

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Dalam rencana penelitian perancangan DSSC dibutuhkan teori penunjang mengenai berbagai hal yang mendukung penelitian ini. Teori penunjang dalam penelitian diperlukan untuk mempermudah pemahaman tentang prinsip kerja, bahan dan alat yang digunakan serta teori pendukung lainnya. Teori penunjang yang mendukung meliputi : definisi spektrum cahaya, definisi, struktur dan prinsip kerja DSSC, material penyusun DSSC, alat-alat pendukung pembuatan DSSC, serta sumber cahaya yang akan digunakan.

2.1 Spektrum Cahaya

Cahaya matahari merupakan gabungan cahaya dengan panjang gelombang dan spektrum warna yang berbeda-beda (Sears, 1949). Spektrum cahaya terdiri dari gelombang radio, gelombang mikro, inframerah, cahaya tampak, ultraviolet, sinar X dan sinar gamma. Spektrum cahaya tersebut memiliki panjang gelombang dan frekuensi yang berbeda-beda. Cahaya tampak memiliki jangkauan panjang gelombang 400 hingga 700 nm dengan rentang frekuensi $4,3 \times 10^{14}$ hingga $7,5 \times 10^{14}$ Hz (Hoffman, 1995).

2.2 Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC)

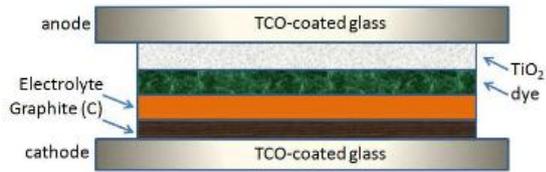
2.2.1 Definisi DSSC

Dye-Sensitized Solar Cell atau yang sering disebut dengan DSSC pertama kali ditemukan oleh seorang profesor bernama M. Grätzel pada tahun 1991 (O'Regan & Grätzel, 1991). Sejak pertama kali ditemukan, DSSC menjadi salah satu topik penelitian yang dilakukan oleh para peneliti di seluruh dunia. DSSC disebut juga sebagai sel surya generasi ketiga setelah sel surya konvensional dan sel surya berbasis film tipis (*thin film*).

DSSC organik merupakan energi alternatif yang memanfaatkan sinar matahari dengan biaya fabrikasi yang murah, mudah, serta ramah lingkungan. Proses penyerapan energi matahari pada DSSC organik mengadopsi proses fotosintesis tumbuhan dengan memanfaatkan zat pewarna (*dye*).

2.2.2 Struktur DSSC

Struktur DSSC yang digunakan yaitu berupa struktur *sandwich*, dapat dilihat pada Gambar 2.1.

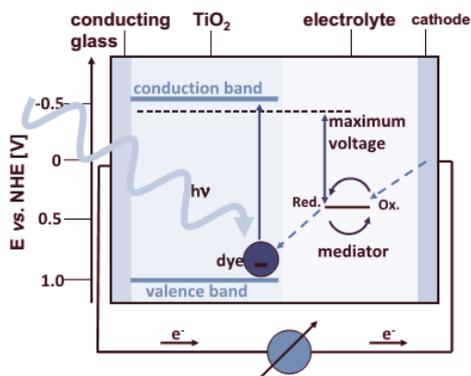


Gambar 2. 1 Struktur DSSC
Sumber: Pramono et al. (2013).

DSSC tersusun dari tiga komponen utama, yaitu elektroda kerja (*working electrode*), elektroda lawan (*counter electrode*) dan larutan elektrolit. Elektroda kerja merupakan kaca TCO (*Transparent Conductive Oxide*) yang dideposisi dengan lapisan semikonduktor TiO₂ dan *dye*. Elektroda kerja berfungsi sebagai penerima elektron dari *dye*, sehingga elektroda ini akan berperan sebagai anoda. Sedangkan elektroda lawan merupakan kaca TCO yang telah dilapisi oleh karbon yang berfungsi untuk mempercepat proses redoks pada elektrolit. Elektroda lawan akan bekerja sebagai katoda. Larutan elektrolit berfungsi untuk mentransfer elektron ke *dye* (media pengangkut muatan).

2.2.3 Prinsip Kerja DSSC

Prinsip kerja DSSC dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Prinsip kerja DSSC
Sumber: Nazeeruddin et al. (2011).

