

BAB II

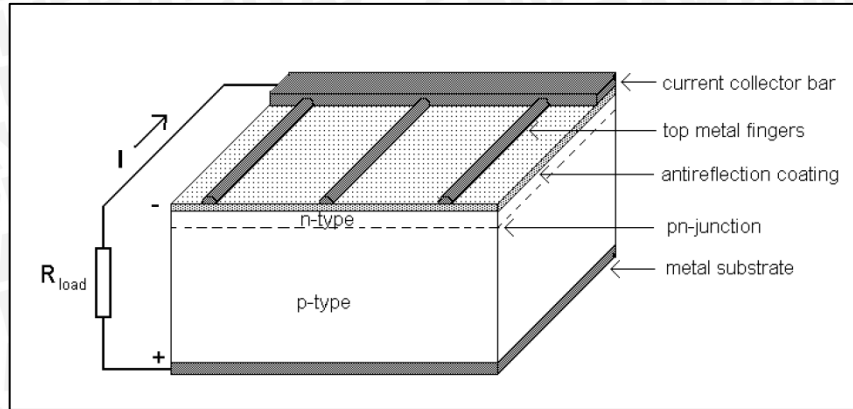
DASAR TEORI

Dalam merencanakan dan merealisasikan pembuatan *Dye-sensitized Solar Cell* (DSSC) serta pengujiannya dibutuhkan pemahaman yang mendalam mengenai teori-teori penunjang yang mendukung penelitian. Dasar teori yang dimaksudkan dalam penelitian ini merupakan teori-teori utama yang berkaitan dengan DSSC dan digunakan untuk membantu menyelesaikan penelitian. Teori-teori yang dibahas meliputi prinsip kerja DSSC, material-material penyusun DSSC dan penjelasan alat dalam pembuatan DSSC.

Dasar untuk menganalisis, mendesain dan merencanakan penelitian ini adalah hasil dari penelitian yang dilakukan oleh Dr. Ir. Sholeh Hadi Pramono, M.S. pada tahun 2013 dengan judul "*Solar Sel Organik Dengan Pewarna Klorofil Pada DSSC (Dye-Sensitized Solar Cell) dari Ekstraksi Daun Jarak Pagar dan Daun Pepaya*". Serta Hasil Tugas Akhir dari penelitian yang dilakukan oleh Dody Fanditya R, S.T. pada tahun 2014 dengan judul "*Pengaruh Variasi Konsentrasi Klorofil Terhadap Daya Keluaran Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC)*".

2.1 *Solar Cell* berbasis Silikon

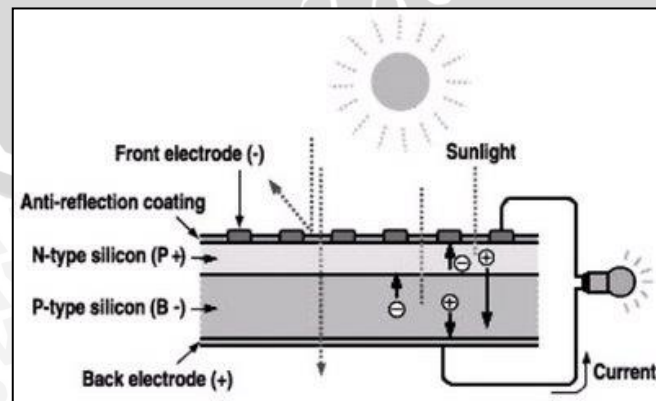
Prinsip kerja sel surya berbasis silikon terdiri atas lapisan semikonduktor *doping-n* dan *doping-p* yang membentuk *p-n junction*, lapisan antirefleksi, dan substrat logam sebagai tempat mengalirnya arus dari lapisan tipe-n (elektron) dan tipe-p (*hole*) (Halme, 2002 : 25). Struktur sel surya konvensional berbasis silikon ditunjukkan dalam Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Struktur Sel Surya Silikon

Sumber : Halme, 2002 : 26

Semikonduktor tipe-n didapat dengan men-*doping* silikon dengan unsur dari golongan V A yaitu N, P, atau As sehingga terdapat kelebihan elektron valensi dibanding atom sekitar. Pada sisi lain semikonduktor tipe-p didapat dengan *doping* oleh golongan III A, yaitu B, Al, Ga, atau In sehingga kekurangan elektron valensi dibanding atom sekitar. Ketika dua tipe material tersebut mengalami kontak maka kelebihan elektron dari tipe-n berdifusi pada tipe-p. Sehingga area *doping*-n akan bermuatan positif sedangkan area *doping*-p akan bermuatan negatif. Medan elektrik yang terjadi antara keduanya mendorong elektron kembali ke daerah-n dan *hole* ke daerah-p. Apabila ditempatkan hambatan pada terminal sel surya, maka elektron dari area-n akan kembali ke area-p sehingga menyebabkan perbedaan potensial dan arus akan mengalir (Halme, 2002 : 26). Prinsip kerja sel surya konvensional ditunjukkan dalam Gambar 2.2.

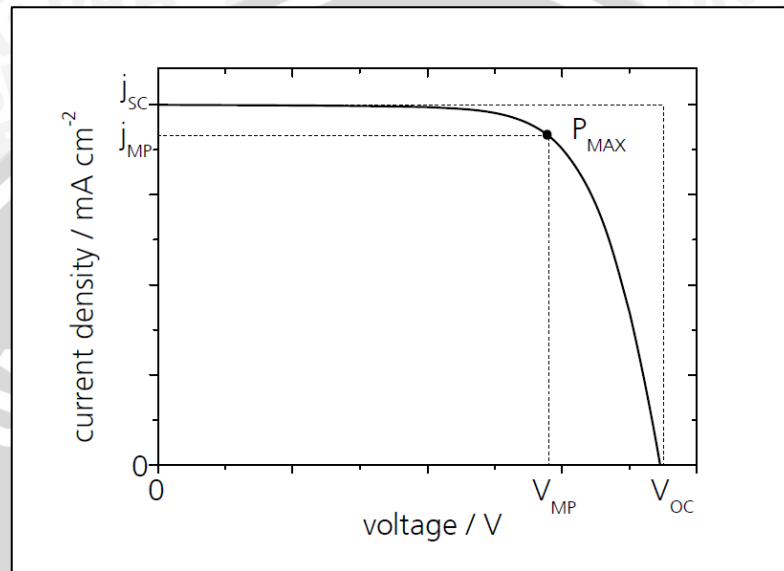


Gambar 2.2 Prinsip Kerja Sel Surya Silikon

Sumber : Wilman *et al.*, 2007 : 7

2.2 Performansi Sel Surya

Daya listrik yang dihasilkan sel surya ketika mendapat cahaya, diperoleh dari kemampuan perangkat sel surya tersebut untuk memproduksi tegangan ketika diberi beban dan arus melalui beban pada waktu yang sama. Kemampuan ini direpresentasikan dalam kurva arus tegangan (I-V) dalam Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Karakteristik Kurva I-V pada Sel Surya

Sumber : Sastrawan, 2006 : 24

Ketika sel dalam kondisi *short-circuit*, arus maksimum atau arus *short-circuit* (I_{SC}) dihasilkan, sedangkan pada kondisi *open-circuit* tidak ada arus yang dapat mengalir sehingga tegangannya maksimum, disebut sebagai tegangan *open-circuit* (V_{OC}). Titik pada kurva I-V yang menghasilkan arus dan tegangan maksimum disebut titik daya maksimum (MPP). Karakteristik penting lainnya dari sel surya yaitu *fill factor* (FF), nilai FF dapat dicari dengan menggunakan persamaan 2-1,

