

BAB II

DASAR TEORI

Dalam merencanakan dan merealisasikan pembuatan *Dye-sensitized Solar Cell* (DSSC) serta pengujiannya terhadap cahaya dibutuhkan pemahaman yang mendalam mengenai teori-teori penunjang yang mendukung. Teori-teori yang mendukung dalam pembuatan *Dye-sensitized Solar Cell* (DSSC) meliputi prinsip kerja DSSC, material-material penyusun DSSC dan penjelasan alat pembuatan. Sementara itu, teori-teori yang mendukung dalam penentuan pengaruh cahaya terhadap keluaran DSSC meliputi penjelasan tentang cahaya matahari, *air mass* (AM), fotometri dan sumber cahaya lampu yang digunakan.

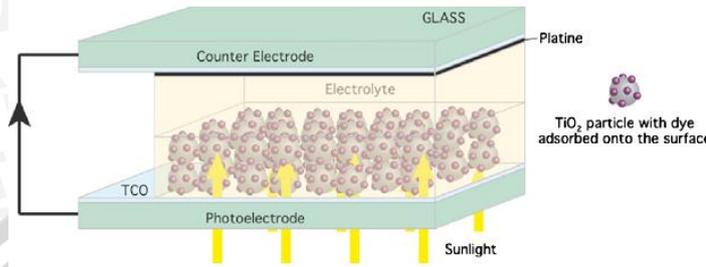
2.1. *Dye-sensitized Solar Cell* (DSSC)

2.1.1. Penjelasan

Sejak dilaporkannya DSSC (*Dye-sensitized Solar Cell*) pada tahun 1991 oleh O'Regan and Gratzel, DSSC telah menjadi penelitian sel surya yang sangat menarik para peneliti dan ilmuan di dunia bahkan di Indonesia karena teknologi fabrikasi yang sederhana, biaya produksi yang murah dan ramah lingkungan. Selain itu efisiensi konversi energi sebesar 10-11% telah dicapai.

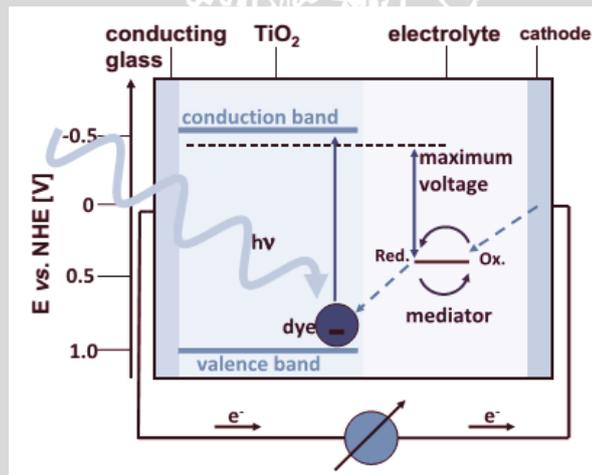
Secara umum DSSC dibentuk melalui mekanisme *photoelectrochemical*, di mana penyerapan cahaya matahari melalui *dye-sensitized* seperti halnya klorofil pada proses fotosintesis daun. Zat pewarna (*dye*) merupakan unsur dari struktur DSSC yang berperan menyerap atau peka (*sensitize*) terhadap cahaya. *Dye-sensitized* berarti *dye* yang dibuat peka (pada struktur lapisan DSSC). Sedangkan proses pembangkitan dan transfer elektron terjadi melalui bahan semikonduktor yang memiliki pita energi yang lebar, umumnya TiO_2 (*Titanium Dioxide*) sebagai *photoelectrode*. Larutan elektrolit pasangan redoks I^-/I_3^- sebagai media transport muatan dan elektroda lawan (*counter electrode*) yang diberi lapisan katalis (biasanya platina). Struktur standar DSSC menggunakan dua kaca TCO

(*Transparent Conductive Oxide*) sebagai substrat tempat pembentukan *photoelectrode* dan *counter electrode* dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Struktur Standar *Dye-sensitized Solar Cell*
 Sumber : Nazeeruddin et al., 2011: 1173

