

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian sebelumnya

Penelitian tentang DSSC sudah banyak dilakukan oleh beberapa orang. Adapun penelitian sebelumnya yang membahas tentang performa pewarna alami sebagai fotosensitizer DSSC, diantaranya Zainal dan kawan-kawan (2015) meneliti tentang efisiensi *dye sensitized solar cell* menggunakan pewarna alami klorofil daun pepaya. Dalam penelitian ini menggunakan variabel bebas yaitu klorofil yang dilarutkan pada *ethyl alcohol* atau *ethanol*, sehingga terbentuk variasi konsentrasi 60,70,80, dan 90 mM. Variasi konsentrasi klorofil dibandingkan dengan pewarna sintetis *ruthenium complex* 0,3 mM N719 (*Dyesol*). Pengujian yang dilakukan adalah spektrofotometer UV-Vis, *cyclic voltammetry*, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), dan karakterisasi I-V. Hasil pada penelitian ini adalah efisiensi dari pewarna alami klorofil lebih rendah daripada pewarna sintetis. Efisiensi tertinggi klorofil adalah 0,094% pada konsentrasi 90 mM, sedangkan efisiensi sintetis *ruthenium complex* adalah 1,293%. Variasi konsentrasi pewarna klorofil mempengaruhi efisiensi DSSC. Semakin tinggi konsentrasi pewarna, semakin tinggi nilai efisiensi DSSC. Nilai efisiensi 60,70,80, dan 90 mM adalah 0,40% , 0,45% , 0,74 % , dan 0,94 %.

Kim, H. –J., dan kawan-kawan (2013) meneliti tentang efisiensi pewarna kurkumin yang di ekstraksi dari kunyit (*curcuma longa linn*) sebagai fotosensitizer DSSC. Dalam penelitian ini menggunakan variabel bebas jenis pelarut dalam mengekstraksi kurkumin. Pelarut yang digunakan adalah *ethanol*, *hydrochloric acid*, *nitric acid*, dan *acetic acid*. Pengujian yang dilakukan adalah karakterisasi absorbansi menggunakan spektrofotometer UV-Vis, dan karakterisasi arus dan tegangan (I-V) menggunakan solar simulator. Hasil pengujian spektrofotometer UV-Vis adalah pelarut dengan absorbansi tertinggi ke terendah adalah *acetic acid*, *ethanol*, *hydrochloric acid*, dan *nitric acid*. Semakin tinggi nilai absorbansi cahaya maka semakin tinggi juga nilai efisiensi. Dalam penilitisn ini, kurkumin menggunakan pelarut *acetic acid* memiliki efisiensi paling tinggi yaitu 0,6%. Sedangkan pelarut *ethanol*, *hydrochloric acid*, dan *nitric acid* berturut-turut adalah 0,36%, 0,28% dan 0,28%

Yudha dan kawan-kawan (2015) meneliti tentang efisiensi dan ketahanan kurkumin sebagai pewarna alami untuk fotosensitizer *Dye sensitized solar cell* (DSSC) dengan menambah logam Cu^{2+} . Pada penelitian ini variabel bebas yang digunakan adalah lama pemanasan pewarna yaitu 0 jam, 100 jam, dan 200 jam. Pewarna alami dilakukan pengujian spektrofotometer UV-Vis, *cyclic voltammetry*, dan karakterisasi I-V. Adapun hasilnya pewarna kurkumin dengan penambahan zat logam Cu^{2+} , mampu meningkatkan efisiensi dan ketahanan DSSC jika dibandingkan dengan menggunakan pewarna kurkumin saja. Pengujian absorpsi menunjukkan pewarna Cu-kurkumin memiliki nilai absorpsi lebih tinggi daripada kurkumin. Pengujian menggunakan *cyclic voltammetry* menunjukkan tingkat energi pewarna. Semakin tinggi energi *bandgap* pada pewarna maka *photocurrent* yang dihasilkan akibat dari *photoexcitation* menjadi lebih besar. Energi *band gap* pada pewarna Cu-kurkumin (1,93 eV) lebih kecil pada pewarna kurkumin (1,16 eV). Pewarna Cu-kurkumin mampu meningkatkan efisiensi DSSC sebesar 1,4 kali jika dibandingkan pewarna kurkumin. Efisiensi kurkumin yaitu 0,185%, dan Cu-kurkumin yaitu 0,259%.

Dahlan dan kawan-kawan (2016) telah melakukan penelitian *dye sensitized solar cells* (DSSC) dengan campuran pewarna alami dari kunyit (kurkumin) dan beras merah (antosianin). Pewarna di ekstraksi menggunakan *ethanol* 96% dan dicampur dengan perbandingan 1:1. Pada penelitian ini variabel bebas adalah pewarna kurkumin, antosianin, dan pencampuran kurkumin-antosianin. Karakterisasi dilakukan menggunakan spektrofotometri UV-Vis, dan karakterisasi I-V. Hasil pengujian spektrofotometer UV-Vis adalah pencampuran pewarna kurkumin-antosianin memiliki daerah serapan gabungan kurkumin dan antosianin, sehingga daerah serapan cahaya lebih lebar. Panjang gelombang kurkumin, antosianin dan campuran kurkumin-antosianin berturut-turut adalah 400-580 nm, 460-680 nm, dan 400-680 nm. Semakin lebar daerah serapan cahaya tampak maka semakin tinggi nilai efisiensi DSSC. Nilai efisiensi kurkumin (kunyit) adalah 0,056 %, antosianin (beras merah) adalah 0,53%, dan campuran kurkumin-antosianin adalah 0,207%.

Maya dan kawan-kawan (2017) meneliti tentang pengaruh campuran klorofil-antosianin sebagai fotosensitizer DSSC. Pada penelitian ini menggunakan variabel bebas yaitu perbandingan volume. Pencampuran menggunakan pelarut *ethanol* dengan perbandingan volume kurkumin/klorofil adalah 25%/75% ; 50%/50% dan 75%/25%. Pengujian yang dilakukan adalah spektrofotometer UV-Vis, dan karakterisasi I-V. Hasil pada penelitian adalah pencampuran pewarna menyebabkan daerah absorpsi lebih lebar. Dengan meningkatnya jumlah volume kurkumin, maka nilai efisiensi akan meningkat juga.

Pencampuran kurkumin/klorofil 75%/25% , 50%/50% , 25%/75% memiliki nilai efisiensi berturut-turut adalah 0,15% , 0,07% , dan 0,04%.

