



Pembuatan *Dye-Sensitized Solar Cell* dengan Memanfaatkan Fotosensitizer Ekstrak Kol Merah (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *Rubra*)

Laila Ika Anggraini^a, Abdul Haris^{a*}, Didik Setiyo Widodo^a

^a Analytical Chemistry Laboratory, Chemistry Department, Faculty of Sciences and Mathematics, Diponegoro University, Jalan Prof. Soedarto, Tembalang, Semarang 50275

* Corresponding author: a.haris@live.undip.ac.id

Article Info	Abstract
<p>Keywords: Dye Sensitized Solar Cell, TiO₂, anthocyanin</p>	<p>A fabrication of Dye Sensitized Solar Cell using a red cabbage extract (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>capitata</i> f. <i>Rubra</i>). Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) is one of the potential candidates of solar cells. The process of light absorption is performed by dye molecules and the process of charge separation by TiO₂ semiconductors. The natural colouring agent used was isolated in a mixture of acetic acid: methanol: water and then continued by a phytochemical screening. The characterization of red cabbage extract was performed by Vis UV spectrometer and FTIR spectrometer and the TiO₂ thin layer characterization was accomplished by X-ray diffraction method and SEM (Scanning Electron Microscopy). The construction of solar cells used was in a sandwich system. The efficiency of DSSC performance was obtained by measuring the voltage and current generated under different conditions i.e. under sunlight and indoors. DSSC component characterization results showed that the red cabbage photosensitizer was a phenolic compound of the flavonoid group. The presence of anthocyanin content was indicated by a maximum wavelength of 525 nm which was reinforced by the emergence of hydroxyl, benzene and carbonyl groups in infrared absorption. The TiO₂ thin layer had a surface morphology with a cavity size of approximately 220 nm, and a cross-sectional thickness of about 300 nm. While the TiO₂ thin layer diffractogram showed that TiO₂ had an anatase crystalline phase with a crystallite size of 17.366 nm. The maximum voltage and current generated under conditions under sunlight and indoors were 0.627 V; 0.065 x 10⁻³ A and 0.152 V; 0.014 x 10⁻³ A. The efficiency of the solar cell system in this study were 0.003% and 0.000113%. The result of characterization of current and voltage showed the ability of conversion of light energy into electrical energy.</p>
<p>Kata kunci: Dye Sensitized Solar Cell, TiO₂, antosianin.</p>	<p>Abstrak</p> <p>Telah dilakukan penelitian mengenai pembuatan <i>Dye Sensitized Solar Cell</i> dengan memanfaatkan ekstrak kol merah (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>capitata</i> f. <i>Rubra</i>). <i>Dye-Sensitized Solar Cell</i> (DSSC) merupakan salah satu kandidat potensial sel surya, proses absorpsi cahaya dilakukan oleh molekul zat warna dan proses separasi muatan oleh semikonduktor TiO₂. Zat warna alami yang digunakan diisolasi dalam campuran asam asetat:metanol:air dan dilakukan <i>screening</i> fitokimia. Karakterisasi ekstrak kol merah dilakukan dengan spektrometer UV Vis dan spektrometer FTIR. Karakterisasi lapis tipis TiO₂ dilakukan menggunakan metode difraksi sinar-X dan SEM (<i>Scanning Electron Microscopy</i>). Konstruksi sel surya yang digunakan adalah sistem <i>sandwich</i>. Efisiensi kinerja DSSC diperoleh melalui pengukuran voltase dan arus yang dihasilkan pada kondisi yang berbeda yakni di bawah pancaran sinar matahari dan di dalam ruangan. Hasil karakterisasi komponen DSSC menunjukkan bahwa <i>fotosensitizer</i> ekstrak kol merah</p>

merupakan senyawa fenolik golongan flavonoid. Adanya kandungan antosianin ditunjukkan dengan panjang gelombang maksimum 525 nm dan diperkuat dengan munculnya gugus hidroksil, benzena dan karbonil pada serapan inframerah. Lapis tipis TiO₂ menunjukkan morfologi permukaan dengan ukuran rongga sekitar 220 nm, dan ketebalan penampang lintang sekitar 300 nm. Sedangkan difraktogram lapis tipis TiO₂ menunjukkan bahwa TiO₂ memiliki fasa kristalin anatase dengan ukuran kristal sebesar 17,366 nm. Voltase maksimum dan kuat arus maksimum yang dihasilkan pada kondisi di bawah pancaran sinar matahari dan di dalam ruangan masing-masing sebesar 0,627 V; 0,065.10⁻³ A dan 0,152 V; 0,014.10⁻³ A. Efisiensi yang dihasilkan sistem sel surya dalam penelitian ini masing-masing sebesar 0,003 % dan 0,000113 %. Hasil karakterisasi arus dan voltase memperlihatkan kemampuan konversi energi cahaya menjadi energi listrik.

1. Pendahuluan

Penggunaan energi melalui sel surya merupakan salah satu alternatif yang potensial dari sekian banyak sumber energi terbarukan. Sel surya bekerja menggunakan energi matahari dengan mengkonversi secara langsung radiasi matahari menjadi listrik. Seiring dengan perkembangan nanoteknologi, sel surya secara bertahap mulai tergantikan dengan kehadiran generasi terbaru, yaitu *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC).