2.1.2. Cara kerja

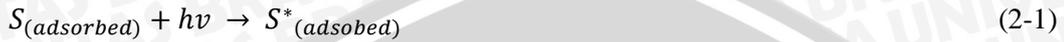


Gambar 2.2. Prinsip kerja *Dye-sensitized Solar Cell*
 Sumber : Nazeeruddin et al., 2011: 1173

Gambar 2.2 menunjukkan prinsip-prinsip kerja DSSC. Prinsip kerja DSSC dimulai ketika penyerapan foton oleh *dye* (*sensitizer S*) (Persamaan 2-1), elektron e^- pada *sensitizer* bergerak dari level *ground state* menuju ke *excited sensitizer S** dan selanjutnya ke pita konduksi pada semikonduktor TiO_2 , sehingga *sensitizer* dalam keadaan S^+ atau *sensitizer* melepas elektron (Persamaan 2-2). Elektron mengalir melalui semikonduktor TiO_2 menuju elektroda pada substrat TCO dan kemudian melalui beban eksternal menuju ke *counter electrode* (sebagai katalis) sehingga dapat merubah ion triiodine I_3^- pada elektrolit menjadi iodide I^-



(Persamaan 2-3). Iodide I^- pada elektrolit membuat molekul dye atau *sensitizer* S^+ kembali keadaan awalnya (*sensitizer* S) (Persamaan 2-4). Terbentuklah suatu siklus transfer elektron terus-menerus sehingga terjadi konversi energi cahaya menjadi energi listrik.



(Nazeeruddin et al., 2011)

2.2 Material / Komponen Penyusun DSSC

2.2.1 Substrat TCO (*Transparent Conductive Oxide*)

Substrat yang digunakan pada DSSC adalah TCO (*Transparent Conductive Oxide*) yang telah dilapisi bahan ITO (*Indium Tin Oxide*). Lapisan tersebut berfungsi sebagai tempat muatan mengalir. Substrat TCO ini tidak akan mengalami *defect* saat pengeringan pada temperatur 400-500°C dalam proses pelapisan material TiO_2 pada substrat. Substrat TCO berbahan ITO (*Indium Tin Oxide*) dalam penelitian ini memiliki resistivitas permukaan sebesar 15-25 Ω/sq . Bahan ITO terdapat pada salah satu sisi substrat.



Gambar 2.3. Substrat TCO *Indium Tin Oxide* (oleh Sigma-Aldrich®)

2.2.2 Nanopartikel TiO₂

Dalam DSSC dibutuhkan semikonduktor yang memiliki lebar pita energi (*band gap*) yang besar (>3 eV) untuk transparansi semikonduktor pada sebagian besar spektrum cahaya matahari. Maka dalam penelitian ini digunakan jenis semikonduktor TiO₂ (*Titanium Dioxide / Titanium (IV) Oxide*), jenis ini yang paling sering digunakan karena efisiensi DSSC menggunakan TiO₂ masih belum tertandingi. Jenis semikonduktor lain yang dapat digunakan yaitu ZnO, (Uthirakumar, 2011 : 437).

TiO₂ dengan struktur nanopori (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 dan implikasinya akan menaikkan juga jumlah cahaya yang terserap. TiO₂ produksi *Sigma-Aldrich*® dengan ukuran partikel sebesar ~21nm ditunjukkan dalam Gambar 2.4.



Gambar 2.4 *Titanium (IV) Oxide* (oleh *Sigma-Aldrich*®)

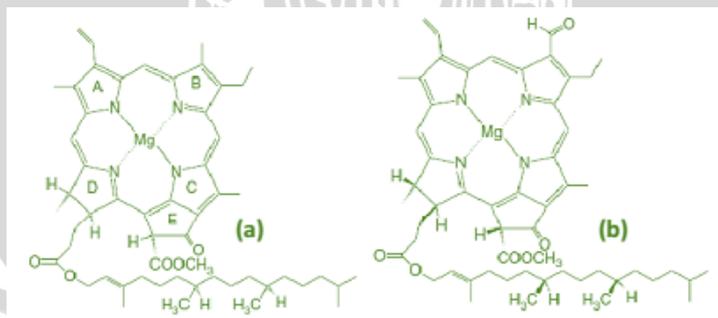
2.2.3 Zat Pewarna (*Dye*) Klorofil

Dalam struktur DSSC, *dye* berfungsi sebagai pompa fotokimia yang dapat mengeksitasi elektron ke tingkat yang lebih tinggi setelah menyerap energi foton yang dihasilkan oleh cahaya matahari. *Dye* yang umumnya digunakan dan mencapai efisiensi tinggi mencapai 10% yaitu jenis *Ruthenium (Ru) Complex*