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{OC} I_{SC}} \quad (2-1)$$

Dimana :

V_{MPP} = Tegangan titik daya maksimum

I_{MPP} = Arus titik daya maksimum

Dengan menggunakan persamaan *fill factor* (FF), maka nilai daya maksimum (P_{MAX}) dari DSSC dapat dicari dari persamaan 2-2,

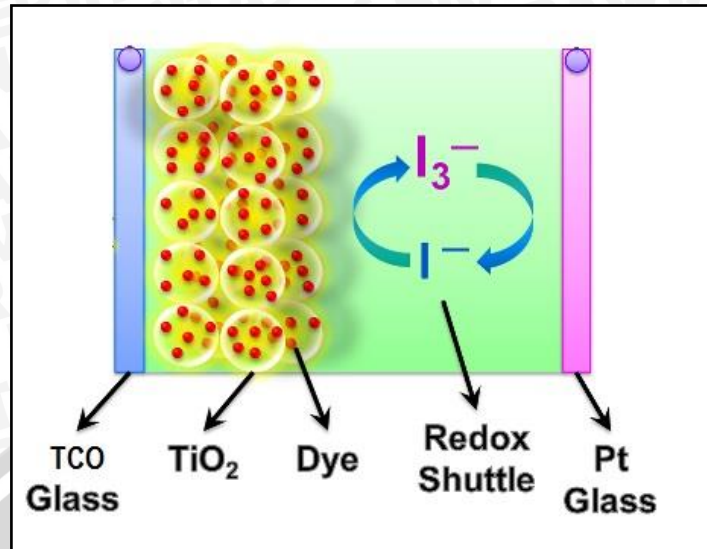
$$P_{MAX} = V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF \quad (2-2)$$

(Halme, 2002 : 24)

2.3 *Dye-sensitized Solar Cell* (DSSC)

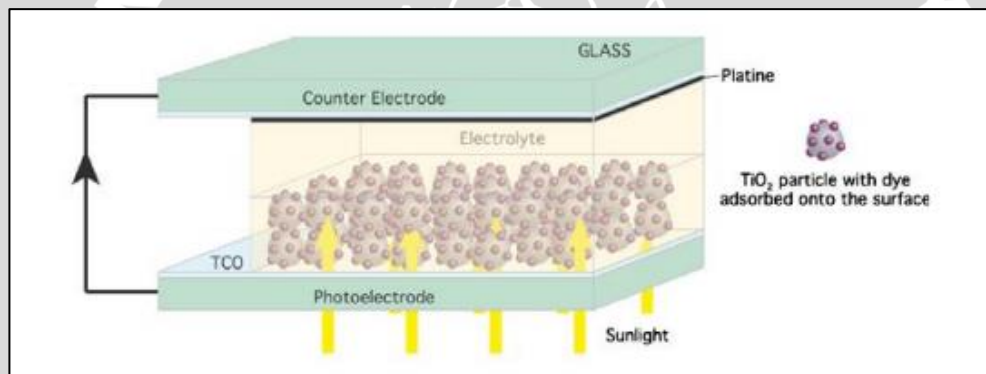
Dye Sensitized Solar Cell (DSSC), sejak pertama kali ditemukan oleh Professor Michael Gratzel pada tahun 1991, telah menjadi salah satu topik penelitian yang dilakukan secara intensif oleh para peneliti di seluruh dunia bahkan di Indonesia. DSSC kini menjadi perhatian para peneliti karena teknologi fabrikasinya yang tergolong sederhana, selain itu DSSC disebut juga sebagai terobosan pertama dalam teknologi sel surya sejak sel surya silikon ditemukan (Phani *et al.*, 2001 : 1).

Berbeda dengan sel surya konvensional, DSSC adalah sel surya yang dibentuk melalui proses *photoelectrochemical*, yaitu suatu proses dimana penyerapan cahaya matahari melalui pewarna tersensitisasi (*dye-sensitized*) sama halnya dengan fungsi klorofil pada saat proses fotosintesis daun. Pewarna tersensitisasi (*dye-sensitized*) merupakan unsur dari struktur DSSC yang dibentuk untuk memiliki kepekaan (*sensitize*) terhadap cahaya. Oleh sebab itu, *dye-sensitized* berarti *dye* yang dibuat peka terhadap cahaya (pada struktur lapisan DSSC). Proses pembangkitan dan transfer elektron terjadi melalui bahan semikonduktor yang memiliki pita energi yang lebar, dalam hal ini DSSC menggunakan larutan elektrolit sebagai medium transport muatan. Selain larutan elektrolit, umumnya DSSC tersusun oleh beberapa bagian yang terdiri dari pasta nanopori TiO_2 sebagai fotoelektroda, molekul *dye* yang terabsorpsi di permukaan TiO_2 dan *counter electrode* yang diberi lapisan katalis (biasanya platina atau karbon), semua bagian itu dideposisi diantara dua kaca konduktif (*Transparent Conductive Oxide*). Struktur standar DSSC dengan menggunakan dua kaca TCO sebagai substrat tempat pembentukan *photoelectrode* dan *counter electrode* ditunjukkan dalam Gambar 2.4 dan Gambar 2.5.



Gambar 2.4 Struktur Dye-sensitized Solar Cell

Sumber : Sholeh *et al.*, 2013 : 6



Gambar 2.5 Struktur Standar DSSC

Sumber: Nazeeruddin *et al.*, 2011 : 1173

Pada bagian atas dan alas sel surya merupakan kaca yang sudah dilapisi oleh TCO (*Transparent Conducting Oxide*) umumnya adalah SnO₂, yang berfungsi sebagai *electroda* dan *counter electrode*. Pada TCO *counter-electrode* dilapisi dengan lapisan katalis untuk mempercepat proses reaksi redoks dengan elektrolit. Pasangan redoks yang umumnya dipakai yaitu I⁻/I₃⁻ (*iodide / triiodide*). Pada permukaan elektroda dilapisi oleh pasta TiO₂ yang mana *dye* terabsorpsi di dalam pori - pori pasta TiO₂. *Dye* yang umumnya digunakan adalah jenis *ruthenium (Ru) complex* (Wilman *et al.*, 2007 : 13).

2.4 Prinsip Kerja DSSC

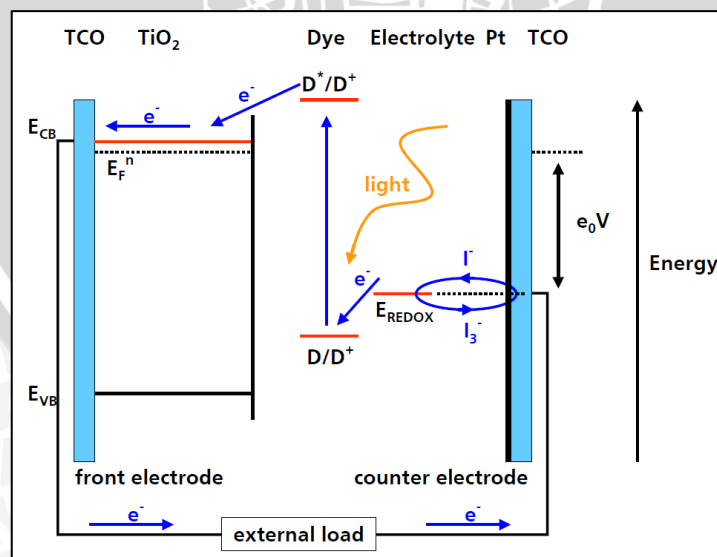
Prinsip kerja dari DSSC pada dasarnya merupakan reaksi dari mekanisme transfer elektron. Proses tersebut sama seperti skema yang ditunjukkan pada Gambar 2.6. Proses pertama dimulai dengan terjadinya proses eksitasi elektron pada molekul *dye* akibat absorpsi foton yang dilakukan oleh *dye (sensitizer)*. Elektron e^- pada *sensitizer* kemudian tereksitasi dari *ground state (D)* bergerak menuju ke *excited state (D^{*})*.