2.2 Energi Matahari

Matahari adalah sumber energi utama yang memancarkan energi termal ke permukaan bumi. Energi yang dihasilkan matahari dipancarkan ke permukaan bumi dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Selama transfer energi ke permukaan bumi terjadi proses radiasi dan konveksi. Energi matahari yang sampai ke permukaan bumi tidak sama di setiap tempat dan disetiap saat. Hal ini disebabkan oleh perubahan jarak bumi dan matahari serta adanya penyusutan atmosferik, yaitu pengurangan energi matahari yang terjadi dalam perjalanan melalui atmosfer bumi. Energi matahari cukup besar tetapi energi yang sampai ke permukaan bumi jauh lebih kecil dari energi sumbernya. Radiasi matahari yang mampu sampai ke permukaan bumi adalah radiasi termal dengan panjang gelombang 300 – 2500 nm. (Irawan, 2015)

Salah satu perpindahan energi adalah radiasi. Radiasi matahari adalah pancaran energi yang berasal dari termonuklir yang terjadi di matahari. Perpindahan energi matahari berbentuk sinar elektromagnetik. Radiasi matahari memiliki spektrum warna cahaya matahari yang sampai ke permukaan data dilihat pada tabel 2.1

Tabel 2.1
Pembagian spektrum radiasi matahari

Spektrum	Panjang gelombang (nm)
Ultraviolet	0,0 – 400
Sinar Tampak	400 – 750
Infra Merah	>750

Sumber : Irawan (2015)

Dalam rambatannya menuju permukaan bumi, radiasi matahari akan mengalami berbagai peristiwa. Peristiwa tersebut diantaranya adalah hamburan, penyerapan, dan pemantulan yang disebabkan oleh partikel-partikel yang berada di atmosfer. Cahaya matahari yang sampai ke permukaan bumi yang paling besar berada pada daerah panjang gelombang radiasi cahaya tampak, yaitu 400 – 750 nm.

Cahaya tampak termasuk spektrum gelombang elektromagnetik, yaitu gelombang yang getarannya merupakan perpaduan antara medan listrik dan medan magnetik. Getaran medan listrik dan medan magnetik tegak lurus terhadap arah perambatan cahaya, sehingga

cahaya tampak termasuk gelombang transversal. Gelombang elektromagnetik dapat merambat baik ada medium maupun tanpa medium. Karena itulah cahaya tampak matahari dapat merambat melalui ruang hampa (vakum) yang terdapat dalam atmosfer untuk sampai ke bumi. Sebagai gelombang elektromagnetik, cahaya tampak memiliki panjang gelombang 400 – 750 nm seperti pada gambar 2.1. Pada gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang tertentu memiliki frekuensi dan energi foton yang berbeda. Semakin tinggi panjang gelombang, maka nilai frekuensi dan energi foton akan semakin rendah.



Color	Wavelength	Frequency	Photon energy
violet	380–450 nm	668–789 THz	2.75–3.26 eV
blue	450–495 nm	606–668 THz	2.50–2.75 eV
green	495–570 nm	526–606 THz	2.17–2.50 eV
yellow	570–590 nm	508–526 THz	2.10–2.17 eV
orange	590–620 nm	484–508 THz	2.00–2.10 eV
red	620–750 nm	400–484 THz	1.65–2.00 eV

Gambar 2.1 Panjang gelombang pada cahaya tampak
Sumber : Material.com . 2014

Foton merupakan partikel terkecil pada gelombang elektromagnetik. Foton memiliki sifat dualisme yaitu sebagai partikel dan gelombang. Foton sebagai gelombang karena memiliki sifatnya dapat dibiaskan, atau dibelokkan, seperti fenomena bengkoknya pensil yang dalam gelas berisi air. Selain itu, apabila foton bertabrakan pada permukaan benda, maka dapat dipantulkan dengan besar sudut pantul yang sama dengan sudut datang. Foton juga bertindak sebagai partikel, karena dapat berinteraksi dengan partikel lain. Seperti fenomena panasnya permukaan aspal. Hal ini terjadi karena ada sebagian energi dari cahaya matahari yang diserap oleh aspal sehingga permukaan aspal menjadi panas. Mata manusia juga berinteraksi dengan foton. Saat foton menabrak retina mata, energi elektromagnetik foton berubah menjadi energi listrik yang ditransmisikan ke otak melalui sistem syaraf mata. Terkonversinya energi elektromagnetik foton menjadi energi listrik disebut fotoelektrik. Prinsip fotoelektrik sama halnya dengan komponen panel surya yang berfungsi untuk mengubah energi sinar matahari menjadi energi listrik. Foton memiliki

karakteristik antara lain foton tidak memiliki massa, tidak bermuatan listrik, dan membawa energi dan momentum yang besarnya tergantung dari frekuensinya.

2.3 Sel Surya

Sel surya disebut juga sel surya *photovoltaic* (PV). Sel surya PV adalah semikonduktor yang disusun dengan menggabungkan silikon dengan jenis P dan jenis N. Silikon jenis P yaitu silikon yang bermuatan positif karena kekurangan elektron, sedangkan silikon jenis N adalah silikon yang bermuatan negatif karena kelebihan elektron. Kondisi kelebihan atau kekurangan muatan elektron tersebut bisa terjadi dengan mendoping material dengan atom *dopant*. Sebagai contoh, untuk mendapatkan material silikon jenis P, silikon didoping menggunakan atom boron, sedangkan untuk mendapatkan material silikon jenis N, silikon didoping menggunakan atom fosfor.

Pada semikonduktor terbentuk tiga daerah berbeda, yaitu daerah tipe P, N dan P-N *junction* atau deplesi. Pada daerah tipe P mayoritas pembawa muatannya adalah *hole*, bermuatan positif dan bertindak sebagai penerima (*acceptor*) elektron. Sedangkan pada daerah tipe N mayoritas pembawa muatan adalah elektron bebas, bermuatan negatif dan bertindak sebagai donor elektron. Daerah P-N *junction* merupakan daerah dari kedua sisi positif dan negatif yang akan mendorong elektron bebas dan *hole* untuk bergerak ke arah yang berlawanan, menghasilkan energi listrik internal (Septina dkk, 2007)

Perkembangan sel surya *photovoltaic*, dimulai oleh ilmuwan Prancis bernama Edmund Becquerel, pada tahun 1839 menemukan bahwa cahaya yang jatuh pada materi tertentu dapat menyebabkan percikan listrik yang dikenal dengan *photoelectric effect*, sehingga muatan ini dapat diperbanyak untuk menghasilkan arus listrik. Pada tahun 1954, peneliti *Bell Telephone* menemukan pertama kali sel surya silikon berbasis *p-n junction* dengan efisiensi 6 %. Saat ini, sel surya silikon mendominasi pasar sel surya dengan pangsa pasar sekitar 82 % dengan efisiensi lab dan komersil berturut-turut sebesar 24,7 % dan 15 %, yang berkekuatan 3 kali lebih besar daripada penemuan sebelumnya (Septina dkk, 2007). Penelitian selanjutnya yang sedang diteliti oleh para peneliti, yaitu mengembangkan sel surya dengan efisiensi tinggi yang terbuat dari bahan baku, seperti *gallium arsenide* yang mencapai efisiensi 33 %. Sel-sel seperti ini dapat dibuat dengan lensa dan kaca pemantul yang memfokuskan sinar ke dalamnya, sehingga sangat mengurangi bahan semikonduktor.