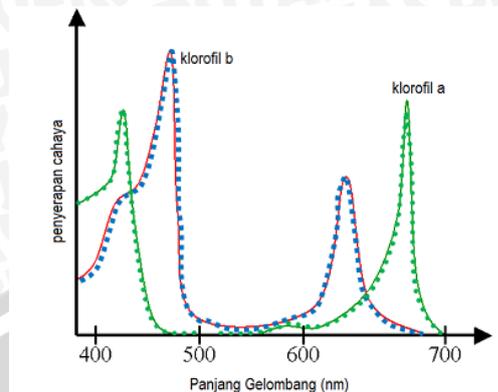
(Wilman et al., 2007). Walaupun DSSC menggunakan *dye* jenis ini telah mencapai efisiensi yang cukup tinggi, namun *dye* jenis ini cukup sulit untuk disintesa dan berharga mahal.

Penelitian dalam mencari *dye* yang murah dan berbahan dari tumbuhan (natural *dye*) terus dilakukan. Proses fotosintesis pada tumbuhan telah membuktikan adanya senyawa pada tumbuhan yang dapat digunakan sebagai *dye*. Zat-zat tersebut ditemukan klorofil pada daun. Klorofil merupakan pemegang peranan penting dalam proses fotosintesis. Klorofil merupakan pigmen warna hijau dan paling banyak ditemukan pada tumbuhan hijau dan menjadi penyerap utama cahaya tampak penyinaran. Semua zat tersebut menyatu dalam daun untuk melakukan fotosintesis. Pigmen utama ini berfungsi menyerap cahaya dan mengubahnya menjadi energi kimia yang dibutuhkan dalam mereduksi karbondioksida menjadi karbohidrat dalam proses fotosintesis. Zat klorofil terdapat pada kloroplas dalam jumlah banyak serta mudah diekstraksi ke dalam pelarut ethanol (Pramono 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 2.4.



Gambar 2.4. Struktur Kimia Klorofil a dan Klorofil b
Sumber : Sumber : Pramono et al., 2013 : 9



Gambar 2.5. Spektrum Penyerapan Klorofil a dan Klorofil b
Sumber : Pramono et al., 2013 : 9

Spektrum penyerapan cahaya oleh klorofil a dan klorofil b ditunjukkan dalam Gambar 2.5. Spektrum cahaya ini didapatkan dari sinar matahari yang mencakup panjang gelombang ultraviolet, cahaya tampak, dan inframerah.

Dalam penelitian ini klorofil yang digunakan adalah klorofil dari daun jarak pagar dan daun pepaya. Hal ini dikarenakan kedua tanaman tersebut mempunyai kandungan klorofil yang cukup besar. Selain itu, tanaman tersebut juga mudah dijumpai di negara tropis seperti Indonesia.

2.2.4 Elektrolit (I^-/I_3^-)

Elektrolit yang digunakan pada DSSC terdiri dari iodide (I^-) dan triiodine (I_3^-) sebagai pasangan redoks dalam pelarut. Elektrolit dalam DSSC berperan sebagai transport muatan dari *counter electrode* ke *dye*. 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 teroksidasi.
- 5) Mempunyai reversibilitas tinggi.

2.2.5 Counter Electrode

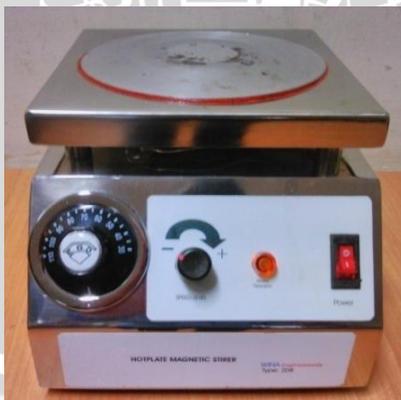
Counter electrode disebut juga sebagai katoda DSSC. Elektroda ini berperan sebagai katalis reaksi redoks dalam sel. *Counter electrode* mereduksi ion triiodine I_3^- menjadi iodide I^- (Chen, Lee, Tsai & Ting, 2007).