DSSC diperkenalkan pertama kali oleh Michael Gratzel dan Brian O'Regan pada tahun 1991 dan dikenal dengan nama Sel Gratzel [1]. Pada DSSC absorpsi cahaya dan separasi muatan listrik terjadi pada proses yang terpisah. Absorpsi cahaya dilakukan oleh molekul zat warna yang sensitif terhadap cahaya dan separasi muatan oleh semikonduktor anorganik nanokristalin [2]. DSSC berbentuk struktur *sandwich*, dua elektroda yaitu elektroda TiO₂ tersensitisasi *dye* dan elektroda lawan terkatalisasi mengapit elektrolit membentuk sistem sel fotoelektrokimia. Dalam aplikasi DSSC, TiO₂ harus memiliki permukaan luas sehingga zat warna yang teradsorpsi lebih banyak dan hasilnya akan meningkatkan arus listrik. Selain itu penggunaan bahan zat warna yang mampu menyerap spektrum cahaya yang lebar dan cocok dengan pita energi TiO₂ juga merupakan karakteristik yang penting.

Pada awalnya, *sensitizer* yang digunakan dalam penelitian Prairie *dkk.* [3] adalah zat warna rutenium. Namun penggunaan senyawa kompleks logam dapat menyebabkan pengaruh negatif pada lingkungan. Oleh karena itu, para peneliti mulai memanfaatkan senyawa-senyawa yang berasal dari alam dalam aplikasinya sebagai *sensitizer* DSSC. Penggunaan bahan-bahan alam ini bertujuan untuk meminimalisasi dampak buruk terhadap lingkungan dan menekan biaya produksi sehingga dapat dihasilkan sel surya yang murah dan ramah lingkungan.

Ekstrak *dye* atau pigmen tumbuhan yang digunakan sebagai *sensitizer* dapat berupa ekstrak klorofil, karoten atau antosianin. *Sensitizer* yang pernah digunakan dalam sistem DSSC di antaranya buah berry [4], senyawa antosianin dalam bunga Rosella [5], strawberi [6] dan buah delima [7]. Zat warna alami tersebut telah terbukti mampu memberikan efek *photovoltaic* walaupun efisiensi yang diberikan masih jauh lebih kecil dibandingkan zat warna sintetik. Meskipun demikian, zat warna organik

sangat kompetitif untuk dijadikan *sensitizer* karena biaya produksinya yang lebih murah dan proses isolasi lebih mudah.

Kol merah (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *Rubra*) merupakan salah satu buah yang mengandung pigmen antosianin dan belum banyak penelitian yang mengupas penggunaannya sebagai *sensitizer*. Warna merah pada kol merah mengindikasikan adanya kandungan pigmen antosianin di dalamnya, sehingga dapat digunakan sebagai *sensitizer*. Pada penelitian ini dipilih senyawa antosianin dalam ekstrak kol merah sebagai pewarna alternatif dari kompleks ruthenium.

Teknologi pembuatan *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC) yang dikembangkan pada penelitian ini diharapkan bisa menjadi studi awal untuk penelitian lebih lanjut sehingga menghasilkan sel surya yang mempunyai performansi lebih baik, dapat lebih memasyarakatkan *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC) sebagai alternatif sel surya yang murah dan ramah lingkungan.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan bahan sebagai berikut: TiO₂ merck, kol merah, *polyvinyl alcohol* (pva), metanol proanalisis, asam asetat proanalisis, kalium iodida (ki) proanalisis, iodin (I₂) proanalisis, asetonitril proanalisis, serbuk karbon, isolasi, akuades, kertas saring, aluminium foil. Alat yang akan digunakan sebagai berikut: Pipet volum 10 mL, 25 mL dan 50 mL, Peralatan gelas, Batang pengaduk, Lumpang porselain, *Furnace*, Spektrometer UV-Vis, *Scanning Electron Microscopy* (SEM) jeol jsm-6360 LA, Difraktometer sinar X *pan analytical*, Spektrofotometer Inframerah Thermo Nicolet Avatar 360, Multimeter Heles, Potensiometer Alpha 10k, Penjepit buaya, Kaca konduktif (TCO) jenis ITO (*Indium tin oxide*).

Pembuatan Pasta TiO₂

Pada tahap ini TiO₂ dibuat dalam bentuk pasta agar bisa dilapiskan pada substrat kaca, yaitu dengan prosedur pembuatan sebagai berikut:

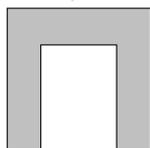
1. Polivinil Alkohol (PVA) ditambahkan sebanyak 10% berat ke dalam air, kemudian diaduk pada temperatur 80°C. Suspensi ini akan berfungsi sebagai *binder* dalam pembuatan pasta. Suspensi

tersebut ditambahkan pada bubuk TiO_2 sebanyak kurang lebih 10% volume.

2. Derajat viskositas pasta untuk mendapatkan pasta yang optimal didapatkan dengan mengatur banyaknya *binder* dan juga bila diperlukan ditambahkan juga air pada campuran binder dan bubuk TiO_2 .

Deposisi TiO_2 pada Substrat Kaca Berkonduksi

1. Pada substrat kaca TCO yang telah dipotong menjadi ukuran 2,5 x 2,5 cm dibentuk area tempat TiO_2 dan dideposisikan dengan bantuan isolasi pada bagian kaca yang konduktif sehingga terbentuk area sebesar 2 x 1,5 cm dengan ilustrasi seperti pada gambar 1. Isolasi ini juga berfungsi sebagai pengatur ketebalan pasta TiO_2 .