Sel surya yang banyak digunakan sekarang ini berbahan dasar silikon yang merupakan hasil dari perkembangan pesat teknologi semikonduktor anorganik yang memiliki efisiensi tinggi. Pada aplikasinya, tenaga listrik yang dihasilkan oleh satu modul sel surya masih cukup kecil jika digunakan sebagai pembangkit listrik tenaga surya (PLTS), maka dalam pemanfaatannya beberapa modul digabungkan dengan cara hubungan seri maupun paralel yang disebut *array* (Flavin, 2013). Walaupun sel surya sekarang memiliki efisiensi yang tinggi dengan bahan silikon, namun biaya produksinya lebih mahal daripada sumber energi fosil. Sehingga membuat para peneliti mencari inovasi teknologi sel surya dengan biaya yang rendah.

2.4 Pengertian Umum *Dye sensitized solar cell* (DSSC)

Dye sensitized solar cell (DSSC) merupakan sel surya fotoelektrokimia menggunakan semi konduktor yang dilapisi oleh zat warna untuk meningkatkan efisiensi dan elektrolit sebagai medium transport muatan (Yudha, 2016). DSSC pertama kali ditemukan oleh Michael Gratzel dan Brian O'regan pada tahun 1991 di *École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Swiss*. *Dye sensitized solar cell* (DSSC) menjadi salah satu topik penelitian yang dilakukan intensif oleh peneliti di seluruh dunia. Hal ini dikarenakan DSSC merupakan solusi terbaru dalam teknologi sel surya yang mampu difabrikasi dengan mudah dan biaya yang murah.

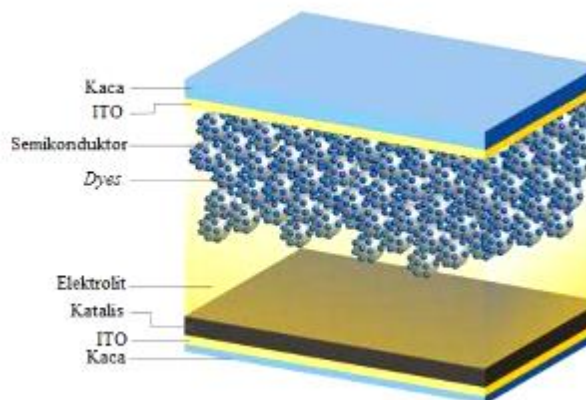
Perbedaan sel surya silikon dengan DSSC terletak pada proses kerjanya. Pada sel surya silikon seluruh proses penyerapan cahaya dan transfer muatan melibatkan material semikonduktor (silikon) saja. Pada silikon terbentuk tiga daerah berbeda, yaitu daerah tipe P, N dan P-N *junction*. Pada daerah tipe P mayoritas pembawa muatannya adalah *hole*, positif dan bertindak sebagai penerima (acceptor) elektron. Sedangkan pada daerah tipe N mayoritas pembawa muatan adalah elektron bebas, negatif dan bertindak sebagai donor elektron. Daerah P-N *junction* merupakan daerah dari kedua sisi positif dan negatif yang akan mendorong elektron bebas dan *hole* untuk bergerak ke arah yang berlawanan, menghasilkan energi listrik internal. Sedangkan pada teknologi *dye sensitized solar cell* penyerapan cahaya dan transfer muatan terjadi pada proses yang terpisah, dimana penyerapan (absorbansi) cahaya oleh pewarna dan transfer elektron dilakukan oleh semi konduktor. Ketika absorbansi cahaya dilakukan oleh molekul pewarna (*dye*), kemudian perpindahan elektron dilakukan oleh semikonduktor (TiO₂ atau ZnO) dengan ukuran nanopartikel. Semikonduktor memiliki *band gap* lebar, mengakibatkan elektron akan berpindah dari pita konduksi ke pita valensi, yang membuat ruang reaksi fotokatalis

sehingga terjadi arus listrik. Keuntungan DSSC dibanding dengan sel surya jenis lainnya, antara lain:

1. DSSC merupakan teknologi solar generasi ketiga yang paling efisien yang tersedia, dengan material penyusun yang lebih aman terhadap lingkungan.
2. Proses fabrikasinya lebih sederhana tanpa menggunakan peralatan yang rumit dan mahal sehingga biaya fabrikasinya lebih murah
3. DSSC dapat bekerja dalam kondisi cahaya rendah seperti sinar matahari tidak langsung dan langit mendung
4. Bahan penyusun yang mudah didapatkan dan aman terhadap lingkungan

2.5 Struktur DSSC

Pada umumnya DSSC terdiri dari 5 komponen utama, yaitu *Transparent Conductive oxide* (TCO), lapisan semikonduktor (TiO_2 atau ZNO), *dye sensitizer*, elektrolit (*Iodide / Tri-Iodida*), Elektroda Berlawanan (platinum atau karbon).



Gambar 2.2 Struktur *Dye sensitized solar cell* (DSSC)
Sumber : Setiawan (2015)

2.5.1 *Transparent Conductive Oxide* (TCO)

Transparent Conductive Oxide (TCO) merupakan kaca dengan lapisan substrat yang berfungsi sebagai tempat mengalirnya muatan (Vera,2015). TCO memiliki karakteristik, yaitu transmitansi yang tinggi pada panjang gelombang cahaya tampak dan memiliki hambatan/resistivitas listrik yang rendah. Pada umumnya material yang digunakan yaitu *flourine-doped tin oxide* ($\text{SnO}_2\text{:F}$ atau FTO) dan *Indium Tin Oxide* ($\text{In}_2\text{O}_3\text{:Sn}$ atau ITO), hal ini dikarenakan ketika proses pelapisan dengan semikonduktor (TiO_2/ZNO) diperlukan proses *sintering* pada suhu 400-500°C dan kedua material

merupakan pilihan yang cocok karena tidak mengalami efek pada temperatur yang tinggi (Wilman, 2007)

Kaca TCO memiliki dua istilah, yaitu transparan (*Transparent*) dan konduktif (*conductive*). Disebut lapisan transparan (*Transparent*) karena substrat pada kaca sangat tipis, atau kurang lebih setebal 150 - 250 nanometer. Lapisan tipis bersifat tembus pandang terhadap cahaya tampak, sehingga kemampuan kaca dalam meneruskan cahaya diatas 75%. Kaca TCO juga disebut konduktif (*conductive*) karena material ini bersifat seperti semikonduktor yang dapat menghantarkan listrik dalam besaran tertentu

Proses pelapisan substrat tipis yang berskala nanometer, yaitu dengan cara menguapkan atau mengevaporasi partikel-partikel atom dari material oksida pada permukaan sebuah kaca, sehingga akan diperoleh suatu lapisan material TCO dengan ketebalan bervariasi antara 100 hingga 250 nanometer. Aplikasi dari *Transparent conductive oxide* (TCO) yaitu *liquid crystal displays* (LCD), aspek alternatif energi seperti sel surya, dan sensor gas (Widiyastuti dkk, 2011).