Counter electrode dibuat dengan cara proses deposisi lapisan pada substrat TCO. Bahan lapisan dapat berupa platina, grafit dan karbon. Platina merupakan material yang umum digunakan sebagai katalis pada berbagai aplikasi, juga sangat efisien dalam aplikasinya pada DSSC. *Counter electrode* dideposisikan pada TCO dengan berbagai metode yaitu elektrokimia, *screen printing*, *firing* (karbon), *sputtering*, *spin coating*, *pyrolysis*, dll.

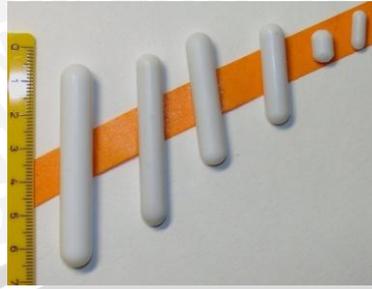
2.3 Alat-alat Pendukung Pembuatan DSSC

2.3.1 Magnetic Stirrer dan Magnetic Stir Bar

Magnetic stirrer merupakan alat homogenisasi cairan kimia. Alat ini menggunakan putaran medan magnet untuk memutar *magnetic stir bar* direndam dalam cairan juga berputar sehingga dapat mengaduk cairan. Dalam penelitian ini digunakan *magnetic stirrer* tipe 208 dari WINA Instruments dan *Magnetic Stir Bar* dengan panjang 2,5 cm.



Gambar 2.6. *Magnetic Stirrer* tipe 208 dari WINA Instruments



Gambar 2.7. *Magnetic Stir Bar*

2.3.2 Scale

Scale atau timbangan digunakan untuk menimbang material dan bahan pada orde gram. Pada penelitian ini digunakan timbangan tipe *CL Series* dari *OHAUS* untuk menimbang daun, bubuk TiO_2 , dan material penyusun DSSC lainnya.



Gambar 2.8. *Digital Scale* tipe *CL Series OHAUS*

2.3.3 Furnace

Proses pengeringan pasta TiO_2 yang melekat pada substrat TCO membutuhkan tungku pemanas (*furnace*) dengan temperatur suhu 450°C . Alat ini mempunyai temperatur maksimal hingga 800°C .



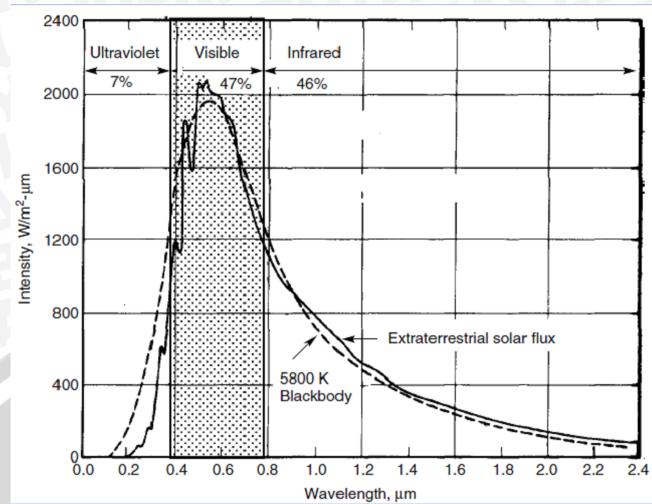
Gambar 2.9. *Furnace Vulcan A-550*

2.4 Sumber Energi Surya

Sebelum fabrikasi dan menguji solar sel atau DSSC, patut diketahui seberapa besar energi surya atau energi cahaya matahari sampai ke bumi. 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 spektrum elektromagnetik. Radiasi ini timbul sebagai akibat dari permukaan matahari yang mempunyai temperatur sekitar 5800 K sehingga spektrum yang dipancarkan matahari sama dengan spektrum 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 kepada temperturnya.