1. Eksitasi *dye*

Ketika cahaya matahari menimpa elektroda kerja DSSC, maka *dye* akan menyerap foton (e^-). Penyerapan foton tersebut membuat *dye* mendapatkan energi sehingga menyebabkan elektron pada *dye* tereksitasi dari *ground state* (D) ke *excited state* (D^{*}). Reaksi eksitasi pada *dye* dapat dilihat pada persamaan (2-1).

2. Transfer elektron ke pita konduksi TiO₂

Ketika elektron sudah berada dalam kondisi *excited state* (D^{*}), elektron langsung terinjeksi menuju pita konduksi TiO₂, sehingga molekul *dye* akan teroksidasi (D⁺). Reaksi oksidasi pada *dye* dapat dilihat pada persamaan (2-2).

3. Regenerasi *dye* oleh elektrolit

Karena elektron pada *dye* terinjeksi ke TiO₂, maka terdapat *hole* pada *dye*. Oleh karena itu, elektrolit (I⁻) akan mendonorkan elektron ke *dye*, sehingga *dye* kembali dari keadaan teroksidasi (D⁺) menjadi keadaan *ground state* (D). Reaksi regenerasi pada *dye* dapat dilihat pada persamaan (2-3).

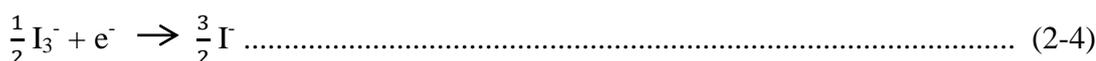
4. Dari lapisan semikonduktor TiO₂, elektron akan mengalir menuju elektroda lawan melalui rangkaian eksternal.

5. Reaksi elektrolit pada elektroda lawan

Adanya katalis pada elektroda lawan akan mempercepat reaksi redoks pada elektrolit. Elektron yang mengalir dari rangkaian eksternal akan diterima oleh elektrolit sehingga *hole* yang terbentuk pada elektrolit (I₃⁻) akibat donor elektron pada proses ke 3, berekombinasi dengan elektron membentuk iodide (I⁻). Reaksi pada elektrolit dapat dilihat pada persamaan (2-4).

6. Iodide digunakan sebagai pendonor elektron ke *dye* yang teroksidasi, sehingga akan terbentuk siklus transport elektron yang menyebabkan terjadinya konversi cahaya matahari menjadi listrik.

Reaksi kimia yang terjadi pada *dye* adalah sebagai berikut (Smestad & Grätzel, 1998):



2.3 Material Penyusun DSSC

2.3.1 Substrat

Pada bagian atas dan bawah struktur DSSC, terdapat substrat berupa kaca TCO (*Transparent Conductive Oxide*) yang berfungsi sebagai elektroda kerja (anoda) dan elektroda lawan (katoda). Elektroda kerja akan mentransfer elektron menuju elektroda lawan melalui rangkaian eksternal.

Terdapat beberapa macam kaca TCO yang dapat digunakan dalam membuat DSSC, diantaranya: ITO (*Indium Tin Oxide*), FTO (*Flourine Tin Oxide*), dan AZO (*Aluminum Zinc Oxide*). Namun diantara ketiga jenis kaca tersebut, jenis ITO-lah yang paling baik karena memiliki nilai konduktivitas yang cukup tinggi yakni 8-12 Ω/sq. Kaca TCO jenis ITO yang diproduksi oleh Sigma-Aldrich dapat dilihat pada Gambar 2.3.

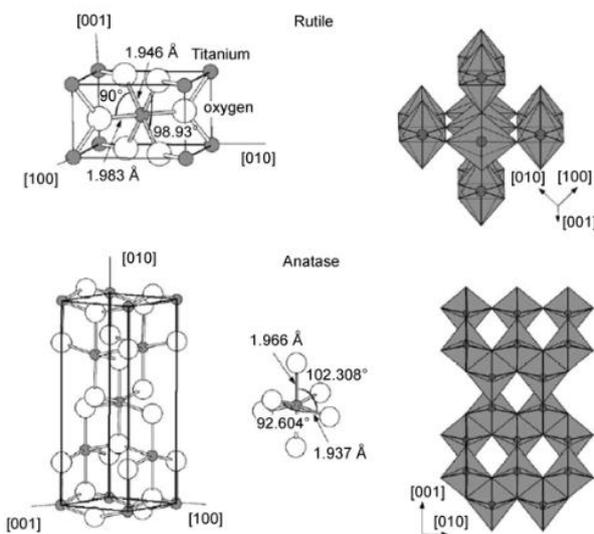


Gambar 2. 3 Kaca TCO (*Transparent Conductive Oxide*) (Sigma-Aldrich®)
Sumber: Laboratorium Elektronika Proses, Teknik Elektro FTUB.