Elektron dari *excited state* kemudian secara langsung terinjeksi menuju *conduction band (E_{CB})* pada semikonduktor titanium dioksida (TiO₂) sehingga molekul *dye-sensitizer* teroksidasi dalam keadaan (D⁺) atau *sensitizer* melepas elektron. 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 (Sastrawan, 2006 : 12).



Skema prinsip kerja dari DSSC ditunjukkan dalam Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Skema Kerja DSSC

Sumber : Sastrawan, 2006: 12

Setelah mencapai elektroda TCO, elektron mengalir menuju *counter-electrode* melalui rangkaian eksternal. Dengan adanya lapisan katalis pada *counter-electrode*, elektron kemudian diterima oleh larutan elektrolit, sehingga *hole* yang terbentuk pada elektrolit (I_3^-) akibat donor elektron pada proses sebelumnya, berekombinasi dengan elektron membentuk iodide (I^-).



Iodide ini digunakan untuk mendonor elektron kepada *dye* yang teroksidasi, sehingga terbentuk suatu siklus transport elektron. Dengan siklus inilah, terjadi konversi langsung dari cahaya matahari menjadi listrik (Sastrawan, 2006 : 11).

2.5 Material DSSC

Dye-sensitized Solar Cell (DSSC) tersusun dari berbagai macam material penyusun, yaitu :

2.5.1 Substrat

Substrat adalah badan dari sel surya dan sebagai media mengalirnya muatan. Substrat yang digunakan pada DSSC yaitu TCO (*Transparent Conductive Oxide*). TCO merupakan sepotong kaca transparan yang memiliki lapisan konduktif dan berfungsi sebagai tempat mengalirnya muatan pada DSSC.

Material yang umumnya digunakan sebagai substrat yaitu *flourine-doped tin oxide* ($SnO_2:F$ atau FTO) dan *indium tin oxide* ($In_2O_3:Sn$ atau ITO) hal ini karena dalam proses pelapisan material TiO_2 kepada substrat, diperlukan proses *firing* pada range temperatur $400-500^\circ C$ dan kedua material tersebut merupakan pilihan yang cocok karena tidak mengalami perubahan bentuk maupun perubahan sifat ketika dipanaskan pada range temperatur tersebut (Halme, 2002 : 42).

Dalam penelitian ini digunakan *ITO* (*Indium Tin Oxide*) dari Sigma-Aldrich® yang memiliki resistivitas permukaan sebesar $15-25 \Omega/sq$. Bahan ITO

hanya terdapat pada salah satu sisi substrat saja. Bentuk fisik substrat TCO ditunjukkan dalam Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Substrat Kaca TCO Indium Tin Oxide (oleh Sigma-Aldrich®)

Sumber : Lab. Elektronika Proses TE-UB

2.5.2 Nanopartikel TiO_2 (*Titanium(IV) oxide*)

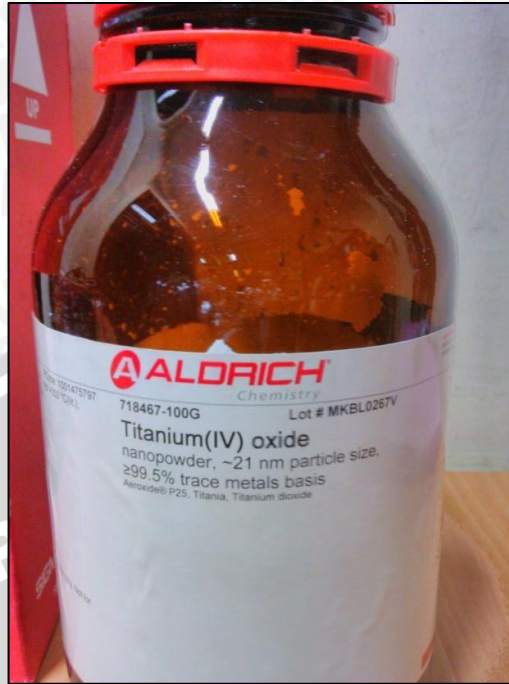
Dalam DSSC sangat dibutuhkan semikonduktor yang memiliki lebar pita energi yang besar ($>3\text{eV}$) untuk transparansi semikonduktor pada sebagian besar spektrum cahaya matahari. Maka dalam penelitian ini digunakan jenis semikonduktor TiO_2 (*Titanium Dioxide/Titanium(IV)Oxide*), jenis ini merupakan jenis yang paling sering digunakan, karena efisiensi DSSC yang menggunakan bahan TiO_2 masih belum tertandingi dan memiliki lebar pita energy (*band gap energy*) sebesar ($\pm 3,2\text{eV}$). Jenis semikonduktor lain yang dapat digunakan yaitu ZnO (Uthirakumar, 2011 : 437- 439). Selain itu, 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 menyatu, implikasinya tentu akan menaikkan jumlah cahaya yang terabsorb.

Di alam ini umumnya TiO_2 mempunyai tiga fasa yaitu *rutile*, *anatase*, dan *brookite* seperti ditunjukkan struktur kristalnya. Fasa *rutile* dari TiO_2 adalah fasa yang umum dan merupakan fasa yang disintesis dari mineral *ilmenite* melalui proses Becher. Pada proses Becher, oksida besi yang terkandung dalam *ilmenite* dipisahkan dengan temperatur tinggi dan juga dengan bantuan gas sulfat atau klor sehingga menghasilkan TiO_2 *rutile* dengan kemurnian 91-93%. Titania pada fasa *anatase* umumnya stabil pada ukuran partikel kurang dari 11 nm, fasa *brookite* pada ukuran partikel 11 – 35 nm, dan fasa *rutile* diatas 35 nm (Zhang, Banfield, 2000 : 3481).

Untuk aplikasinya pada DSSC, TiO_2 yang digunakan umumnya berfasa *anatase* karena kemampuan fotoaktifnya tinggi. Selain itu, 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 terabsorb yang implikasinya akan menaikkan jumlah cahaya yang terserap (Nuryadi *et al*, 2012 : 4). Tingkat kristalisasi TiO_2 pada lama pemanasan yang berbeda akan berpengaruh terhadap banyaknya *dye* yang dapat menyatu dan teradsorpsi. Semakin bertambah rekat susunan kristalisasi partikel TiO_2 , semakin banyak *dye* yang terikat pada partikel TiO_2 .