Gambar 2.10 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).



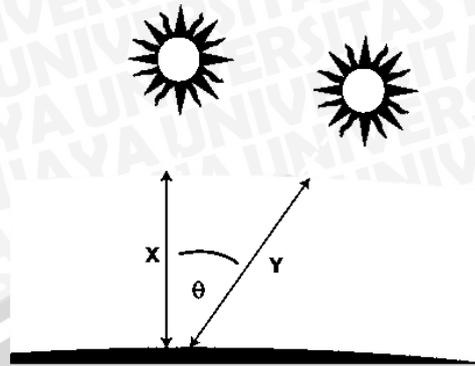
Gambar 2.10. Persebaran *Solar Spectrum*
 Sumber : Hristov, 2008 : 15

2.5 Air Mass

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 :

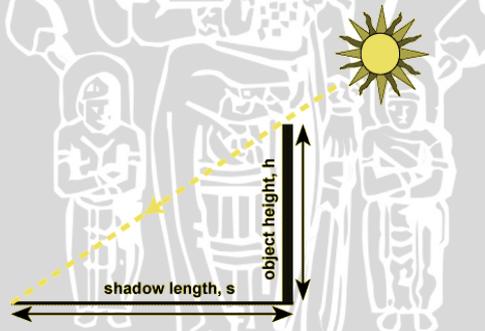
$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \tag{2-5}$$

dimana θ adalah sudut dari sumbu vertikal (*zenith angle*). Berdasarkan persamaan di atas 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/m² bisa disebut dengan Air Mass (AM) 0. *Zenith angle* merupakan sudut sinar datang matahari terhadap sumbu tegak lurus permukaan tanah seperti dalam Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Sudut Zenit (Θ) Merupakan Sudut Matahari Terhadap Sumbu X

Nilai umum untuk pengukuran sel surya adalah AM 1.5, yang berarti matahari berada pada sudut 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 2.12.



Gambar 2.12 Metode Pengukuran Air Mass

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

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

Keterangan :

AM = Air Mass

s = panjang cahaya benda

h = panjang benda

Besar intensitas cahaya matahari dapat ditentukan berdasarkan dari besar air mass (AM) dengan persamaan sebagai berikut

$$I_D = 1353 \times 0.7^{(AM^{0.678})} \quad (2-7)$$

di mana I_D termasuk intensitas sinar matahari langsung tanpa difusi yang tegak lurus dengan suatu bidang dan memiliki satuan W/m^2 . Nilai 1.353 adalah intensitas cahaya matahari konstan di luar atmosfer dan 0.7 termasuk 70 % besar radiasi matahari berjalan melewati atmosfer. Sedangkan 0.678 adalah empiris yang sesuai dengan data lapangan dan memperhitungkan ketidakseragaman dalam lapisan atmosfer (Honsberg et al, 2008).

Pada keadaan cerah intensitas cahaya matahari menghasilkan difusi radiasi cahaya sebesar 10 %. Maka, persamaan intensitas cahaya matahari secara global adalah

$$I_G = 1.1 \times I_D \quad (2-8)$$

Jika *air mass* yang diketahui adalah sebesar 1.5, berdasarkan persamaan (2-7) dan (2-8) maka besar intensitas cahaya matahari menurut persamaan di atas adalah $930 W/m^2$.

2.6 Pengukuran Cahaya Tampak (Fotometri)

Sumber cahaya memancarkan gelombang elektromagnetik dalam Ultra Violet (UV), spektrum terlihat dan inframerah. Pengukuran semua unsur tersebut disebut radiometri. Fotometri adalah cabang khusus radiometri di mana kita hanya mengukur cahaya tampak. Cahaya adalah suatu bentuk energi yaitu energi pancaran dan diterima oleh indera penglihatan (retina mata).