2.3.2 Nanopartikel Semikonduktor TiO_2

Titanium oksida (TiO_2) adalah keluarga (IV) oksida yang merupakan semikonduktor dengan celah terlarang sebesar 3,0 – 3,2 eV. TiO_2 memiliki tiga fasa *polymorpik* yaitu *rutil*, *anatase*, dan *brookite*.

Fasa *anatase* merupakan fasa metastabil yang dapat diubah menjadi *rutil* dengan proses pemanasan. Kristal *anatase* akan terbentuk jika TiO_2 berada pada suhu 120°C , dan akan menjadi kristal *anatase* sempurna jika berada pada suhu 500°C . Kristal *anatase* memiliki celah terlarang sebesar 3,2 eV dan strukturnya lebih renggang dibanding struktur *rutil*. Apabila fasa *anatase* dipanaskan hingga mencapai suhu 700°C , maka fasa *anatase* akan berubah menjadi fasa *rutil* dengan celah terlarang sebesar 3,0 eV. Sedangkan fasa *brookite* sangat jarang terjadi dalam fasa TiO_2 , fasa *brookite* memiliki kestabilan pada temperatur 200°C sampai 400°C . Struktur dari semikonduktor TiO_2 dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Struktur kristal rutil dan anatase pada TiO_2
Sumber: Gupta et al. (2011).

Dengan struktur nanopori yang dimiliki TiO_2 , kinerja sistem akan meningkat. Hal ini disebabkan karena struktur nanopori memiliki karakteristik luas permukaan yang tinggi, sehingga akan meningkatkan jumlah cahaya yang terabsorpsi (Zhang et al., 2000). Selain itu, diantara oksida logam yang lain, titanium dioksida dikenal tidak beracun (*non toxic*), memiliki stabilitas termal cukup tinggi, dapat menyerap cahaya UV dengan baik, dan secara umum TiO_2 memiliki aktivitas fotokatalisis yang lebih tinggi dari pada fotokatalisis lain seperti ZnO , CdS , WO_2 , dan SnO_2 . Fotokatalisis merupakan suatu proses reaksi katalis dengan bantuan cahaya tampak (*visible light*) atau UV.

Pada proses fotokatalisis, fasa *anatase* memiliki potensi yang paling besar untuk digunakan sebagai fotokatalis (Tanaka et al., 1991) karena memiliki struktur kisi yang sesuai dengan aktivitas fotokatalis yang tinggi. Dengan melihat karakteristik serta kemampuan TiO_2 dalam proses fotokatalis, TiO_2 dalam fasa *anatase* dapat dimanfaatkan untuk menyerap cahaya UV. Dan untuk meningkatkan serapan spektra TiO_2 di daerah tampak, dibutuhkan lapisan zat warna yang mampu menyerap cahaya tampak. Zat warna tersebut berfungsi sebagai *sensitizer*. Selain itu TiO_2 juga berfungsi sebagai penerima elektron dari *dye*.



Gambar 2. 5 Titanium (IV) Oxide (oleh Sigma-Aldrich®)
Sumber: Laboratorium Elektronika Proses, Teknik Elektro FTUB.

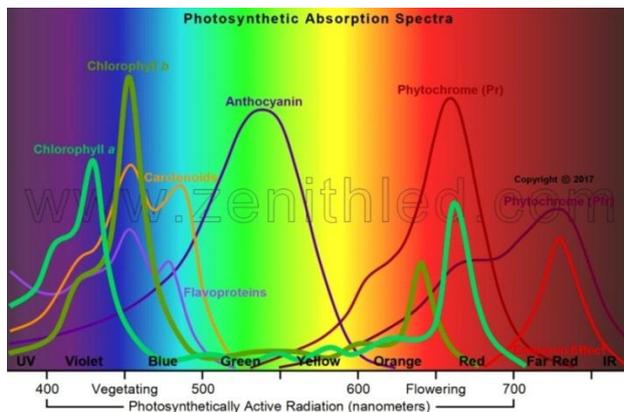
Pada penelitian ini digunakan TiO_2 produksi dari *Sigma-Aldrich*® dengan ukuran partikel sebesar ~21nm seperti yang terlihat pada Gambar 2.5.