Gambar 1. Ilustrasi Skema Area Deposisi Pasta TiO_2

Pasta TiO_2 dideposisikan di atas area yang telah dibuat pada kaca konduktif dengan metoda *slip casting* yaitu dengan bantuan batang pengaduk untuk meratakan pasta. Kemudian lapisan dikeringkan selama kurang lebih 15 menit dan dibakar (*sintering*) dalam *furnace* pada temperatur 450°C selama 30 menit.

Karakterisasi Lapis Tipis TiO_2

Karakterisasi morfologi dan tebal tampak lintang lapis tipis TiO_2 dilakukan dengan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan struktur kristal dari TiO_2 dianalisis dengan X-Ray Diffractometer. Sedangkan gugus-gugus yang terdapat dalam lapis tipis TiO_2 dianalisis dengan spektrometri inframerah.

Isolasi Zat Warna Alami

Sebanyak 20 gram kol merah dihaluskan kemudian ditambahkan metanol:asam asetat:air (25:4:21 perbandingan volume). Kemudian dimaserasi selama 24 jam dan wadah ditutup dengan aluminium foil untuk meminimalkan kontak langsung dengan cahaya. Lalu dilakukan penyaringan untuk memperoleh ekstrak zat warna alami.

Karakterisasi Zat Warna Ekstrak Kol Merah

Profil absorpsi zat warna ekstrak kol merah dianalisis dengan menggunakan spektrometer *UV-Vis* dengan panjang gelombang cahaya pada 400 nm-700 nm. Sedangkan gugus-gugus fungsi yang terdapat dalam zat warna ekstrak kol merah dianalisis spektrometri FTIR pada bilangan gelombang $4000-400\text{ cm}^{-1}$.

Perendaman Zat Warna Kol Merah pada Lapis Tipis TiO_2

Lapisan TiO_2 direndam dalam larutan zat warna kol merah (*Impatiens balsamina*) selama ± 30 menit

kemudian lapisan TiO_2 akan menjadi berwarna ungu kemerahan.

Karakterisasi Serapan Inframerah Lapis Tipis TiO_2 dan Zat Warna Alami.

Ikatan kimia yang terjadi antara TiO_2 -zat warna ditunjukkan dengan munculnya atau hilangnya pita serapan inframerah yang baru ketika zat warna teradsorpsi pada lapis tipis TiO_2 .

Pembuatan Larutan Elektrolit

Kalium Iodida (KI) sebanyak 0,83 g dilarutkan dalam 10 mL asetonitril kemudian diaduk sampai larut. Setelah itu tambahkan 0,127 g I_2 kedalam larutan tersebut dan diaduk hingga larut sempurna.

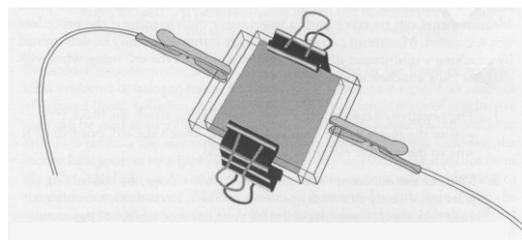
Pembuatan Elektroda Lawan

Polyvinyl Alcohol (PVA) sebanyak 10 % berat ditambahkan ke dalam akuades, kemudian diaduk pada temperatur 80°C . Suspensi ini akan berfungsi sebagai binder dalam pembuatan pasta. Kemudian suspensi tersebut ditambahkan pada serbuk grafit. Pasta grafit dilapiskan ke substrat kaca pada bagian konduktif kemudian dipanaskan pada temperatur 450°C selama 10 menit agar grafit membentuk kontak yang baik sesama partikel grafit dan dengan substrat kaca konduktif.

Pembuatan Konstruksi DSSC

Setelah masing-masing komponen DSSC berhasil dibuat kemudian dilakukan perangkaian konstruksi DSSC dengan langkah-langkah sebagai berikut:

Elektroda kerja TiO_2 kemudian diletakkan di atas elektroda lawan grafit dengan struktur *sandwich* dan masing-masing ujung diberi *offset* sebesar 0,2 cm untuk kontak elektrik. Kemudian agar struktur sel mantap dijepit dengan klip pada kedua sisi.



Gambar 2. Konstruksi sel surya

Larutan elektrolit kemudian diteteskan kira-kira sebanyak 2 tetes pada ruang antara kedua elektroda dan sel surya siap untuk diuji.

Pengujian Sel Surya

Pada sel surya yang telah dirangkai dilakukan dua jenis pengujian yaitu, pengujian langsung tegangan dan arus yang terukur dari sel surya dengan menggunakan multimeter Heles pada kondisi pancaran cahaya matahari langsung dan di dalam ruangan.