Empat istilah yang digunakan untuk mendeskripsikan cahaya antara lain :

- Luminous Intensity (candela)
- Luminous Flux (lumen)
- Illuminance (lux)
- Luminance (candela/m²)

2.6.1 Luminous intensity

Luminous intensity adalah ukuran seberapa besar fluks (lumens) dipancarkan dalam sudut kerucut kecil di arah tertentu dari sumber cahaya (lampu) atau lumener. Persamaan dari Intensitas cahaya ialah flux cahaya per satuan sudut ruang yang dipancarkan kesuatu arah tertentu diukur dalam candela (cd). Jika 1 cd, melalui sudut ruang 1 steradian akan menghasilkan flux cahaya 1 lumen (National Framework, 2009).

$$I = \frac{\Phi}{\omega} \quad (2-9)$$

Keterangan :

I = Intensitas cahaya dalam candela (cd)

Φ = Flux cahaya dalam lumen (lm)

ω = Jumlah steradian suatu sudut ruang

2.6.2 Luminous flux

Candela menunjukkan seberapa terang cahaya dalam arah tertentu. Istilah *luminous flux* digunakan untuk mengukur output cahaya tampak lampu, di mana cahaya tidak terarah. Hal ini mengacu pada cahaya tampak dipancarkan ke segala arah pada saat tertentu. Simbol untuk *luminous flux* adalah F atau Φ (phi).

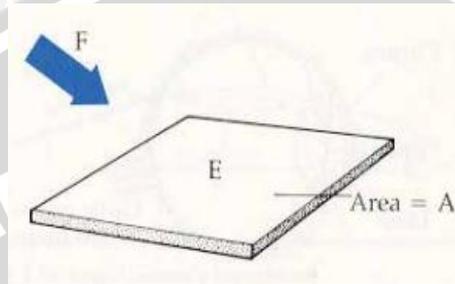
Lumen (lm) adalah sama dengan fluks yang dipancarkan oleh sumber titik seragam 1 candela di sudut yang solid dari 1 steradian. Sebuah steradian adalah standar satuan sudut yang solid dalam tiga dimensi. Sebagai contoh, total fluks bercahaya lampu 60W GLS adalah 710 lm. Nilai ini (710 lm) dipancarkan ke segala arah dari lampu.

2.6.3 Illuminance (Intensitas Penerangan)

Ketika sinar cahaya mencapai permukaan padat, proses ini dikenal sebagai *illuminance* atau intensitas penerangan. Dengan cara yang sama kita memiliki lumens untuk *mengukur luminous flux*, kita perlu pengukuran untuk jumlah iluminasi. Penerangan E pada suatu titik pada permukaan didefinisikan sebagai

luminous flux F (lumens) insiden pada elemen kecil dari permukaan dibagi dengan luas A (m^2) dari elemen (National Framework, 2009). Persamaan dari intensitas penerangan atau iluminasi cahaya sebagai berikut

$$E = \frac{F}{A} \quad (2-10)$$



Gambar 2.13 Ilustrasi Antara *Luminous Flux* (F) dengan Iluminasi (E)

Dalam SI atau Sistem International unit, unit dasar dari pencahayaan adalah Lumen per meter persegi atau Lux, Sebagai contoh, jika area seluas 0,1 meter persegi menerima fluks bercahaya 20 lumens, penerangan yang biasanya diberikan simbol E , akan sama dengan 20 dibagi dengan 0,1 atau sama dengan 200 lux.

2.6.4 Luminance

Luminansi adalah jumlah cahaya yang dipantulkan atau diteruskan oleh suatu obyek. Permukaan yang lebih gelap akan memantulkan cahaya yang lebih sedikit daripada permukaan yang lebih terang, karena itu dibutuhkan iluminansi yang sama dengan permukaan yang lebih terang.