2.3.3 Zat Pewarna (*Dye*)

Dye atau zat pewarna merupakan material yang sangat penting dalam menentukan efisiensi DSSC. Terdapat 2 jenis *dye* yang dapat digunakan sebagai material DSSC, yaitu *dye* sintetik, dan *dye* organik. *Dye* sintetik dapat berupa N79, N73 dan *Ruthenium*

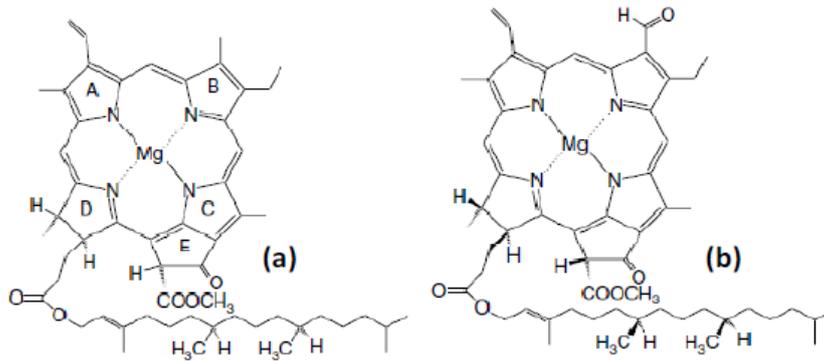
Complex. Dye ini mampu menghasilkan efisiensi yang cukup tinggi, yakni mencapai 10%, namun karena harga yang mahal dan juga susah untuk mendapatkan materialnya, banyak peneliti yang beralih ke *dye* organik. *Dye* organik bisa didapatkan dari berbagai macam pigmen tumbuhan. Pigmen tumbuhan berfungsi untuk menyerap cahaya matahari yang selanjutnya digunakan dalam proses fotosintesis. Sama halnya dengan DSSC, *dye* yang berasal dari pigmen ini digunakan sebagai penyerap energi matahari (foton).

Cahaya yang dapat dimanfaatkan tanaman untuk fotosintesis yaitu cahaya tampak dengan panjang gelombang antara 400-740 nanometer (Hopkins, 1999). Pada penelitian ini, akan digunakan pigmen klorofil dan pigmen antosianin dengan panjang gelombang seperti terlihat pada Gambar 2.6. Penggabungan kedua pigmen ini bertujuan untuk memaksimalkan penyerapan cahaya matahari sehingga efisiensi yang dihasilkan oleh DSSC akan semakin meningkat.



Gambar 2. 6 Spektrum penyerapan cahaya pada pigmen tumbuhan
Sumber: www.zenithled.com.

Klorofil adalah pigmen pemberi warna hijau pada tumbuhan, alga dan bakteri fotosintetik. Dapat dilihat pada Gambar 2.6, klorofil mampu menyerap cahaya tampak dengan panjang gelombang yang berada pada kisaran warna biru-ungu dan orange-merah. Sedangkan pada kisaran panjang gelombang 500-600 nm, kemampuan absorpsi pigmen klorofil sangat kurang. Senyawa klorofil merupakan senyawa yang cukup peka terhadap perubahan cahaya, temperatur, pH, dan oksigen. Senyawa klorofil akan bekerja stabil dalam menunjukkan warna hijau pada rentang temperatur kamar hingga 100° C dan pada pH sekitar netral (7 - 8), sedangkan pada pH asam (3 - 5) dan pH basa (11 - 12) klorofil mengalami reaksi dan menghasilkan berbagai senyawa turunan klorofil (Prasetyo, et.al., 2012). Struktur kimia klorofil ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Struktur kimia (a) Klorofil a $C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$ (b) Klorofil b $C_{55}H_{70}O_6N_4Mg$
Sumber: Sholeh et al. (2013).

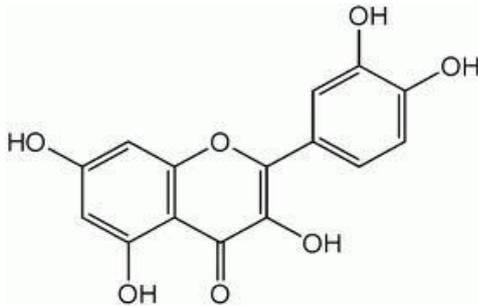
Beberapa tumbuhan yang mengandung pigmen klorofil dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Tumbuhan yang mengandung pigmen klorofil

Jenis Tanaman	Klorofil a (mg/g)	Klorofil b (mg/g)	Total (mg/g)
Kemangi	10,8500	2,9750	13,8200
Kangkung	13,1911	3,5856	16,7667
Cincau	16,1200	5,4250	21,5350
Bayam	18,2622	4,7700	23,0222
Pegagan	17,7611	6,5467	24,2911
Singkong	19,6592	7,8033	27,4467

Sumber: Setiari & Nurchayati (2009).