2.5.2 Semikonduktor

Semikonduktor merupakan tempat melekatnya pewarna dan juga jalur transfer elektron yang tereksitasi dari pewarna saat dikenai cahaya. Semi konduktor yang biasa digunakan dari metal-oksida / oksida yaitu TiO_2 , ZnO atau SnO_2 . Penggunaan oksida semikonduktor dalam fotoelektrokimia dikarenakan kestabilannya menghadapi fotokorosi. Sebuah semikonduktor harus memiliki luas permukaan yang tinggi, berpori tinggi dan karakteristik harus sesuai dengan *sensitizer* sehingga meningkatkan efisiensi dari DSSC.

TiO_2 paling banyak digunakan karena efisiensinya lebih tinggi dari semikonduktor lain. TiO_2 merupakan bahan semikonduktor yang bersifat inert, stabil terhadap fotokorosi dan korosi oleh bahan kimia. Film TiO_2 memiliki *band gap* yang tinggi ($>3\text{eV}$) dan memiliki transmisi optik yang baik. Lebar pita energinya yang besar ($> 3\text{eV}$), dibutuhkan dalam DSSC untuk transparansi semikonduktor pada sebagian besar spektrum cahaya matahari. TiO_2 yang digunakan pada DSSC umumnya berfasa anatase karena mempunyai kemampuan fotoaktif yang tinggi. TiO_2 dengan struktur nanopori yaitu ukuran pori dalam skala nano akan menaikkan kinerja sistem karena struktur nanopori mempunyai karakteristik luas permukaan yang tinggi sehingga akan menaikkan jumlah *dye* yang teradsorb yang implikasinya akan menaikkan jumlah cahaya yang terabsorb (Kumara, 2012). Selain itu, juga terdapat semi koduktor lain seperti oksida seng, timah oksida, MgO , Al_2O_3 .

2.5.3 Pewarna (*dye*)

Pewarna merupakan bagian yang berfungsi penyerap (absorpsi) cahaya matahari untuk menghasilkan elektron. Pewarna teradsorpsi pada permukaan TiO_2 . Bahan pewarna dibedakan menjadi dua macam, yaitu *dye* dan *pigment*. *Dye* adalah bahan yang mempunyai daya tarik menarik dengan substrat yang akan mewarnai, sedangkan disebut *pigment* jika bahan tersebut tidak mempunyai daya tarik menarik dengan substrat yang akan diwarnai. *Dye* harus memiliki kekuatan mewarnai yang relatif tinggi terhadap material yang diwarnai. Warna pada *dye* terjadi karena bahan tersebut menyerap lebih banyak panjang gelombang cahaya daripada bahan yang lain. Selain itu, *dye* juga harus stabil untuk penggunaan dalam jangka waktu yang lama.

Dye yang diaplikasikan pada *dye sensitized solar cell* berbeda dengan aplikasi pada tekstil. Pada sel surya tersensitasi pewarna, zat pewarna direkayasa sehingga menghasilkan elektron/gugus aktif ($-\text{OH}$, $\text{C}=\text{O}$, dan $-\text{COOH}$) sebagaimana dapat dilihat pada gambar 2.2. Fungsi dari gugus sebagai pembawa muatan dalam sel surya. Gugus-gugus ini tidak diperlukan pada saat aplikasi zat warna alami untuk tekstil. Selain harus mempunyai gugus-gugus tertentu, zat pewarna alami untuk sensitizer juga harus mampu berikatan dengan semikonduktor, misalnya TiO_2 dan ZnO .

Pada umumnya *sensitizer* dalam sel surya DSSC dibagi menjadi dua jenis, yaitu pewarna sintesis *ruthenium* seperti N719, N3, dan *black dye*. Efisiensi tertinggi dari DSSC dengan TiO_2 dan pewarna *ruthenium complex* saat ini telah mencapai 11 % (Gratzel, M., 2006). Namun yang menjadi kendala adalah harga dari pewarna sintesis yang mahal dan disuplai hanya beberapa fabrikasi. Proses pembuatan dan sintesisnya pun tergolong rumit dan membutuhkan waktu lama. Selain itu, pewarna sintesis mengandung logam berat yang berdampak pada lingkungan. Pewarna alami bisa berupa buah buahan, daun daun atau biji biji yang mengandung zat pewarna. Kelebihan dari *dye* alami adalah mudah didapatkan, mudah diproses, lebih murah, dan tentunya sangat ramah lingkungan. Namun, kekurangan dari pewarna alami adalah efisiensi yang lebih rendah dibandingkan pewarna sintesis yaitu dibawah 1 %. Selain itu pewarna alami memiliki kendala *life time* dan stabilitas.

DSSC mampu bekerja pada sinar tampak. Sinar tampak merupakan gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang 400 – 750 nm. Sedangkan DSSC tidak dapat menyerap cahaya gelombang ultraviolet ($< 400 \text{ nm}$) dan gelombang inframerah ($> 750 \text{ nm}$).

2.5.4 Elektrolit

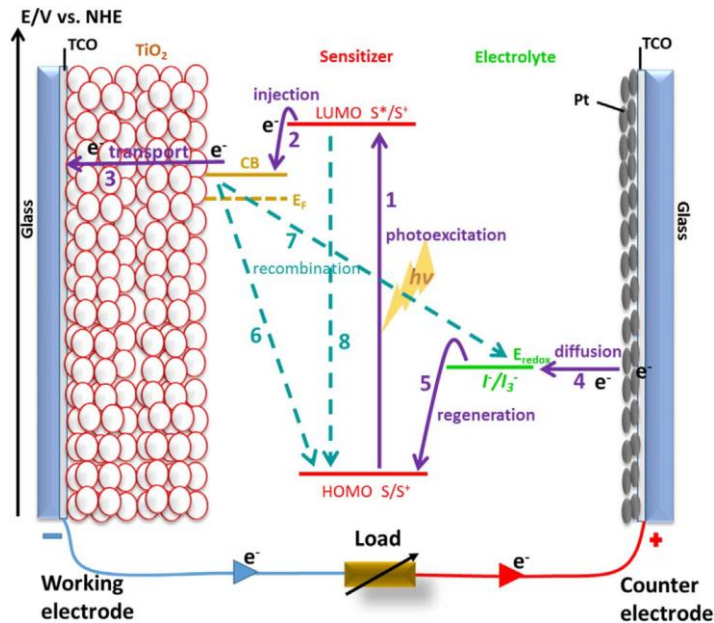
Elektrolit berfungsi untuk meregenerasi *dye* dan mediator elektron sehingga menghasilkan proses siklus dalam sel. Elektrolit memiliki kelemahan yaitu bersifat lebih mudah menguap dengan titik didih 82 °C, hal itu merupakan temperatur yang dicapai sel surya saat terkena radiasi secara penuh (Hastuti & Ningsih, 2013). Elektrolit yang digunakan pada DSSC terdiri dari iodine (I) dan triiodide (I³⁻) sebagai pasangan redoks dalam pelarut. Karakteristik ideal dari pasangan redoks untuk elektrolit DSSC yaitu:

1. Potensial redoksnnya secara termodinamika berlangsung sesuai dengan potensial redoks dari *dye* untuk tegangan sel yang maksimal.
2. Memiliki viskositas rendah, titik didih dan sifat dielektrik yang tinggi
3. Tingginya kelarutan terhadap pelarut untuk mendukung konsentrasi yang tinggi dari muatan pada elektrolit.
4. Pelarut mempunyai koefisien difusi yang tinggi untuk transportasi massa yang efisien.
5. Tidak adanya karakteristik spektral pada daerah cahaya tampak untuk menghindari absorbansi cahaya datang pada elektrolit.
6. Kestabilan yang tinggi baik dalam bentuk tereduksi maupun teroksidasi. (Kumara, 2012)

2.5.5 Elektroda Berlawanan (*Counter Electrode*)

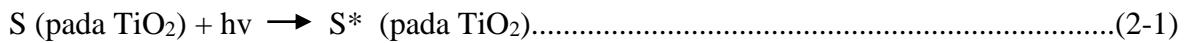
Dalam aplikasi DSSC pada *counter elektrode* diberi katalis. Gratzel mengembangkan desain DSSC dengan menggunakan *counter elektroda* karbon sebagai lapisan katalis. Katalis di butuhkan untuk mempercepat kinetika reaksi proses reduksi *triiodide* pada FTO. Karena luas permukaanya yang tinggi, counter-elektroda karbon mempunyai keaktifan reduksi *triiodide* yang menyerupai elektroda platina. Umumnya material yang sering digunakan yaitu platina. Platina mempunyai kemampuan sifat katalitik yang tinggi, namun harganya mahal (Hastuti & Ningsih, 2013).

2.6 Mekanisme Kerja DSSC

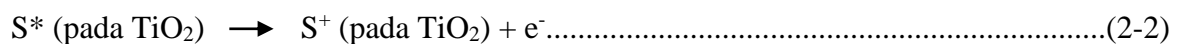


Gambar 2.3 Mekanisme kerja *Dye sensitized solar cell* (DSSC)
 Sumber : Doddy (2015)

1. Proses pertama, *dye sensitizer* menyerap foton dari cahaya matahari (energi $h\nu$), sehingga terjadi eksitasi elektron pada molekul *dye*. Elektron tereksitasi dari *ground state* (S) ke *excited state* (S*).



2. Elektron dari *excited state* kemudian langsung terinjeksi menuju *Electrone Conduction Band* (ECB) sehingga molekul *dye* teroksidasi (S+). Ketika *dye sensitizer* menyerap cahaya matahari (energi $h\nu$), elektron didalam molekul *dye* tereksitasi dari level HOMO ke LUMO, kemudian elektron dari LUMO terinjeksi ke counter band (CB) di TiO₂. Setelah itu, elektron terinjeksi berpindah melalui hubungan molekul nanopartikel TiO₂ sampai mencapai layar TCO, kemudian dari *working electrode* elektron berpindah melalui *external circuit* sampai ke *counter electrode*, sehingga memiliki muatan listrik.



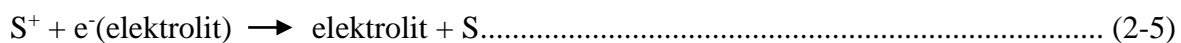
3. Dengan adanya oksidasi pada elektron dari *working electrode* hingga mencapai pada *counter electrode*, terjadi donor elektron (I) oleh semikonduktor, maka molekul *dye* kembali ke keadaan awalnya (*ground state*) dan menghasilkan I₃⁻. Proses ini disebut juga *dye regeneration* atau proses *re-reduction*



4. Adanya elektrolit pada *Counter Electrode*, elektron mengalami *diffusion* sehingga terjadi donor elektron membentuk *iodide* (I⁻).



5. *Iodide* ini digunakan untuk mendonor elektron kepada *dye* yang teroksidasi, sehingga terbentuk suatu siklus transport elektron. Dengan siklus ini terjadi konversi langsung dari cahaya matahari menjadi listrik. Elektron yang tereksitasi masuk kembali ke dalam sel dan bereaksi dengan elektrolit menuju *dye* teroksidasi. Dengan adanya donor elektron oleh elektrolit (I⁻) maka molekul *dye* kembali ke keadaan awalnya (*ground state*) dan mencegah penangkapan kembali elektron oleh *dye* yang teroksidasi. Sehingga *dye* kembali ke keadaan awal dengan persamaan reaksi :



6. Tegangan yang dihasilkan oleh sel surya TiO₂ tersensitisasi *dye* 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 (Kumara, 2012)

2.7 Zat Warna

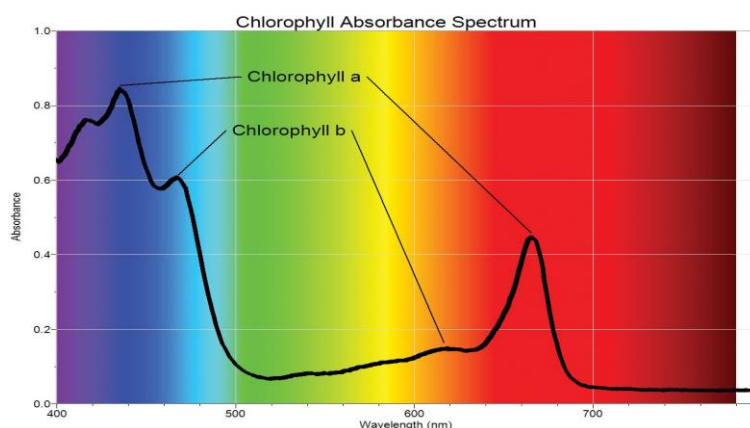
2.7.1 Klorofil pada Bayam

Bayam (*Amaranthus spp.*) merupakan tumbuhan yang biasa ditanam untuk dikonsumsi daunnya sebagai sayuran hijau. Tumbuhan ini berasal dari Amerika tropik namun sekarang tersebar ke seluruh dunia. Bayam relatif tahan terhadap pencahayaan langsung karena merupakan tumbuhan C4. Tanaman C4 adalah tanaman yang adaptif yang meskipun tumbuh didaerah panas dan kering. Disebut C4 karena hasil awal fotosintesis dengan 4 atom C, yaitu asam *oksaloasetat* (AOA) yang berfungsi sebagai pengikat CO₂. Kandungan besi pada bayam relatif lebih tinggi daripada sayuran daun. Kandungan besi merupakan penyusun sitokrom, protein dalam proses fotosintesis. Daun bayam mempunyai kandungan klorofil yang tinggi, sehingga hasil fotosintesisnya juga tinggi. Taksonomi bayam dikelompokkan pada tabel 2.2