Pada penelitian ini digunakan TiO_2 yang merupakan produksi dari Sigma-Aldrich® dengan ukuran partikel sebesar ~21nm. Bubuk TiO_2 yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan dalam Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Titanium (IV) Oxide (oleh Sigma-Aldrich®)

Sumber : Lab. Elektronika Proses TE-UB

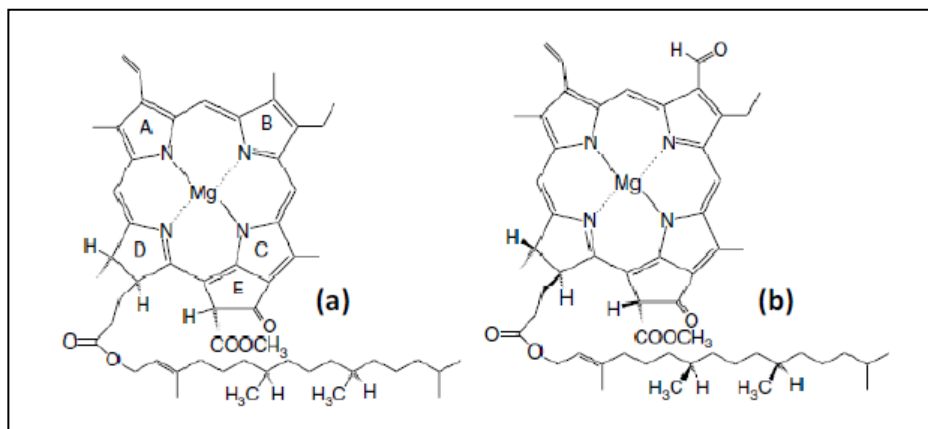
2.5.3 Dye

Dye dalam DSSC berfungsi sebagai penyerap foton dalam cahaya matahari dan kemudian mengubah menjadi energi. *Dye* yang umum digunakan adalah jenis *Ruthenium (Ru) Complex*, karena *dye* jenis itu jika diaplikasikan terhadap DSSC akan menghasilkan DSSC yang memiliki nilai efisiensi yang tinggi sebesar 10% (Wilman *et al.*, 2007). Walaupun DSSC menggunakan *dye* jenis ini telah mencapai efisiensi yang cukup tinggi, namun *dye* jenis *Ruthenium (Ru) Complex* komersil berharga sangat mahal.

Penelitian dalam mencari *dye* yang murah dan berbahan dari tumbuhan (*natural dye*) terus menerus dilakukan oleh para peneliti. Proses fotosintesis pada tumbuhan telah membuktikan adanya senyawa pada tumbuhan yang dapat digunakan sebagai *dye*. Zat – zat tersebut ditemukan pada klorofil daun. Klorofil merupakan pemegang peranan penting dalam proses fotosintesis. Klorofil merupakan pigmen warna hijau dan paling banyak ditemukan pada tumbuhan hijau, klorofil pada daun menjadi penyerap utama cahaya tampak penyinaran. Semua zat tersebut menyatu dalam daun untuk melakukan proses fotosintesis.

Pigmen utama ini berfungsi menyerap cahaya dan mengubahnya menjadi energi kimia yang dibutuhkan untuk mereduksi karbondioksida menjadi karbohidrat dalam proses fotosintesis. Zat klorofil terdapat pada kloroplas dalam jumlah yang banyak, serta mudah diekstraksi ke dalam pelarut *ethanol*. (Sholeh *et al*, 2013).

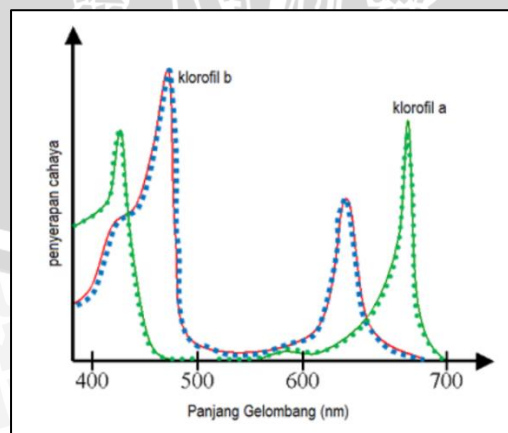
Struktur klorofil mengandung satu inti porfirin dengan satu atom Mg yang terikat kuat ditengah, dan satu rantai dihidrokarbon panjang tergabung melalui gugus asam karboksilat. Struktur kimia klorofil a dan b ditunjukkan dalam Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Struktur Kimia (a) Klorofil a dan (b) Klorofil b

Sumber : Sholeh *et al*. 2013: 9

Spektrum penyerapan cahaya oleh klorofil a dan klorofil b ditunjukkan dalam Gambar 2.10. Spektrum cahaya ini didapatkan dari sinar matahari yang mencakup panjang gelombang ultraviolet, cahaya tampak dan inframerah.



Gambar 2.10 Spektrum Penyerapan Klorofil a dan Klorofil b

Sumber : Sholeh H, *et al.*, 2013 : 9

Dye yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan klorofil yang terdapat pada daun jarak merah (*Jatropha Gossypifolia Linn*), karena jenis daun tersebut memiliki kandungan klorofil yang cukup besar dibandingkan dengan jarak biasa dan mudah ditemukan didaerah beriklim tropis seperti Indonesia. *Dye* didapat dengan cara mengekstrak klorofil dari daun dengan cara menumbuk daun dalam keadaan ruang gelap, kemudian direndam dalam larutan pelarut yaitu larutan ethanol dengan perbandingan konsentrasi antara daun jarak merah dan ethanol sebesar 3 : 5. Dengan komposisi daun jarak merah sejumlah 30 gram dan ethanol 50 ml. Daun jarak merah yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan dalam gambar 2.11.



Gambar 2.11 Daun Jarak Merah (*Jatropha Gossypifolia Linn*)

2.5.4 Elektrolit (I^- / I_3^-)

Elektrolit dalam DSSC berperan sebagai transport muatan dari *counter-electrode* ke *dye*. Dalam penelitian ini digunakan elektrolit terdiri dari iodide (I^-) dan triiodide (I_3^-) sebagai pasangan redoks dalam pelarut. Karakteristik ideal dari pasangan redoks untuk elektrolit DSSC, yaitu :

1. Tingginya kelarutan terhadap pelarut untuk mendukung konsentrasi yang tinggi dari muatan pada elektrolit.
2. Pelarut mempunyai koefisien difusi yang tinggi untuk transportasi massa yang efisien.
3. Tidak adanya karakteristik spektral pada daerah cahaya tampak untuk menghindari absorpsi cahaya datang pada elektrolit.

4. Kestabilan yang tinggi baik dalam bentuk tereduksi maupun dalam kondisi teroksidasi.
5. Mempunyai reversibilitas tinggi.
6. Inert terhadap komponen lain pada DSSC.

2.5.5 Counter-Electrode

Counter-electrode disebut juga sebagai katoda DSSC. *counter-electrode* pada DSSC berfungsi sebagai katalis. Katalis dibutuhkan untuk mempercepat kinetika reaksi redoks dalam sel, yaitu proses reduksi triiodide (I_3^-) pada TCO menjadi iodide I^- . Platina adalah material yang umum digunakan sebagai katalis pada berbagai aplikasi, juga sangat efisien dalam aplikasinya pada DSSC. Platina dideposisikan pada TCO dengan berbagai metoda yaitu elektrokimia, *sputtering*, *spin coating*, atau *pyrolysis* (Halme, 2002 : 53).