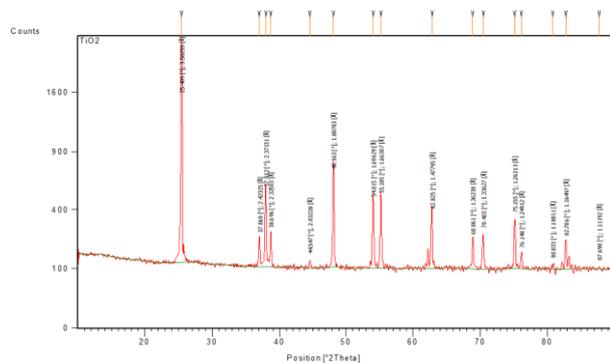
Pada penelitian ini dilakukan pembuatan *Dye Sensitized Solar Cell* dalam skala laboratorium dengan memanfaatkan ekstrak kol merah (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *Rubra*) sebagai *fotosensitizer*. Karakteristik lapis

tipis TiO₂ dilakukan melalui karakterisasi morfologi permukaan dan penampang lintang lapisan tipis TiO₂ dengan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan karakterisasi fase kristal lapisan tipis TiO₂ dengan difraksi sinar X. Analisis absorpsi zat warna ekstrak kol merah menggunakan spektrometri UV-Vis. Sedangkan untuk mengkaji terjadinya ikatan antara lapisan tipis TiO₂-zat warna dilakukan melalui analisis serapan inframerah. Selain itu dilakukan pengukuran arus dan tegangan dengan variasi resistansi untuk memperoleh efisiensi DSSC pada kondisi di dalam ruangan dan di bawah pancaran sinar matahari langsung.

3. Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Fase Kristal Lapis Tipis TiO₂

Analisis dengan metode difraksi sinar X dilakukan untuk menentukan fase dan ukuran kristal penyusun lapisan tipis TiO₂. Pada difraktogram menunjukkan puncak pada 2θ yaitu 25,409; 37,912; 48,163; 55,185; 62,825 dan diperoleh jarak antarbidang (d) sebesar 3,5026 Å; 2,371 Å; 1,888 Å; 1,663 Å; 1,478 Å. Spektra XRD hasil analisis kemudian dibandingkan dengan data standar primer TiO₂ dari ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database*). Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa fase kristal TiO₂ hasil XRD adalah anatase setelah dibandingkan dengan data primer TiO₂ yang memiliki puncak 2θ pada 25,28; 37,80; 48,047; 55,058; 62,686. Dengan menggunakan persamaan Scherrer pada indeks bidang miller (101), ukuran kristal yang terhitung yaitu 17,366 nm.



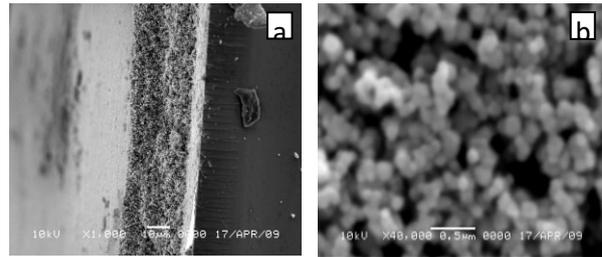
Gambar 3. Pola XRD elektroda TiO₂

Derajat kristalinitas sampel ini cukup baik dilihat dari intensitas puncak difraksi yang tinggi dan tegas. Dengan derajat kristalinitas yang baik maka proses difusi elektron di TiO₂ akan lebih cepat. Struktur kristal anatase memiliki aktivitas yang paling baik di antara fasa rutil dan brookite [8]. Hal tersebut dikarenakan transport muatan pada kristal anatase akan lebih mudah. Luas permukaan pada anatase mampu menghasilkan daya adsorpsi yang efektif terhadap molekul pewarna.

Karakterisasi Morfologi Lapis Tipis TiO₂

Morfologi permukaan serta tebal tampang lintang lapisan tipis TiO₂ dapat diketahui melalui analisis SEM (*Scanning Electron Microscopy*). Struktur nanopori TiO₂ merupakan karakteristik penting dalam DSSC, karena posisi dye akan berada pada pori-pori tersebut. Hasil analisis SEM lapisan tipis TiO₂ disajikan pada gambar 4.

Pada perbesaran yang lebih tinggi terlihat morfologi permukaan lapisan tipis yang berongga-rongga (gambar 4b).

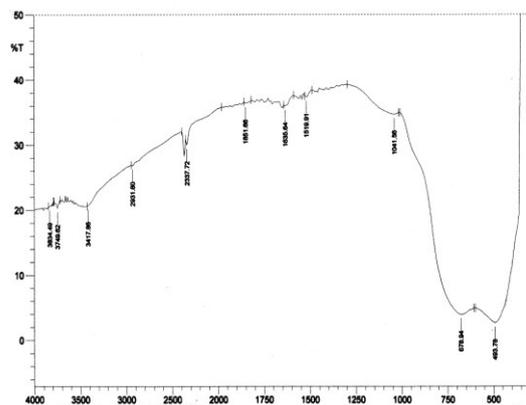


Gambar 4. Penampang lintang lapisan tipis TiO₂ dengan pembesaran 1.000x (a) dan Morfologi permukaan lapisan tipis TiO₂ dengan pembesaran 5.000x (b)

Rongga-rongga tersebut memiliki ukuran 220 nm. Morfologi lapisan tipis yang berongga-rongga akan memperbesar permukaan lapisan tipis TiO₂ sehingga zat warna dapat teradsorpsi secara efektif pada rongga-rongga lapisan tipis TiO₂ tersebut. Selain itu adanya rongga juga bisa mempermudah penyebaran larutan elektrolit dalam lapisan tipis TiO₂ elektroda kerja sel surya.