Pigmen antosianin merupakan pigmen yang berada pada kelompok *flavonoid* yang dapat memberikan warna merah, ungu, dan biru, pada tumbuhan dan bergantung pada pH lingkungan sekitar. Di dalam larutan, antosianin berada dalam lima bentuk kesetimbangan tergantung pada kondisi pH. Kelima bentuk tersebut yaitu *kation flavilium*, *basa karbinol*, *kalkon*, *basa quinonoidal*, dan *quinonoidal anionik*. Pada pH sangat asam (pH 1-2), bentuk dominan antosianin adalah *kation flavilium*. Pada bentuk ini, antosianin berada dalam kondisi paling stabil dan paling berwarna. Ketika pH meningkat di atas 4 terbentuk senyawa antosianin berwarna kuning (bentuk *kalkon*), senyawa berwarna biru (bentuk *quinoid*), atau senyawa yang tidak berwarna (*basa karbinol*) (Andarwulan & Faradilla, 2012). Struktur kimia antosianin dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Struktur kimia antosianin $C_{15}H_{11}O$
 Sumber: Alfian et al. (2015).

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Hardeli et al. (2013) didapatkan efisiensi dari beberapa tumbuhan yang mengandung pigmen antosianin seperti yang terlihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Efisiensi beberapa tumbuhan yang mengandung pigmen antosianin

Jenis Tanaman	Efisiensi (%)
Beras ketan hitam	0,405
Daun bayam	0,304
Bunga rosella	0,300
Buah naga	0,240
Ubi jalar ungu	0,110

Sumber: Hardeli et al. (2013).

Pada penelitian ini, penulis menggunakan *dye* klorofil dan antosianin. Pencampuran kedua pigmen ini bertujuan untuk memperluas rentang panjang gelombang penyerapan matahari, sehingga performansi yang dihasilkan oleh DSSC semakin tinggi. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Setiari & Nurchayati (2009) dan Hardeli et al. (2013), penulis memanfaatkan daun singkong yang memiliki kandungan pigmen klorofil yang cukup tinggi, dan beras ketan hitam sebagai penghasil pigmen antosianin yang mampu menghasilkan nilai efisiensi yang cukup tinggi. Selain itu, daun singkong dan beras ketan hitam merupakan tumbuhan khas Indonesia, sehingga penulis dapat dengan mudah mendapatkan tumbuhan tersebut dengan biaya yang cukup murah.

2.3.4 Elektrolit

Elektrolit berfungsi untuk menggantikan elektron pada *dye*, ketika proses eksitasi elektron dari *ground state* ke *excited state*. Selain itu, elektrolit juga menerima elektron dari elektroda lawan. Elektrolit redoks yang sering digunakan adalah pasangan iodide dan

triiodide (I/I_3^-) yang bertindak sebagai mediator redoks sehingga dapat menghasilkan proses siklus di dalam DSSC (Smestad & Grätzel, 1998).

2.3.5 Elektroda Lawan

Elektroda lawan (*counter electrode*) berfungsi sebagai katalisator. Katalis dibutuhkan untuk mempercepat reaksi redoks pada DSSC. Bahan yang dapat digunakan yaitu platina atau karbon. Platina mempunyai kemampuan katalistik yang tinggi, namun harganya relatif mahal. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan digunakan karbon sebagai katalis. Selain karena mudah dibuat, karbon juga mempunyai luas permukaan yang tinggi sehingga keaktifan reduksi *triiodide* pada karbon menyerupai platina. Karbon akan dibuat dengan cara membakar bagian konduktif kaca TCO pada api lilin.

2.4 Alat-alat Pendukung Pembuatan DSSC

2.4.1 Timbangan Digital

Timbangan digital merupakan alat ukur yang digunakan untuk mengukur massa suatu benda. Pada penelitian ini, timbangan digital digunakan untuk mengukur massa daun singkong dan beras ketan hitam, TiO_2 , PVA, Pottasium Iodide (KI), dan Iodide. Timbangan yang digunakan adalah *digital scale* tipe CLSeries dari OHAUS seperti yang terlihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Digital scale

Sumber : Laboratorium Elektronika Proses, Teknik Elektro FTUB.