Walaupun mempunyai kemampuan katalitik yang tinggi, platina merupakan material yang sangat mahal. Sebagai alternatif, Kay & Gratzel (1996) mengembangkan sebuah desain DSSC dengan menggunakan *counter-electrode* karbon sebagai lapisan katalis (Gratzel, 1996 : 44, 99-117).

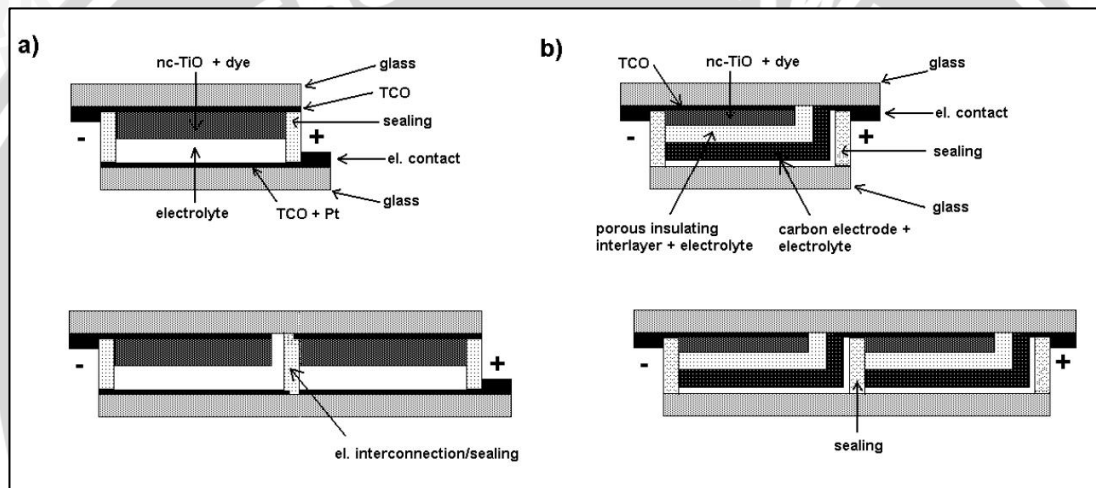
Pada penelitian ini digunakan *counter-electrode* berbasis karbon sebagai lapisan katalis DSSC, *counter-electrode* karbon dideposisikan pada kaca TCO dengan cara memanaskan sisi konduktif kaca TCO diatas nyala api lilin selama beberapa detik, sehingga seluruh sisi permukaan konduktif kaca TCO tertutupi oleh gelapnya lapisan karbon yang terbentuk.

2.6 Fabrikasi DSSC

Cara paling umum dalam fabrikasi DSSC di laboratorium yaitu menggabungkan dua kaca dengan lapisan yang berbeda dengan struktur berlapis (*sandwich*), sebagai substrat dan superstrat, yang salah satunya yaitu lapisan TiO_2 dimana cahaya masuk dan yang lainnya yaitu *counter-electrode* yang dilapisi lapisan katalis contohnya adalah platina dan karbon. Untuk meminimalisasi biaya

produksi pada skala massal, satu sel bisa dideposisikan secara langsung antara kaca dengan luas permukaan yang tinggi.

Selain itu Kay dan Gratzel (1996) mengembangkan tiga lapisan struktur sel *monolithic*, untuk mengadaptasi proses produksi sel surya lapisan tipis sehingga lebih mudah mencapai tahap komersialisasi. Pada struktur *monolithic*, semua lapisan dari sel dapat dideposisikan masing-masing diatas yang lainnya pada satu kaca yang dilapisi kaca TCO, sedangkan satu kaca lain yang berlawanan hanya berfungsi sebagai pelindung dan enkapsulasi. Skema struktur umum DSSC ditunjukkan dalam Gambar 2.12.



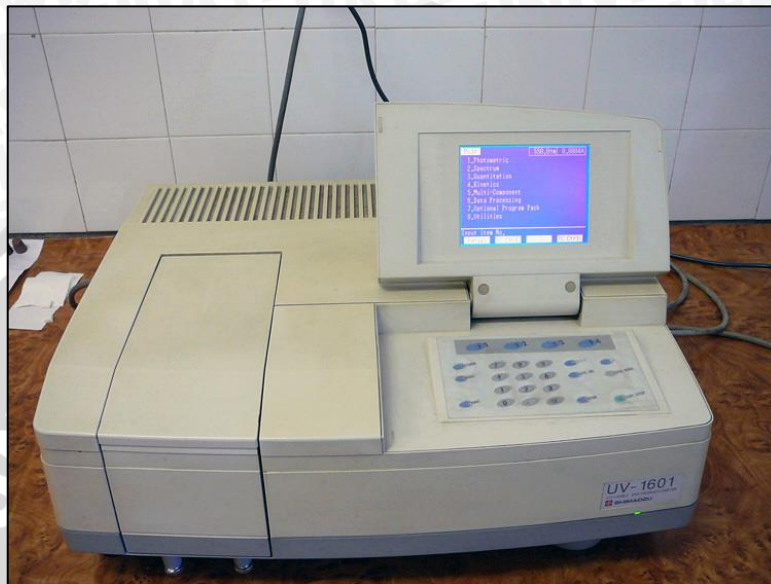
Gambar 2.12 Skema dari Dua Struktur Umum sel DSSC (atas) dan modul (bawah) (a) Struktur Berlapis, (b) Struktur *Monolithic*

Sumber : Halme, 2002 : 63

2.7 Spectrophotometer UV-Visible

Spectrophotometer UV-VIS merupakan alat yang berfungsi untuk menguji tingkat absorpsi klorofil. *Spectrophotometer* bekerja dengan cara menembakkan cahaya dengan spektrum panjang gelombang yang bervariasi melewati sampel uji. Kemudian terdapat penerima cahaya di sisi yang berlawanan dengan sumber cahaya untuk menangkap dan menghitung jumlah cahaya yang diteruskan setelah melewati sampel uji. Dengan diketahui jumlah cahaya yang diteruskan, maka dapat diketahui berapa jumlah cahaya yang diserap oleh sampel uji, yang dalam penelitian ini berupa ekstrak klorofil daun jarak merah (*Jatropha Gossypifolia*)

Linn). Dalam penelitian ini digunakan *Spectrophotometer* UV-VIS tipe UV-1601 dari Shimadzu dan menguji klorofil pada panjang gelombang 300-800 nm. *Spectrophotometer* UV-VIS tipe UV-1601 dari Shimadzu ditunjukkan dalam Gambar 2.13.