Karakterisasi Serapan Inframerah Lapis Tipis TiO₂

Analisis dengan spektroskopi inframerah dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui gugus-gugus fungsional yang ada pada serbuk TiO₂. Dengan mengetahui gugus-gugus yang terdapat pada lapisan tipis TiO₂ diharapkan kita dapat memprediksi ikatan maupun interaksi yang mungkin terjadi antara zat warna dengan permukaan lapisan tipis TiO₂. Pada gambar 5. memperlihatkan spektra FTIR pada lapisan tipis TiO₂ sebelum tersensitisasi oleh zat warna. Spektra FTIR yang diperoleh menunjukkan puncak yang lebar pada daerah 676,94-493,78 cm⁻¹ diidentifikasi sebagai kerangka kerja TiO₂ (Ti-O-Ti). Sementara itu, puncak yang muncul pada 3417,86 cm⁻¹ merupakan karakteristik gugus hidroksi.



Gambar 5. Spektra FTIR Lapis Tipis TiO₂

Ekstraksi Zat Warna dari Kol Merah (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *Rubra*)

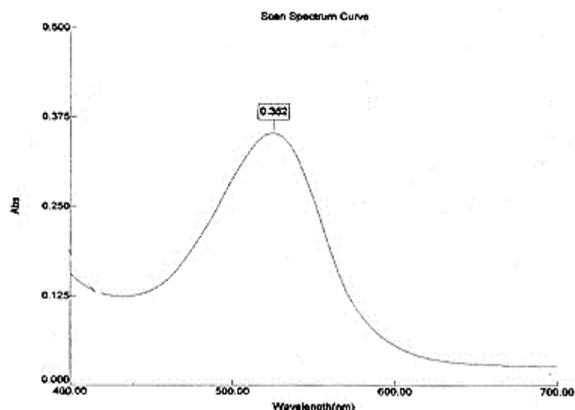
Penggunaan pigmen antosianin pada DSSC dikarenakan kemampuan antosianin dalam menyerap cahaya tampak dan sebagai donor elektron dalam proses transfer elektron. Pada proses maserasi, cairan penyari akan menembus dinding sel dan masuk ke dalam rongga

sel yang mengandung zat aktif. Zat aktif akan larut karena adanya perbedaan konsentrasi antara larutan zat aktif di dalam sel dan di luar sel, maka larutan yang terpekat di desak keluar. Peristiwa tersebut berulang sehingga terjadi keseimbangan konsentrasi antara larutan di luar dan di dalam sel.

Selama proses perendaman dalam campuran pelarut, kontak dengan cahaya diminimalisasi untuk menghindari kerusakan gugus kromofor yang terdapat pada senyawa antosianin yang digunakan untuk berikatan dengan TiO_2 . Larutan pewarna hasil ekstraksi berwarna merah. Hal ini sejalan dengan penelitian Xavier dkk. [9] bahwa antosianin akan berwarna kemerahan pada suasana asam dan berada pada bentuk kesetimbangan *flavylium*.

Analisis Absorpsi Zat warna Kol Merah

Sumber radiasi sistem DSSC adalah sinar matahari yang menghasilkan spektra lebih banyak di daerah tampak daripada di daerah UV, oleh karena itu dibutuhkan zat warna yang dapat menyerap pada daerah cahaya tampak. Analisis absorpsi cahaya oleh zat warna antosianin pada kol merah dilakukan dengan spektrometri UV-Vis pada rentang panjang gelombang 400 nm–700 nm.



Gambar 6. Grafik UV-Vis dye pada ekstrak kol merah

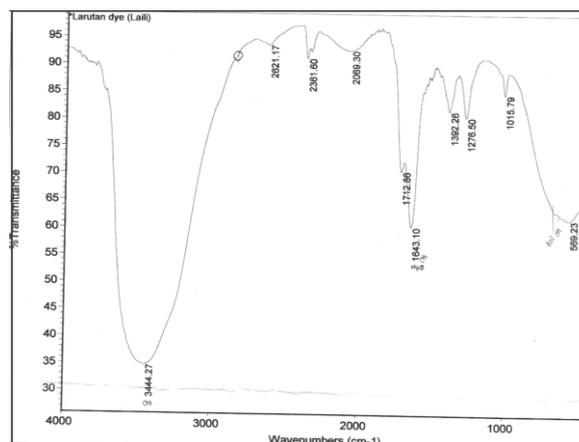
Gambar 6 memperlihatkan bahwa spektrum serapan ekstrak antosianin cukup lebar yang mencakup dari pita biru hingga hijau (450–570 nm) dengan panjang gelombang maksimum pada sekitar 525 nm. Oleh karena itu, zat warna antosianin pada kol merah berwarna merah karena menyerap spektrum biru-hijau dan memantulkan warna merah. Hal ini menandakan bahwa pigmen antosianin yang ada pada kol merah dapat mengabsorpsi cahaya dengan panjang gelombang yang masih dalam spektrum cahaya tampak.

Karakterisasi Gugus Fungsional Zat warna Ekstrak Kol Merah

Analisis dengan spektroskopi inframerah dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui gugus-gugus fungsional yang ada pada zat warna ekstrak kol merah sehingga dapat diperkirakan ikatan maupun interaksi antara zat warna dengan permukaan TiO_2 .