Tabel 2.2
Taksonomi Kelompok Bayam

Kingdom	<i>Plantae</i>
Divisi	<i>Magnoliophyta</i>
Sub divisi	<i>Magnoliophyta</i>
Kelas	<i>Magnoliopsida</i>
Ordo	<i>Caryophyllales</i>
Famili	<i>Amaranthaceae</i>
Genus	<i>Amaranthoideae</i>
Spesies	<i>Amaranthus Spp.</i>

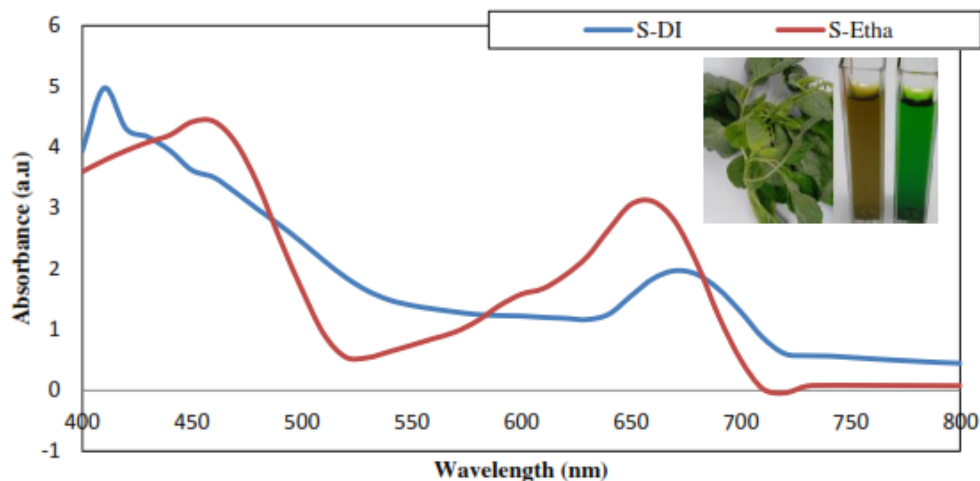
Klorofil adalah pigmen berwarna hijau yang pada umumnya ditemukan pada tumbuhan hijau, alga dan *cyanobacteria*. Dengan adanya klorofil pada daun, tumbuhan yang memiliki daun hijau dapat menghasilkan makanan melalui proses fotosintesis. Klorofil merupakan zat sensitif terhadap cahaya, terutama sinar dengan warna ungu atau biru dan jingga atau merah. Pada semua tanaman hijau, sebagian besar klorofil memiliki 2 bentuk yaitu klorofil α dan klorofil β . klorofil α mengandung dominan hijau dengan susunan kimia $X_{55}H_{72}MgN_4O_5$ dan klorofil β yang dominasi warna biru dengan susunan kimia $X_{55}H_{70}MgN_4O_6$. Klorofil ini disimpan dalam organel-organel penyimpanan klorofil, yaitu kloroplas. Klorofil α dan klorofil β memiliki daerah absorpsi pada panjang gelombang masing-masing seperti pada pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Panjang gelombang Klorofil a dan klorofil b
Sumber :Rohman (2016)

Warna hijau klorofil disebabkan karena tidak efektif dalam menyerap cahaya gelombang hijau dan hanya memantulkan saja. Klorofil menunjukkan serapan maksimum didaerah biru (\pm 400-450 nm) dan merah (\pm 625-700 nm) dari spektrum tampak pada gambar 2.5. Klorofil sangat sedikit menyerap cahaya kuning didaerah 500-600 nm. Cahaya tersebut merupakan cahaya didaerah hijau yang jika direfleksikan ke mata manusia akan menimbulkan sensasi warna hijau. Dengan kata lain, ketika cahaya putih polikromatik menyinari klorofil daun, cahaya hijau tersebut ditransmisikan dan direfleksikan sehingga klorofil tampak berwarna hijau.

Dalam penelitian-penelitian sebelumnya nilai efisiensi klorofil bermacam – macam tergantung pelarut, konsentrasi dan jenis daun itu sendiri. Pewarna klorofil memiliki nilai absorbansi baik saat menggunakan pelarut *ethanol*, *methanol* dan air (Faiz, dkk 2017). Untuk klorofil dari ekstrak daun bayam menggunakan berbagai pelarut memiliki nilai berkisar 0,1-0,6%. Pada penelitian menggunakan *ethanol* menghasilkan efisiensi, Voc, Jsc dan *fill factor* (FF) berturut-turut adalah 0,131% ; 0,550V ; 0,467 mA/cm² ; 0,52 (Syafinar, 2015). Gambar 2.5 menunjukkan daerah absorbansi klorofil menggunakan pelarut *ethanol* dan air suling.



Gambar 2.5 Pengujian absorbansi bayam pelarut *ethanol* (merah) dan air suling (biru)
Sumber : Syafinar (2015)

2.7.2 Kurkumin pada Kunyit

Kunyit adalah salah satu jenis rempah-rempah yang banyak digunakan sebagai bumbu dalam masakan. Kunyit mengandung kurkuminoid sekitar 10%, kurkumin 1-5%, dan sisanya terdiri atas demektosi kurkumin serta bisdemetoksi-kurkumin. Komponen yang terpenting dari umbi kunyit adalah zat warna kurkumin dan minyak atsirinya.