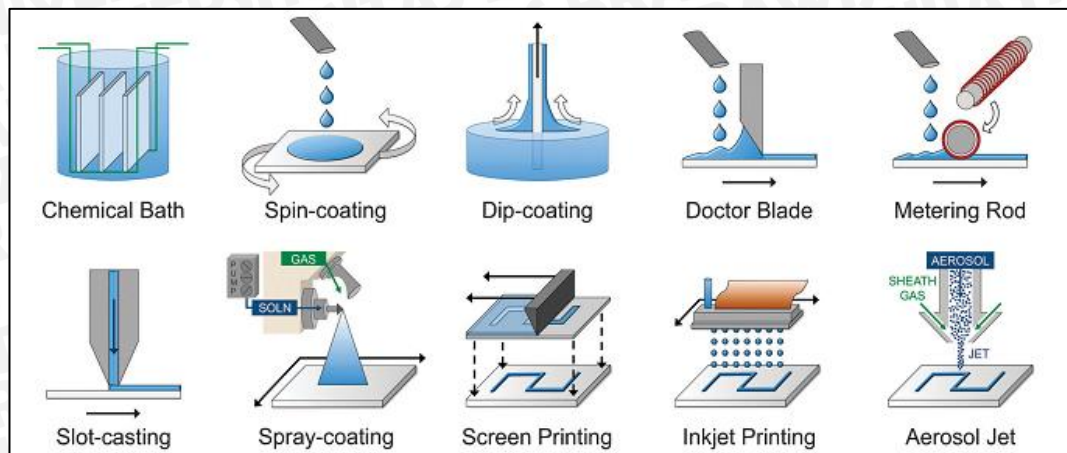


Gambar 2.13 *Spectrophotometer* UV-1601

Sumber : Lab. Pengujian MIPA-Kimia UB

2.8 Metode Deposisi

Metode deposisi terdiri dari dua jenis: *direct growth* material dan pelapisan cairan pada substrat. Metode *direct growth* material terbagi menjadi elektrokimia dan *electro less* deposisi perendaman kimia atau *Chemical Bath Deposition* (CBD). Metode yang sering digunakan adalah metode pelapisan cairan, karena metode ini sensitif terhadap karakteristik yang diinginkan (Pasquarelli *et al.* 2011: 5416). Variasi metode yang digunakan dalam teknik deposisi film tipis ditunjukkan dalam Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Variasi Metode Deposisi

Sumber : Pasquarelli *et al.*, 2011: 5417

Variasi metode deposisi yang telah digunakan dan dikembangkan antara lain yaitu :

1. *Chemical Bath*, yaitu metode deposisi *direct growth* material dimana metode ini bergantung pada reaksi saat perendaman dalam bahan kimia. Contoh: pembuatan *nanowire* ZnO.
2. *Spin-Coating*, yaitu metode deposisi pelapisan cairan dimana pemerataan cairan dilakukan dengan cara memutar substrat dengan kecepatan 1000 RPM. Bentuk cairan yang dihasilkan berbentuk lingkaran.
3. *Dip-Coating*, yaitu metode deposisi pelapisan cairan dimana substrat dicelupkan ke dalam cairan lalu diangkat. Metode ini melapisi semua sisi substrat.
4. *Doctor Blade*, yaitu metode deposisi pelapisan cairan dimana melapisi substrat seperti melapisi selai di roti atau istilah lain pisau dokter. Metode ini dilakukan untuk melapisi satu sisi substrat dan bentuk pola yang diinginkan.
5. *Metering Rod* atau Mayer Rod adalah metode deposisi yang menggunakan tongkat besi memutar untuk meratakan cairan di substrat.
6. *Slot-casting*, yaitu metode yang hampir sama dengan *Doctor blade*. Perbedaannya hanya saat penempatan cairan di substrat dan pemerataan dilakukan secara bersamaan.
7. *Spray-coating*, yaitu metode pelapisan cairan *non-contact* dimana cairan disemprotkan ke substrat dengan bantuan semprotan.

8. *Screen Printing* atau yang lebih dikenal sablon adalah metode pelapisan cairan yang tradisional dengan cara menyablon cairan ke substrat.
9. *Inkjet Printing*, yaitu metode pelapisan cairan *Direct-write* dimana substrat dicetak langsung dengan printer sesuai dengan pola yang diinginkan.
10. *Aerosol Jet* sama seperti *Inkjet Printing*, *Aerosol Jet* menggunakan printer aerosol yang bisa mencetak hingga ukuran micrometer.

Dalam penelitian ini metode deposisi yang digunakan untuk mendeposisikan pasta TiO_2 pada kaca TCO adalah metode *doctor blading*, keunggulan dari metode ini adalah mudah diterapkan, efisien, serta tidak membutuhkan biaya yang mahal bila dibandingkan dengan metode yang lainnya.

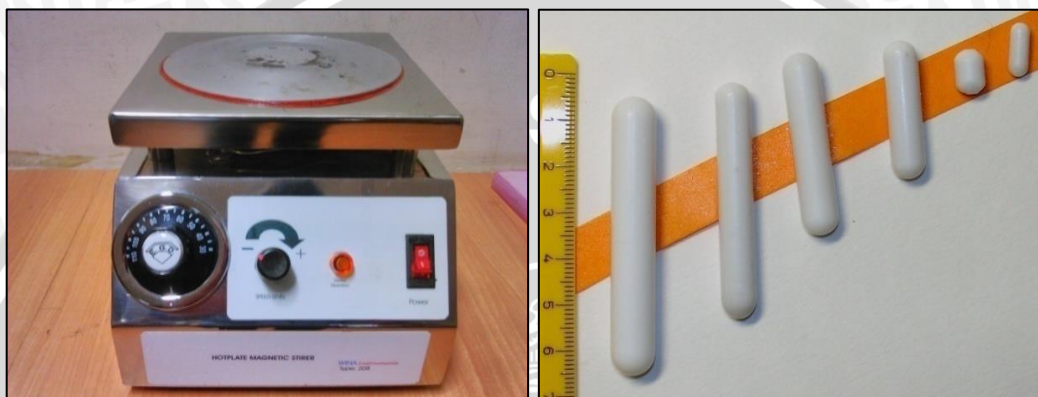
Metode *doctor blading* secara manual ini memang memiliki beberapa kelemahan bila dibandingkan dengan metode *doctor blading* dengan menggunakan mesin atau robot. Kelemahan dari metode ini yaitu terletak pada penentuan tingkat ketebalan lapisan TiO_2 , yang ternyata cukup sulit untuk memastikan secara presisi ketebalannya. Karena dalam proses fabrikasinya, untuk menentukan tingkat ketebalan lapisan TiO_2 yang diinginkan hanya dilakukan dengan menggunakan lapisan selotip (*scotch tape*), maka ketebalan lapisan TiO_2 setiap sampel mungkin berbeda. Hal ini karena daya tekan pada substrat saat meratakan pasta TiO_2 pada kaca TCO juga turut mempengaruhi ketebalan lapisan yang terbentuk. Meskipun demikian, metode ini tetap dapat diterima dan layak untuk diterapkan, karena metode *doctor blading* adalah metode yang sering digunakan oleh para peneliti DSSC, sangat mudah untuk diterapkan secara manual, efisien serta murah. Metode ini juga merupakan salah satu metode yang paling mungkin untuk digunakan di laboratorium elektronika processing TE-UB. Sedangkan kelemahan yang terdapat pada metode tersebut tidak terlalu signifikan pengaruhnya terhadap perancangan DSSC.

2.9 *Magnetic Stirrer dan Magnetic Stir Bar*

Magnetic stirrer merupakan alat yang berfungsi untuk proses homogenisasi cairan kimia. Alat ini bekerja menggunakan prinsip putaran medan magnet untuk memutar *magnetic stir bar* yang direndam atau dimasukkan

kedalam cairan yang hendak diaduk, sehingga dengan terjadinya putaran dari *stir bar* ini kemudian dapat dilakukan pengadukan cairan dengan kecepatan putaran dan suhu yang dapat diatur.

Dalam penelitian ini digunakan *magnetic stirrer* tipe 208 dari WINA Instruments dan *Magnetic Stir Bar* dengan panjang 2,5 cm. Bentuk fisik *Magnetic stirrer* dan *magnetic stir bar* ditunjukkan dalam Gambar 2.15.