2.4.2 Magnetic Stirrer dan Magnetic Stir Bar

Magnetic stirrer merupakan alat yang memanfaatkan putaran medan magnet untuk memutar *magnetic stir bar*. Alat ini berfungsi untuk mengaduk suatu larutan agar mencapai keadaan homogen. Dalam penelitian ini, *magnetic stirrer* digunakan saat proses pembuatan pasta TiO_2 serta dalam pembuatan ekstraksi klorofil dan antosianin. *Magnetic stirrer* yang digunakan adalah tipe 208 dari WINA Instruments dan *Magnetic Stir Bar* dengan panjang 2,5 cm seperti yang terlihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 10 *Magnetic stirrer* (Kiri) dan *magnetic stir bar* (Kanan)
Sumber : Laboratorium Elektronika Proses, Teknik Elektro FTUB.

2.4.3 *Furnace*

Furnace merupakan alat yang berfungsi sebagai pemanas/pembakar. Pada penelitian ini, *furnace* digunakan pada proses perekatan TiO_2 pada kaca TCO. *Furnace* diatur pada suhu 250°C dan pemanasan dilakukan selama 15 menit. *Furnace* yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *Furnace Vulcan A-550* seperti yang terlihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2. 11 *Furnace Vulcan A-550*
Sumber: Laboratorium Elektronika Proses, Teknik Elektro FTUB.

2.4.4 *Spectrophotometer UV-Visible*

Spektrofotometer adalah alat yang terdiri dari spektrometer dan fotometer. Spektrometer merupakan alat yang mampu menghasilkan sinar dari spektrum dan panjang gelombang tertentu, sedangkan fotometer adalah alat pengukur intensitas cahaya yang ditransmisikan atau yang diabsorpsi. Jadi spektrofotometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur energi secara relatif jika energi tersebut ditransmisikan, direfleksikan atau diemisikan sebagai fungsi dari panjang gelombang (Khopkar, 1990).

Spektrofotometer *UV-Vis* merupakan alat yang bekerja pada daerah ultraviolet dan sinar tampak. Di dalam spektrofotometer terdapat sumber cahaya berupa lampu tungsten yang memancarkan sinar tampak, dan lampu deuterium yang memancarkan sinar ultraviolet. Kedua sumber cahaya tersebut diteruskan menuju monokromator yang berfungsi untuk memilah panjang gelombang cahaya dan memfokuskan cahaya dari sumber. Cahaya yang sudah fokus akan diteruskan ke pelarut berupa blangko dan hasil

ekstraksi, dan kemudian akan dibaca oleh detektor yang berfungsi untuk mengubah energi sinar menjadi energi listrik. Energi listrik dari pelarut blangko dan pelarut ekstraksi akan dibandingkan dan dibaca oleh *recorder* yang berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi bentuk grafik. Konsentrasi larutan yang dianalisis sebanding dengan jumlah sinar yang diserap oleh zat yang terdapat dalam larutan.

Dalam penelitian ini, spektrofotometer digunakan untuk mengukur kandungan pigmen klorofil dan antosianin pada ekstrak daun singkong dan beras ketan hitam. Spektrofotometer yang digunakan adalah Spektrofotometer *UV-Vis* tipe UV-1800 dari Shimadzu, dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2. 12 Spektrofotometer *UV-1800*
Sumber : Laboratorium Farmasi, Fakultas Kedokteran UB.

2.4.5 Scanning Electron Microscope (SEM)

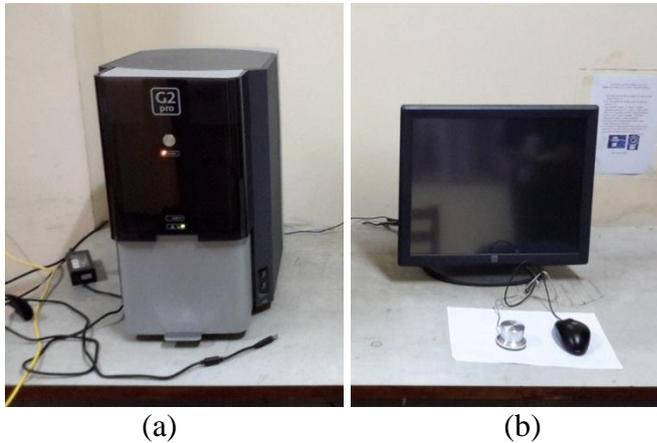
SEM (*Scanning Electron Microscope*) adalah alat untuk melihat benda yang tak terlihat/kasat mata dari ukuran mikroskop ($1 \mu m = 10^{-6} m$) hingga *nanospace* ($1 nm = 10^{-9} m$). Dengan menggunakan sinar elektron terfokus, SEM dapat memeperlihatkan secara detail dan kompleks struktur dan ketebalan suatu benda yang dapat diakses dengan mikroskop cahaya. SEM dapat memperbesar objek dari sekitar 10 kali hingga 300.000 kali.