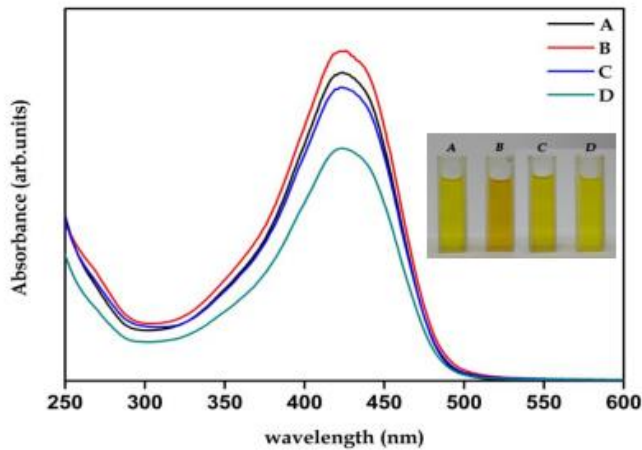
Kurkumin merupakan zat warna yang secara biogenetis berasal dari fenil alanin, asam malonat, dan asam sitrat. Zat warna kurkumin merupakan kristal berwarna kuning orange, tidak larut dalam ether, larut dalam minyak, dalam alkali berwarna merah kecoklatan, sedangkan dalam asam berwarna kuning muda (Kim, H-J. et al., 2013). Taksonomi kunyit dikelompokkan pada tabel 2.3

Tabel 2.3
Taksonomi kelompok Kunyit

Kingdom	Plantae
Divisio	Spermatophyta
Sub divisio	Angiospermae
Class	Monocotyledonae
Ordo	Zingiberales
Family	Zingiberaceae
Genus	Curcuma
Species	Curcuma Longa linn

Kurkumin adalah pigmen berwarna kuning yang terdapat dalam tanaman jenis *rizhome* seperti temulawak dan kunyit. Pada semua jenis akar-akaran, sebagian besar terdapat kurkumin dan pigmen lain. Kurkumin memiliki warna kuning karena memiliki absorbansi cahaya pada gelombang cahaya tampak $\pm 420 - 580$ nm seperti pada gambar 2.6. Kurkumin memiliki rumus empiris $C_{21}H_{20}O_6$. Pigmen tersebut merupakan suatu gabungan dari berbagai unsur membentuk ikatan *benzene* dimana warna kuning berasal dari ikatan rangkap.

Kurkumin memiliki daya tahan yang baik terhadap temperatur dan reaksi kimia. Kurkumin termasuk bahan yang ramah lingkungan dengan ongkos produksi rendah apabila dimanfaatkan sebagai pewarna alam pada DSSC. Dalam penelitian sebelumnya, kurkumin diekstrak tanpa pemurnian untuk melihat kinerja zat warna dengan prosedur ekstraksi kimia yaitu menggunakan pelarut *ethanol* dengan konsentrasi 1,5-2% dari beratnya. Penelitian tersebut dapat menghasilkan efisiensi, Voc, Jsc dan *fill factor* (FF) berturut-turut adalah 0,36% ; 0,56V dan 1,00 mA/cm² (Kim, H.-J., et al., 2013)



Gambar 2.6 Absorbansi gelombang cahaya tampak pigmen kurkumin menggunakan pelarut (a) *ethanol*, (b) *hydrochloric acid*, (c) *nitric acid*, dan (d) *acetic acid*
 Sumber : Kim, H.-J (2016)

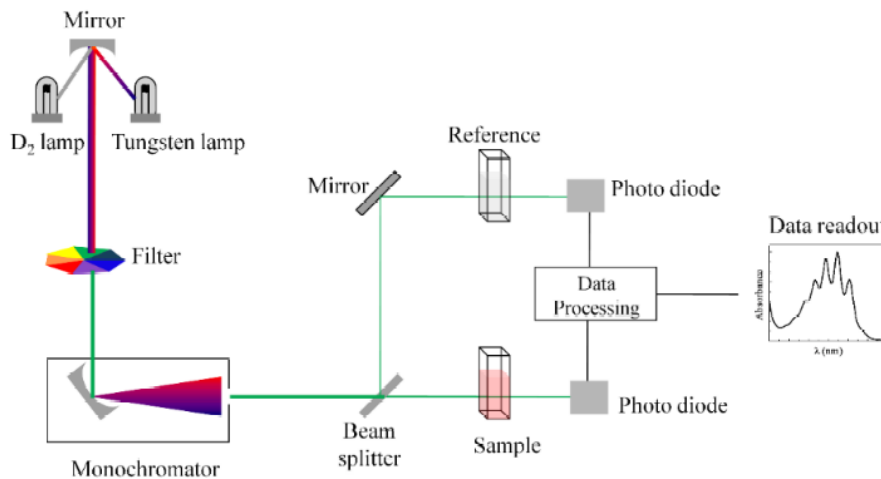
2.8 Parameter kinerja DSSC

2.8.1 Karakterisasi Absorbansi Cahaya

Pengujian karakterisasi absorbansi cahaya dilakukan menggunakan alat spektrofotometer UV-Vis. Spektrofotometer UV-Vis merupakan suatu metode identifikasi yang di dasarkan pada struktur elektronik molekul, yang dikenal sebagai spektroskopi elektronik. Spektrum yang diabsorpsi oleh suatu senyawa adalah sejumlah sinar yang diabsorpsi oleh satu senyawa pada panjang gelombang tertentu. Untuk senyawa berwarna akan memiliki satu atau lebih absorpsi spektrum yang tertinggi di daerah spektrum tampak (400-750 nm). Spektrum yang terabsorpsi pada ultra violet (200-400 nm) dan inframerah (>750) daerah tampak terjadi karena adanya perubahan energi elektron terluar dari molekul yang disebabkan adanya ikatan atau bukan ikatan.

Dasar pemikiran metode spektrometri *ultraviolet-visible (UV-Vis)* sederhana. Jika pewarna disinari dengan gelombang elektromagnetik maka foton akan diserap oleh elektron dalam pewarna. Setelah menyerap foton, elektron akan berusaha meloncat dari tingkat energi dasar yang tereksitasi ke tingkat energi lebih tinggi. Gambar 2.8 merupakan rangkaian alat *Uv-Vis* spektrofotometer. Seberkas cahaya dari sumber cahaya ultra violet (UV), Inframerah dan cahaya tampak (*visible*) dipisahkan menjadi komponen panjang gelombang dengan kisi difraksi. Setiap monokromatik dibagi menjadi dua berkas intensitas yang sama dengan perangkat *half mirror*. Satu berkas sinar melewati kuvet yang berisi larutan sampel. Sinar lain, referensi (standar) melewati sebuah kuvet yang hanya berisi pelarut (*ethanol*). Instensitas dari berkas cahaya tersebut kemudian diukur dengan detektor elektronik dan dibandingkan. Intensitas berkas kuvet referensi dengan jumlah absorbansi

cahaya, disebut sebagai I_0 . Intensitas berkas yang melewati larutan sample disebut I . Semua komponen panjang gelombang akan secara otomatis dipindai oleh spektrofotometer dan ditampilkan pada layar monitor.