Gambar 2.15. Magnetic Stirrer (Kiri) dan Magnetic Stir Bar (Kanan)

Sumber : Lab. Elektronika Proses TE-UB

2.10 Pelarut

Pelarut dalam penelitian ini digunakan untuk melepas zat klorofil dari daun secara kimiawi sehingga menjadi homogen dengan larutan. Dalam penelitian ini diperlukan senyawa pelarut yang bersifat polar karena klorofil merupakan senyawa organik yang bersifat polar, sehingga ethanol yang bersifat polar dapat dimanfaatkan untuk menarik dan melarutkan klorofil. Oleh karena itu, pelarut yang digunakan dalam penelitian ini adalah ethanol dengan konsentrasi 98%. Pelarut ethanol ditunjukkan dalam gambar 2.16.



Gambar 2.16. Ethanol PA konsentrasi 98%

Sumber : Lab. Elektronika Proses TE-UB

2.11 Scale

Scale atau timbangan digital dalam penelitian ini digunakan untuk menimbang massa dari material dan bahan – bahan DSSC dalam orde gram. Pada penelitian ini digunakan *scale* tipe CLSeries dari OHAUS. *Scale* tipe CLSeries dari OHAUS ditunjukkan dalam Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Digital Scale OHAUS CL Series

Sumber : Lab. Elektronika Proses TE-UB

2.12 Furnace

Furnace atau tungku listrik dalam penelitian ini digunakan untuk perekatan pasta TiO_2 pada permukaan konduktif kaca TCO melalui proses pemanggangan. Pada proses ini, dilakukan pemanggangan pasta TiO_2 pada temperatur 450°C . *Furnace* yang digunakan pada penelitian adalah *furnace* Vulcan A-550. *Furnace* Vulcan A-550 ditunjukkan dalam Gambar 2.18.



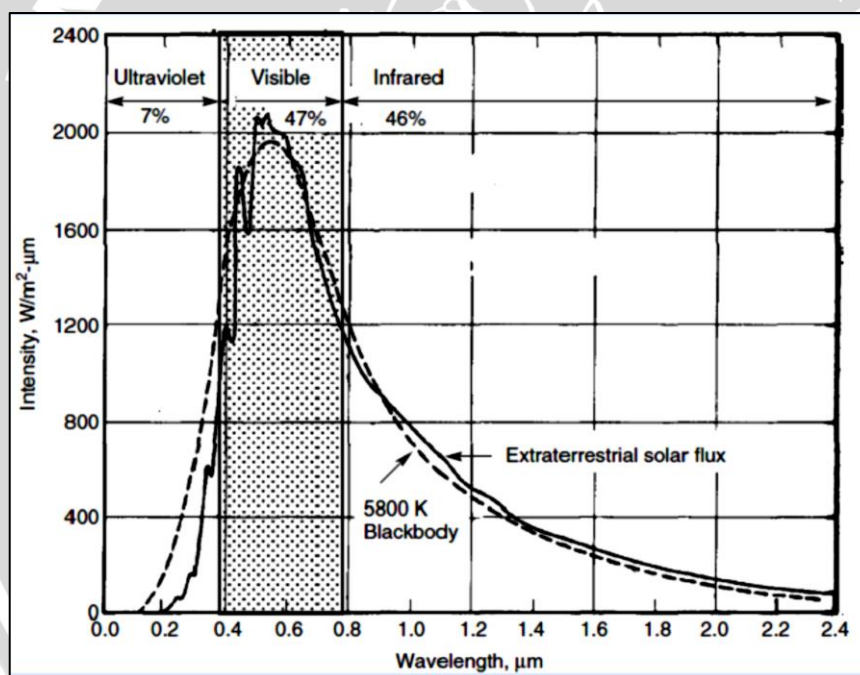
Gambar 2.18 Furnace Vulcan A-550.

Sumber : Lab. Elektronika Proses TE-UB

2.13 Air Mass 1.5

Cahaya matahari merupakan sumber radiasi surya memiliki diameter yang sangat besar yaitu 1.4 juta kilometer, *thermonuclear furnace* meleburkan atom hidrogen ke helium. Kerugian yang dihasilkan dari massa diubah menjadi sekitar $3,8 \times 10^{20}$ MW energi elektromagnetik yang memancar keluar dari permukaan ke ruang angkasa. Matahari memancarkan radiasi cahaya dengan berbagai panjang gelombang mulai dari ultraviolet, cahaya tampak, sampai infrared dari spectrum elektromagnetik. Radiasi ini timbul akibat dari permukaan matahari yang mempunyai temperatur sekitar 5800 K, sehingga spectrum yang dipancarkan matahari sama dengan spectrum dari *blackbody* pada temperatur yang sama. *Blackbody* ini didefinisikan sebagai objek yang menyerap secara sempurna semua radiasi elektromagnetik, dan juga mampu memancarkan radiasi dengan distribusi energi bergantung pada temperatur (Akhmad, 2014: 14).

Gambar 2.19 menunjukkan spektrum sinar matahari kurang lebih sama dengan spektrum *blackbody* yang beradiasi sekitar 5800 K, berbaur dengan jalur penyerapan atomik dari lapisan tipis di atas fotosfer. Untuk matahari, dengan temperatur skitar 5800 K, radiasinya paling kuat berada pada gelombang cahaya tampak (*visible light*) dengan panjang gelombang sekitar 400–800 nanometer (nm). Pada permukaan matahari energi radiasi yang dipancarkan yaitu sebesar 62 MW/m², dan diatas atmosfer bumi radiasinya berkurang menjadi total sebesar 1353 W/m². Ditampilkan juga area di bawah spektrum matahari yang hampir sesuai dengan panjang gelombang dalam UV *ultraviolet* (7%), cahaya tampak (47%), dan inframerah (46%) (Hristov, 2008). Spektrum yang terlihat, yang terletak di antara UV dan IR, yaitu berkisar dari 0,38 μm (violet) menjadi 0,78 μm (merah).

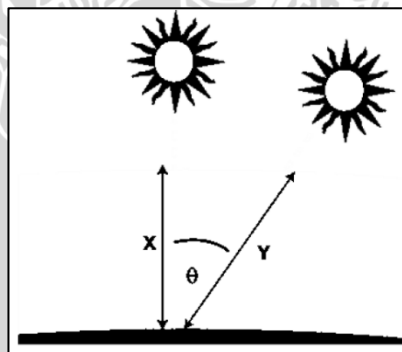


Gambar 2.19 Persebaran Solar Spectrum
Sumber : Hristov 2008 : 15

Pengaruh dari atmosfer terhadap spektrum radiasi matahari direpresentasikan dengan faktor *air mass* (AM). *Air Mass* adalah sebagai jarak tempuh cahaya matahari dalam atmosfer bumi sebagai fungsi dari sudut elevasi matahari terhadap permukaan bumi. Hal ini biasanya dilambangkan sebagai “AM (x)”, di mana x adalah *inverse* dari cosinus sudut *zenith* matahari. *Air Mass* didefinisikan sebagai berikut :