Pada dasarnya, prinsip kerja SEM yaitu dengan memancarkan sinar elektron yang dihasilkan oleh pistol elektron. Sinar elektron tersebut dipancarkan menuju lensa magnetik yang berfungsi untuk memfokuskan elektron menuju ke sampel. Sinar elektron yang terfokus akan memindai seluruh sampel dengan diarahkan oleh koil pemindai (*scanning coil*). Ketika sinar elektron mengenai sampel, maka sampel akan mengeluarkan elektron baru yang kemudian akan diterima oleh detektor dan dikirim ke monitor.

SEM menyediakan fasilitas yang lebih dengan keuntungan melebihi mikroskop cahaya di tiga bidang utama, yaitu:

1. Resolusi pada perbesaran yang tinggi.
2. *Depth of field*/topografi.
3. Mikroanalisis.

Pada penelitian ini digunakan SEM Phenom G2 Pro di Laboratorium Sentral Mesin Universitas Brawijaya, seperti yang terlihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2. 13 (a) Scanning Electron Microscope (b) Display SEM
Sumber: Laboratorium Sentral Mesin, Teknik Mesin FTUB.

2.4.6 Digital Microscope

Mikroskop digital merupakan perpaduan antara mikroskop optik dengan kamera digital yang mampu mengambil gambar objek yang diteliti secara langsung. Mikroskop ini dihubungkan dengan komputer sehingga hasil pengamatan dapat dilihat lebih detail. Pada penelitian ini digunakan mikroskop digital Dino-lite AM4115 Series yang dilengkapi dengan lampu LED inframerah 850 nm. Mikroskop ini mampu melihat dan merekam gambar dengan kualitas 1,3 Megapixel dengan menggunakan kamera digital yang ada di dalamnya. Selain itu, mikroskop ini juga memiliki fitur *MicroTouch* yang berfungsi untuk memperkecil gambar blur saat pengambilan gambar pada mikroskop. Mikroskop digital Dino-lite ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2. 14 Mikroskop digital Dino-lite AM4115-FIT
Sumber: dino-lite.com

2.5 AM 1,5

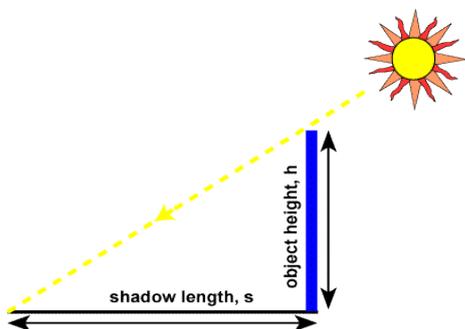
AM (*Air Mass*) menggambarkan seberapa banyak atmosfer yang harus dilalui radiasi matahari sebelum mencapai permukaan bumi. AM0 menggambarkan kondisi di luar angkasa, dimana radiasi matahari sebesar 1350 watt/m^2 . AM1 menunjukkan kondisi ideal

bumi dimana matahari berada tepat di atas permukaan laut. Sedangkan udara yang kita rasakan sehari-harinya merupakan AM1,5; dimana radiasi matahari yang dihasilkan saat udara cerah yaitu sebesar $930,6 \text{ watt/m}^2$. *Air mass* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} \dots\dots\dots (2-5)$$

dimana θ merupakan sudut dari sudut dari sumbu vertikal (*zenith angle*). *Zenith angle* merupakan sudut sinar datang matahari terhadap sumbu vertikal (tegak lurus).

AM 1,5 merupakan *air mass* yang umum digunakan dalam pengukuran sel surya karena pada keadaan ini spektrum cahaya tampak berada pada nilai yang paling tinggi yaitu sebesar 54%. AM 1,5 terjadi ketika sudut matahari sebesar 48° terhadap sumbu vertikal. Gambar 2.15 menunjukkan cara sederhana dalam pengukuran *air mass*.