Gambar 2.7 Alir Kerja Spektrofotometer UV-Vis
Sumber : Sukma (2012)

2.8.2 Karakterisasi Energi *Bandgap*

Pengujian karakterisasi energi *bandgap* dilakukan menggunakan alat Voltametri siklik. Voltametri siklik (*cyclic voltammetry*) merupakan metode dalam elektrokimia dan digunakan untuk mempelajari proses reduksi dan oksidasi (redoks). Hal ini dicapai dengan melihat hubungan antara potensial yang diberikan dan arus yang terukur. Karena sistem ini melibatkan reaksi redoks di anoda dan katoda maka peristiwa reaksi di kedua elektroda tersebut dimonitor besarnya arus yang timbul. Pengukuran arus listrik dilakukan dengan rentang potensial awal dan akhir yang sama. Potensial awal diberikan pada awal tidak terjadi reaksi elektrokimia pada permukaan elektroda. Kemudian dialurkan secara linier dengan laju tertentu menuju suatu nilai potensial ketika senyawa aktif mengalami reaksi reduksi. Voltametri siklik diperoleh dengan mengukur arus pada elektroda kerja selama scan potensial. Arus dapat dianggap sebagai respon sinyal terhadap potensial. Voltamogram yang dihasilkan merupakan kurva antara arus (pada sumbu vertikal) versus potensial (sumbu horizontal). Melalui pengukuran dengan *Cyclic Voltametry*, dapat ditentukan tingkat energi HOMO dan LUMO *dye*. Puncak potensial oksidasi pertama berhubungan dengan level HOMO *dye* dan puncak potensial reduksi pertama berhubungan dengan level LUMO *dye*.

HOMO LUMO merupakan parameter yang penting dalam pembuatan sel surya DSSC. Pada Sel Surya tersensitasi *dye*, cahaya foton diserap oleh *dye* yang melekat pada partikel permukaan TiO₂ (lapisan TiO₂ bertindak sebagai akseptor atau kolektor elektron yang ditransfer *dye* yang teroksidasi). Foton yang diserap mengakibatkan elektron tereksitasi dari level LUMO (*Lower Unoccupied Molecular Orbital*) ke HOMO (*Higher Occupied Molecular Orbital*) pada molekul *dye*. Untuk menghitung HOMO LUMO menggunakan persamaan:

1. Persamaan menghitung Energi HOMO (*Higher Occupied Molecular Orbital*)

$$E_{\text{homo}} = -e (E_{\text{oks}} + 4,4) \dots\dots\dots(2-6)$$

2. Persamaan menghitung Energi LUMO (*Lower Unoccupied Molecular Orbital*)

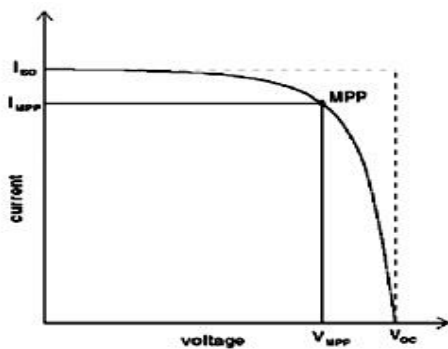
$$E_{\text{lumo}} = -e (E_{\text{red}} + 4,4) \dots\dots\dots(2-7)$$

3. Persamaan menghitung band gap energi energi

$$E_{\text{bandgap}} = E_{\text{lumo}} - E_{\text{homo}} \dots\dots\dots(2-8)$$

2.8.3 Karakterisasi arus-tegangan (I-V)

Daya listrik yang dihasilkan sel surya organik (DSSC) ketika mendapat cahaya diperoleh dari kemampuan perangkat sel surya tersebut untuk memproduksi tegangan ketika diberi dan arus melalui beban pada waktu yang sama. Kemampuan ini dipresentasikan dalam kurva arus-tegangan (I-V). Gambar 2.9 Ketika sel dalam kondisi short circuit, arus maksimum atau arus short chircuit (I_{sc}) dihasilkan, sedangkan pada kondisi *open circuit* tidak ada arus yang dapat mengalir sehingga tegangan nya maksimum, disebut tegangan *open circuit* (V_{oc}). Titik pada kurva I-V yang menghasilkan arus dan tegangan maksimum disebut titik daya maksimum MPP (*Maximum Power Point*) (Setiawan dkk, 2015).



Gambar 2.8 Kurva hubungan arus (I) dan tegangan (V)
 Sumber : Setiawan (2015)

1. *Fill factor* (FF)

Fill factor merupakan perbandingan dari daya keluaran maksimal, hasil dari tegangan maksimum (V_m) dan arus maksimum (I_m) terhadap daya teoritis, hasil dari tegangan *open circuit* (V_{oc}) dan arus *short circuit* (I_{sc}). Nilai FF dari sel dinyatakan :

$$FF = V_{mpp} \cdot I_{mpp} / V_{oc} \cdot I_{sc} \dots \dots \dots (2-9)$$

2. Efisiensi

Efisiensi sel surya yang didefinisikan sebagai daya yang dihasilkan dari sel (P_{max}) dibagi dengan daya dari cahaya yang datang (P_{cahaya}). Nilai Efisiensi dari sel dinyatakan :

$$P_{max} = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF \dots \dots \dots (2-10)$$

$$\eta = P_{max} / P_{cahaya} = FF \cdot V_{oc} \cdot I_{sc} / P_{cahaya} \dots \dots \dots (2-11)$$

Nilai efisiensi ini yang menjadi ukuran global dalam menentukan kualitas performansi suatu sel surya (Setiawan dkk, 2015).

2.9 Hipotesa

Pewarna kurkumin dari ekstrak kunyit mampu menyerap cahaya pada panjang gelombang $\pm 420-580$ nm (Hee-Je Kim, et al., 1991), sedangkan klorofil dari ekstrak daun bayam mampu menyerap cahaya pada panjang gelombang tampak biru $\pm 400-450$ nm dan merah $\pm 625-700$ nm tetapi sangat sedikit menyerap cahaya hijau di daerah $\pm 500-600$ nm (Hartiwi, 2009). Dengan pencampuran ini akan menghasilkan pewarna yang memiliki daerah penyerapan gelombang cahaya yang lebih lebar. Pada spektrum warna memiliki nilai energi foton yang berbeda. Semakin kecil nilai panjang gelombang maka nilai energi foton akan tinggi. Ketika daerah penyerapan semakin lebar, maka penyerapan jumlah foton juga akan meningkat. Ketika penyerapan foton meningkat, maka energi HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*) lebih tinggi dari pada nilai *Redox Elektrolit* dan LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*) lebih rendah daripada nilai *counter band* TiO_2 . Ketika hal ini terjadi, maka proses injeksi elektron pada *band gap* lebih cepat. Proses perpindahan elektron pada *ground state* ke *excitate state* yang cepat akan meningkatkan nilai *short current circuit* (I_{sc}), *Volt open circuit* (V_{oc}), sehingga efisiensi DSSC akan meningkat.

