17] V.C. Nogueira, C. Longo, A.F. Nogueira, M.A. S.-Oviedo, M.-A. De Paoli, *J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry*, 181 (2006) 226.
- [18] Elias Stathatos and Panagiotis Lianos, *Inter'l J. Photoenergy* 14 (2002) 11.
- [19] D.-W. Kim, Y.-B. Jeong, S.-H. Kim, D.-Y. Lee, J.-S. Song, *J. Power Sources*, 149 (2005) 112.