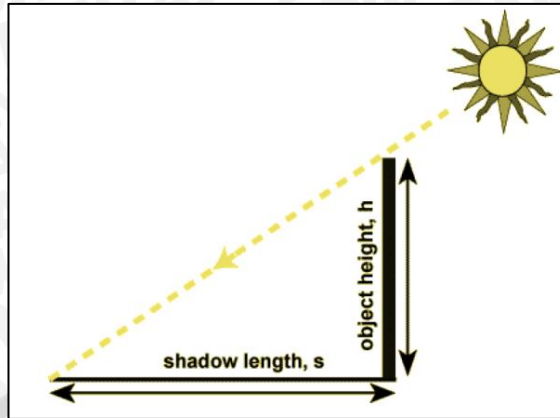
$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (2-7)$$

Sudut (θ) adalah sudut dari sumbu vertikal (*zenith angle*). Berdasarkan persamaan (2-7) maka kondisi saat matahari tepat tegak lurus di atas kepala kita disebut dengan *Air Mass* (AM) 1. Sedangkan keadaan di mana intensitas cahaya matahari konstan (di luar angkasa) atau sebesar 1365 W/m^2 bisa disebut dengan *Air Mass* (AM) 0. *Zenith angle* merupakan sudut sinar datang matahari terhadap sumbu tegak lurus permukaan tanah seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.20.



Gambar 2.20 Metode Penentuan *zenith angle*
Sumber : Honsberg *et al*, 2008

Nilai umum untuk pengukuran sel surya adalah AM 1.5, yang berarti matahari berada pada sudut *zenith* 48° . Nilai ini dijadikan acuan karena pada saat *Air Mass* (AM) 1.5 cahaya matahari akan memberikan spektrum cahaya tampak paling tinggi yaitu sebesar 54%. Secara normal cahaya matahari menyebarkan sinar *ultraviolet* sebesar 7%, cahaya tampak sebesar 47%, dan inframerah 46%. Metode sederhana untuk menentukan *Air Mass* yaitu dari perhitungan tinggi benda (*object height*, h) dengan panjang bayangannya (*shadow length*, s) seperti dalam Gambar 2.21.



Gambar 2.21 Metode Pengukuran Air Mass

Sumber : Honsberg *et al*, 2008

Persamaan dalam menentukan berapa besar air mass berdasarkan gambar di atas adalah sebagai berikut (Honsberg *et al*, 2008) :

$$AM = \sqrt{1 + \left(\frac{s}{h}\right)^2} \tag{2-8}$$

Keterangan :

- AM = Air Mass
- s = panjang bayangan benda
- h = panjang benda

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Akhmad Farid (2014) dengan menggunakan persamaan (2-8) untuk menentukan waktu terjadinya Air Mass 1.5, didapatkan hasil Air Mass sebagai berikut :

Tabel 2.1. Data Hasil Pengamatan Air Mass pada waktu tertentu

Pukul	Panjang benda (cm)	Panjang Bayangan (cm)	AM
7.00	14.65	33.28	2.515
7.45	14.65	26	2.037
8.00	14.65	20.5	1.720
8.10	14.65	19.4	1.659
8.30	14.65	17.5	1.558
8.34	14.65	16.4	1.501
8.38	14.65	16	1.481

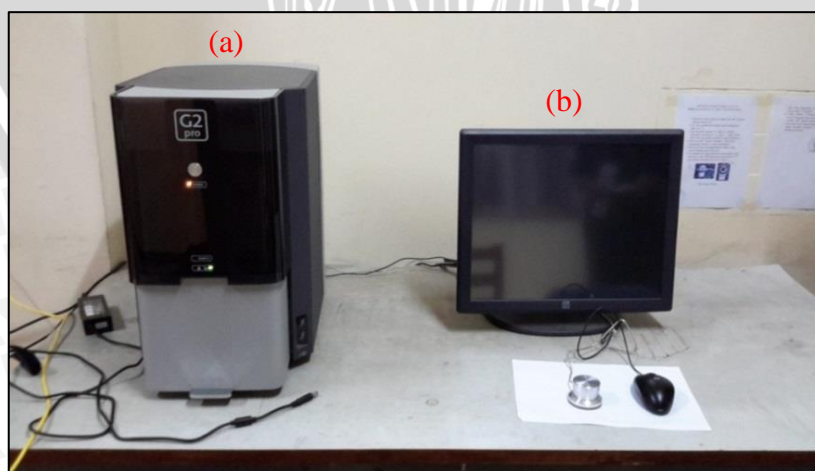
9.00	14.65	12.7	1.323
9.30	14.65	10.8	1.242
10.00	14.65	7.5	1.123
10.30	14.65	5.1	1.059
11.00	14.65	2.9	1.019
11.30	14.65	1.2	1.003
11.46	14.65	1.5	1.005
12.19	14.65	3.3	1.025
13.03	14.65	6.5	1.094

Sumber : Akhmad (2014 : 40)

Dari data pengamatan di atas didapatkan bahwa panjang bayangan akan semakin pendek ketika menjelang siang hari. Dengan acuan panjang benda adalah 14.65 cm, maka diketahui bahwa *air mass* (AM) 1.5 terjadi antara pukul 8.30 – 8.40 WIB (Akhmad, 2014 : 41).

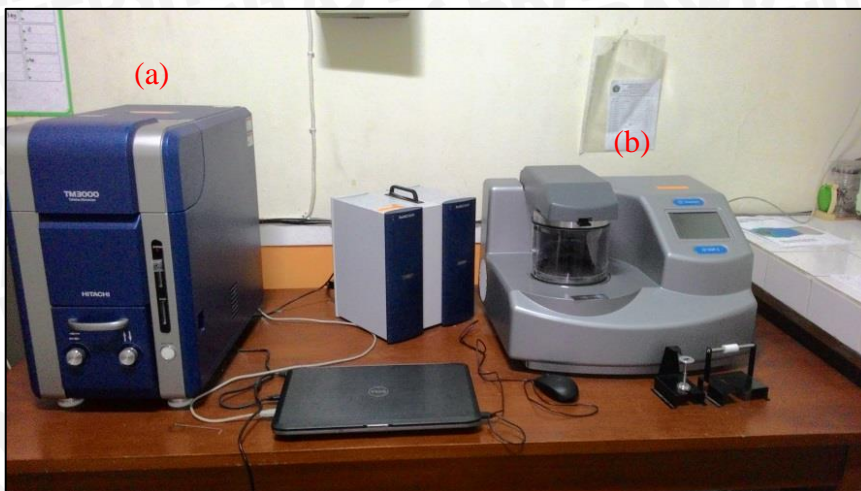
2.14 Scanning Electron Microscope (SEM)

SEM (*Scanning Electron Microscope*) digunakan untuk studi detail arsitektur permukaan sel (atau struktur jasad renik lainnya), obyek akan diamati secara tiga dimensi. SEM mempunyai resolusi hingga 1 nm atau pembesaran 400.000 kali. Pada penelitian ini untuk mengamati ketebalan dan permukaan TiO₂ digunakan SEM Phenom tipe G2 Pro dan SEM Hitachi Tabletop Microscope TM3000 yang ditunjukkan dalam Gambar 2.22 dan Gambar 2.23.



Gambar 2.22 (a) Scanning Electron Microscope (b) Display SEM

Sumber : Lab. Sentral Teknik Mesin UB



Gambar 2.23 (a) *Scanning Electron Microscope* (b) *Rotary Pumped Coating Systems for SEM*

Sumber : Lab. Sentral Ilmu Hayati Universitas Brawijaya