Zat warna yang dapat digunakan sebagai sensitiser adalah zat warna yang dapat teradsorpsi dan memiliki gugus fungsional yang dapat berikatan secara kimia dengan permukaan TiO_2 [4]. Kisi Ti^{IV} pada permukaan TiO_2 akan berikatan dengan gugus C=O dan –OH pada antosianin yang digunakan sebagai zat warna. Zat warna utama yang terdapat pada kol merah adalah *Cyanidin-3-diglucoside-5-glucoside* [10] yang merupakan senyawa fenolik golongan flavonoid. Hal ini dibuktikan pula dengan perlakuan *screening* fitokimia yang menunjukkan uji positif terhadap senyawa fenolik golongan flavonoid. Senyawa golongan fenolik tersusun atas satu cincin benzena atau lebih dengan 1 atau lebih gugus hidroksil (–OH).

Spektra FTIR ekstrak kol merah ditunjukkan pada gambar 4.6 muncul serapan pada $3444,27 \text{ cm}^{-1}$ melebih kemungkinan adanya gugus fungsi OH yang dapat membentuk suatu ikatan hidrogen. Adanya gugus C=O ditunjukkan oleh pita lebar pada daerah $1712,86 \text{ cm}^{-1}$. Gugus karbonil ini muncul karena adanya kesetimbangan senyawa antosianin yang berada dalam bentuk sianidin *quinonoidal*. Serapan $1015,79 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya gugus C–O. Pita serapan pada $1643,10 \text{ cm}^{-1}$ merupakan serapan C=C alkena. Pita lebar $569,23 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan substitusi atom karbon tak jenuh. Sehingga serapan pada daerah $1643,10 \text{ cm}^{-1}$ yang didukung adanya serapan $569,23 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya gugus benzena.



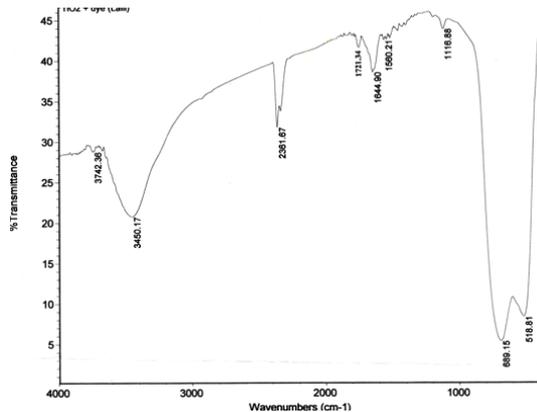
Gambar 7. Spektra FTIR zat warna ekstrak kol merah

Karakterisasi Serapan Inframerah TiO_2 -Zat warna

Analisis spektrometri inframerah terhadap lapis tipis TiO_2 -zat warna dilakukan untuk mengetahui apakah serapan yang muncul pada lapis tipis TiO_2 -zat warna menunjukkan terbentuknya suatu ikatan kimia pada Ti^{4+} dengan zat warna. Ikatan kimia yang terjadi ditunjukkan dengan munculnya atau hilangnya pita serapan yang baru antara lapis tipis TiO_2 dan zat warna kol merah dengan campuran lapis tipis TiO_2 -zat warna.

Lapisan TiO_2 direndam dalam larutan zat warna kol merah kemudian lapisan TiO_2 akan menjadi berwarna ungu kemerahan. Spektra lapis tipis TiO_2 -zat warna pada gambar 8 menunjukkan pita kuat di daerah $3450,17 \text{ cm}^{-1}$ yang merupakan gugus OH. Sedangkan pita tajam $1644,90 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan rentangan gugus C=C. Pita lebar $518,81 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan substitusi atom karbon tak jenuh. Sehingga serapan pada daerah $1644,90 \text{ cm}^{-1}$ yang

didukung adanya serapan 518,81 cm⁻¹ menunjukkan adanya gugus benzena. Adanya gugus C=O ditunjukkan oleh pita lebar pada daerah 1721,34 cm⁻¹. Puncak yang lebar pada daerah 689,15 cm⁻¹ yang muncul pada spektra FTIR diidentifikasi sebagai kerangka kerja TiO₂ (Ti-O-Ti). Ikatan yang terjadi antara zat warna dengan TiO₂ merupakan jembatan yang menghubungkan zat warna dengan TiO₂ untuk terjadinya injeksi elektron dari zat warna menuju pita konduksi pada TiO₂. Oleh karena itu dengan terjadinya ikatan tersebut diharapkan zat warna kol merah dapat mensensitisasi TiO₂.

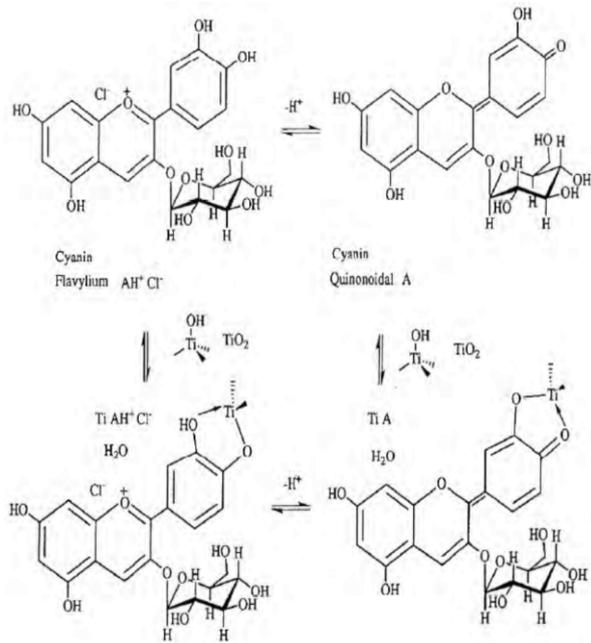


Gambar 8. Spektra FTIR lapis tipis TiO₂-zat warna

Tabel 1. Data pita serapan antara lapis tipis TiO₂ dan zat warna dengan lapis tipis TiO₂-zat warna