Gambar 2. 15 Pengukuran Air Mass

Sumber: <http://www.pveducation.org/>.

Penentuan *air mass* dapat dirumuskan sebagai berikut (Honsberg et al., 2008):

$$AM = \sqrt{1 + \left(\frac{s}{h}\right)^2} \dots\dots\dots (2-6)$$

dimana:

AM = Air Mass

s = panjang bayangan benda

h = panjang benda

2.6 Fotometri

Cahaya matahari memancarkan gelombang elektromagnetik dalam rentang sinar ultraviolet, cahaya tampak hingga inframerah. Pengukuran cahaya matahari disebut dengan radiometri. Sedangkan fotometri merupakan pengukuran dalam rentang cahaya tampak. Dalam pengukuran cahaya tampak, terdapat beberapa istilah, diantaranya *luminous intensity* (candela), *luminous flux* (lumen) *illuminance* (lux) serta *luminance* (candela/m²).

2.6.1 *Luminous Intensity*

Intensitas penerangan (*luminous intensity*) adalah ukuran seberapa besar fluks (lumens) dipancarkan dalam sudut kerucut kecil di arah tertentu dari sumber cahaya (lampu) atau lumener. *Luminous intensity* dapat dirumuskan sebagai berikut (National Framework, 2009):

$$I = \Phi \omega \dots\dots\dots (2-7)$$

dimana :

I = Intensitas cahaya dalam candela (cd)

Φ = Fluk cahaya dalam lumen (lm)

ω = Jumlah steradian suatu sudut ruang

2.6.2 *Luminous Flux*

Fluks cahaya (*luminous flux*) adalah arus cahaya yang dipancarkan oleh sebuah sumber. *Luminous flux* biasa digunakan untuk mengukur *output* cahaya tampak pada lampu. Persamaan dari *luminous flux* adalah sebagai berikut (Sarojo, 1981):

$$F = 4\pi I l \dots\dots\dots (2-8)$$

dimana :

F = Fluks Cahaya (Lm)

$\pi = 3,14$

I = Intensitas Cahaya (Cd)

2.6.3 *Illuminance*

Ketika sinar cahaya mencapai permukaan padat, proses ini dikenal sebagai *illuminance* atau kuat pencahayaan. Dengan cara yang sama kita memiliki lumens untuk mengukur *luminous flux*, kita perlu pengukuran untuk jumlah iluminasi. Persamaan dari intensitas penerangan atau iluminasi cahaya sebagai berikut (National Framework, 2009):

$$E = F / A \dots\dots\dots (2-9)$$

dimana :

E = Penerangan pada suatu titik pada permukaan

F = Fluks cahaya (lumens)

A = Luas permukaan (m^2)

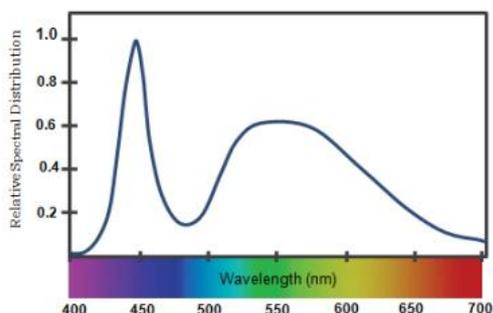
Dalam SI atau Sistem International unit, unit dasar dari pencahayaan adalah Lumen per meter persegi atau Lux.

2.6.4 Luminance

Luminance merupakan banyaknya cahaya yang diteruskan atau dipantulkan oleh suatu obyek. Apabila suatu obyek memiliki permukaan yang gelap, maka cahaya yang diserap semakin banyak. Begitupula sebaliknya, bila suatu obyek memiliki permukaan terang, maka cahaya yang dipantulkan semakin banyak.

2.7 Lampu LED

Selain menggunakan cahaya matahari, pada penelitian ini akan digunakan lampu LED sebagai media pengukuran DSSC. Lampu LED yang digunakan adalah lampu LED *Cool Daylight* yang diproduksi oleh Philips. Lampu LED ini menghasilkan spektrum cahaya tampak seperti yang terlihat pada Gambar 2.16. Lampu LED *Cool Daylight* memiliki sebaran spektrum cahaya tertinggi pada panjang gelombang 450 nm dengan temperatur warna sebesar 6500K.



Gambar 2. 16 Spektrum cahaya LED *Cool Daylight*
Sumber : Philips Lumileds Lighting Company (2014).