Bilangan gelombang (cm-1)			Jenis vibrasi
Lapis tipis TiO ₂	Zat warna	Lapis tipis TiO ₂ -zat warna	
3417,86	3444,27	3450,17	OH membentuk ikatan hidrogen
-	1643,10	1644,90	C=C
-	1712,86	1721,34	C=O
-	1015,79	-	C-O
-	569,28	518,81	Substitusi benzen
676,94-493,78	-	689,15	Kerangka kerja TiO ₂ (Ti-O-Ti)

Ikatan kimia antara zat warna dengan TiO₂ kemungkinan terjadi antara gugus hidroksi dan karbonil pada cyanidin yang ada dalam ekstrak kol merah dengan ion Ti(IV). Mekanisme reaksi adsorpsi zat warna pada permukaan TiO₂ dapat dilihat pada gambar 9.



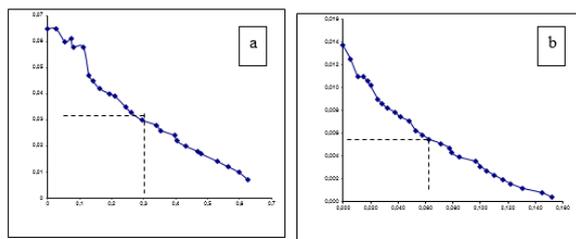
Gambar 9. Adsorpsi zat warna pada permukaan TiO₂ [11]

Penentuan Kinerja Sel Surya

Penentuan efisiensi DSSC dilakukan dengan metode kurva arus dan tegangan. Tujuan penentuan efisiensi DSSC adalah untuk mengetahui keefektifan satu susunan komponen DSSC dalam mengubah energi matahari menjadi energi listrik yang dinyatakan dalam persen. Pada penelitian ini pengukuran dilakukan di dalam ruangan dan di bawah pancaran sinar matahari. Hal ini bertujuan membandingkan pengaruh keberadaan sinar matahari terhadap performansi sel surya.

Kinerja sel surya tersensitisasi zat warna sangat dipengaruhi oleh foton yang terabsorpsi oleh zat warna dan konstruksi sel surya yang meliputi elektroda lawan, elektroda kerja dan elektrolit. Elektroda kerja dalam sistem DSSC merupakan lapisan TiO₂ tersensitisasi zat warna yang dilapiskan di atas substrat kaca berkonduksi. Substrat kaca yang digunakan adalah kaca TCO (*Transparent Conductive Oxide*) yang dilapisi *indium tin oxide* (In₂O₃:Sn atau ITO). Pada penelitian ini substrat kaca yg digunakan berasal dari kaca LCD. Konstruksi sel surya dibuat dengan sistem *sandwich* dengan luas aktif sel surya 1,5x 2 cm².

Pengaruh sinar matahari pada kinerja sel surya tersensitisasi zat warna ekstrak kol merah terlihat dengan dihasilkannya arus listrik pada kondisi pancaran sinar matahari yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan arus listrik yang dihasilkan pada kondisi di dalam ruangan. Hal ini disebabkan cahaya matahari mempunyai intensitas cahaya yang lebih tinggi selain itu spektrum cahaya yang dipancarkan lebih lebar. Oleh karena itu cahaya matahari merupakan sumber iluminansi yang paling efektif untuk pengujian. Kurva tegangan vs kuat arus sel surya pada kondisi pancaran sinar matahari (a) dan kondisi di dalam ruangan disajikan pada gambar 10.



Gambar 10. Kurva V vs I sel surya pada kondisi pancaran sinar matahari (a) dan kondisi di dalam ruangan (b).

Tegangan yang dihasilkan berasal dari perbedaan tingkat energi konduksi elektroda semikonduktor TiO₂ dengan potensial elektrokimia pasangan elektrolit redoks (I⁻/I₃⁻). 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.

Tabel 2. Hasil pengukuran arus-voltase sel surya

Substrat DSSC	V _{OC} (V)	I _{SC} (I) X 10 ⁻³	FF	P _{MAX} (W)	η (%)
pancaran sinar matahari	0,627	0,065	0,221	9,01 x 10 ⁻⁶	3,003 x 10 ⁻³
dalam ruangan	0,152	0,014	0,161	3,42 x 10 ⁻⁷	1,13 x 10 ⁻⁴

Keterangan: V_{OC} = tegangan open circuit, I_{SC} = arus short circuit, V_{MPP} = tegangan saat daya maksimum, I_{MPP} = arus saat daya maksimum, FF = Fill Factor, P_{MAX} = daya maksimum yang dihasilkan dari sel, η = efisiensi sel surya.

Parameter sel surya yang didapatkan dari kurva I vs V disajikan dalam Tabel 2. Dari tabel terlihat bahwa sel surya dalam penelitian ini memiliki harga kerapatan arus listrik (J_{sc}) yang relatif kecil. Efisiensi yang dihasilkan pada kondisi di bawah sinar matahari sebesar 3,003 x 10⁻³ % dan pada kondisi di dalam ruangan sebesar 1,13 x 10⁻⁴ %.

Nilai efisiensi yang kecil disebabkan oleh beberapa faktor. Kompetisi antara proses injeksi elektron dari keadaan tereksitasi ke pita konduksi TiO₂ dengan proses rekombinasi yang tidak diinginkan sehingga menghasilkan arus yang kecil. Elektrolit yang digunakan mempunyai waktu penggunaan yang pendek karena mudah rusak dan menguap karena panas. Hal ini sangat mempengaruhi efisiensi, karena proses donasi elektron kepada zat warna yang teroksidasi akibat injeksi elektron tidak akan berlangsung maksimal, sehingga zat warna tidak dapat kembali ke ke keadaan ground state. Selain itu sistem sandwich sel surya hanya diletakkan dengan menggunakan penjepit kertas sehingga ada kemungkinan terjadi penguapan elektrolit selama pengukuran berlangsung. Meskipun kinerja sel surya ditentukan dengan material yang masih sederhana, akan tetapi setidaknya dalam penelitian ini sudah berhasil mengkonversi energi surya menjadi energi listrik

4. Kesimpulan

Hasil karakterisasi komponen DSSC menunjukkan bahwa sensitizer ekstrak kol merah merupakan senyawa fenolik golongan flavonoid. Adanya kandungan antosianin ditunjukkan dengan panjang gelombang maksimum 525 nm dan diperkuat dengan munculnya gugus hidroksil, benzena dan karbonil pada serapan inframerah. Lapis tipis TiO₂ menunjukkan morfologi permukaan dengan ukuran rongga sekitar 220 nm, dan ketebalan penampang lintang sekitar 300 nm. Sedangkan difraktrogram lapis tipis TiO₂ menunjukkan bahwa TiO₂ memiliki fasa kristalin anatase. DSSC yang dihasilkan dengan memanfaatkan ekstrak kol merah sebagai sensitizer berhasil mengkonversi energi surya menjadi energi listrik dengan efisiensi pada pancaran sinar matahari sebesar 3,003. 10⁻³ % dan di dalam ruangan sebesar 1,13 x 10⁻⁴ %.

5. Daftar Pustaka

- [1] Michael Gratzel, Photoelectrochemical cells, *Nature*, 414, 6861, (2001) 338-344
- [2] M Grätzel, AJ McEvoy, Principles and applications of dye sensitized nanocrystalline solar cells (DSC), *Asian J. Energ. Env*, 5, (2004) 197-210
- [3] Michael R. Prairie, Albert Renken, James G. Highfield, K. Ravindranathan Thampi, Michael Grätzel, A fourier transform infrared spectroscopic study of CO₂ methanation on supported ruthenium, *Journal of Catalysis*, 129, 1, (1991) 130-144 [https://doi.org/10.1016/0021-9517\(91\)90017-X](https://doi.org/10.1016/0021-9517(91)90017-X)
- [4] Greg P Smestad, Michael Gratzel, Demonstrating electron transfer and nanotechnology: a natural dye-sensitized nanocrystalline energy converter, *J. Chem. Educ*, 75, 6, (1998) 752
- [5] Khwanchit Wongcharee, Vissanu Meeyoo, Sumaeth Chavadej, Dye-sensitized solar cell using natural dyes extracted from rosella and blue pea flowers, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91, 7, (2007) 566-571 <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.11.005>
- [6] I. Thaitae, Tipparach, U., dan Pukird, S, Effects of Natural Dyes On The Efficiency Of Dye Sensitized TiO₂ Nanocrystalline Solar Cells, *Thai Journal of Physics, Series 3*, 77, (2008)
- [7] PM Sirimanne, MKI Senevirathna, EVA Premalal, PKDDP Pitigala, V Sivakumar, K Tennakone, Utilization of natural pigment extracted from pomegranate fruits as sensitizer in solid-state solar cells, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 177, 2, (2006) 324-327
- [8] Oana Carp, Carolien L Huisman, Armin Reller, Photoinduced reactivity of titanium dioxide, *Progress in solid state chemistry*, 32, 1, (2004) 33-177
- [9] Marcelo Fonseca Xavier, Toni Jefferson Lopes, Mara Gabriela Novy Quadri, Marinho Bastos Quadri, Extraction of red cabbage anthocyanins: optimization of the operation conditions of the column process, *Brazilian archives of Biology and technology*, 51, 1, (2008) 143-152
- [10] Gordon J McDougall, Stewart Fyffe, Pat Dobson, Derek Stewart, Anthocyanins from red cabbage-

stability to simulated gastrointestinal digestion, *Phytochemistry*, 68, 9, (2007) 1285-1294

- [11] Nerine J Cherepy, Greg P Smestad, Michael Grätzel, Jin Z Zhang, Ultrafast electron injection: implications for a photoelectrochemical cell utilizing an anthocyanin dye-sensitized TiO₂ nanocrystalline electrode, *The Journal of Physical Chemistry B*, 101, 45, (1997) 9342-9351