2.7 Lampu dan Karakteristik Spektrum Cahaya

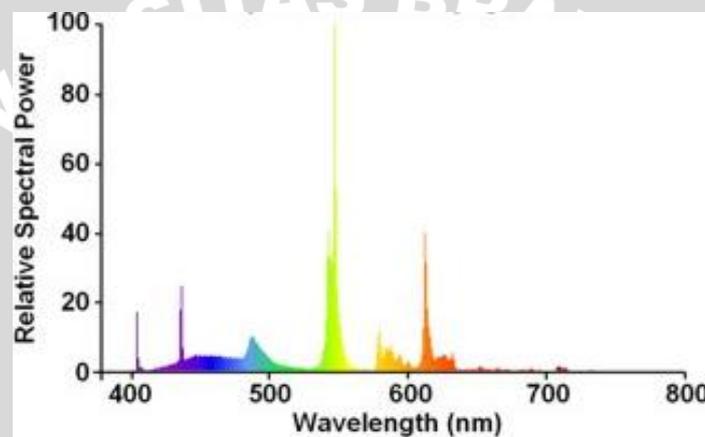
Penelitian ini membutuhkan beberapa sumber cahaya selain radiasi cahaya matahari. Sumber cahaya yang digunakan sebagai uji performansi DSSC dalam penelitian ini adalah lampu *compact fluorescent* dan lampu *LED*. Setiap jenis lampu tersebut memiliki karakteristik spektrum panjang gelombang yang berbeda.

2.7.1 Lampu Compact Fluorescent

Lampu *compact fluorescent* (CFL) merupakan pilihan yang sangat efisien untuk aplikasi perumahan dan di mana tabung *fluorescent* linear sudah jarang

digunakan. Kualitas *CFL* telah meningkat secara signifikan dalam baru-baru ini tahun dan mereka telah menjadi populer di hampir semua rumah. Lampu ini dirancang dengan bentuk yang lebih kecil yang dapat bersaing dengan lampu pijar dan uap merkuri di pasaran lampu dan memiliki bentuk bulat atau segi empat.

Gambar 2.14 merupakan spektrum cahaya yang dihasilkan lampu *Philips CFL Tornado®*. Spektrum cahaya yang dimiliki oleh lampu ini dominan pada panjang gelombang 550 nm.



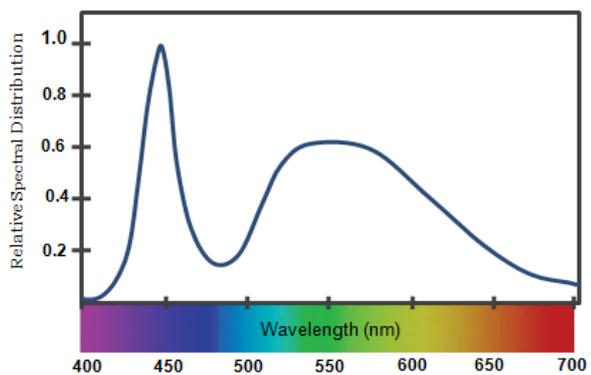
Gambar 2.14 Spektrum Cahaya Compact Fluorescent
Sumber : Philips CFL Tornado, 2004

2.7.2 Lampu LED

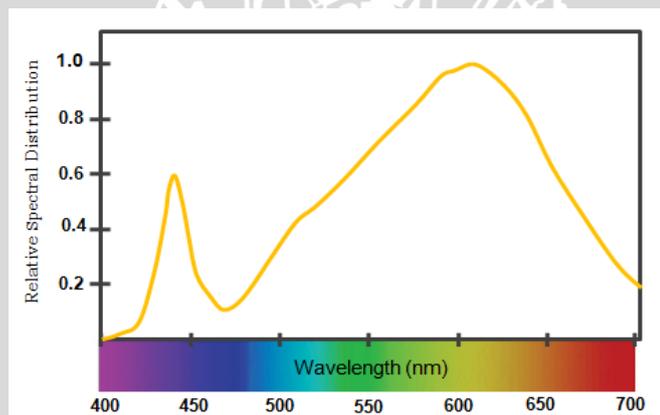
Cahaya pada LED adalah energi elektromagnetik yang dipancarkan dalam bagian spektrum yang dapat dilihat. Cahaya yang tampak merupakan hasil kombinasi panjang-panjang gelombang yang berbeda dari energi yang dapat terlihat, mata bereaksi melihat pada panjang gelombang energi elektromagnetik dalam daerah antara radiasi ultra violet dan infra merah.

Lampu LED yang baru-baru ini diproduksi adalah LED *Cool Daylight* dan LED *Warm White*. Masing-masing lampu tersebut memiliki karakteristik spektrum cahaya yang berbeda. LED *Cool Daylight* memiliki sebaran spektrum cahaya yang tinggi pada panjang gelombang 450 nm dan memiliki temperatur warna sebesar 6500 K sedangkan spektrum cahaya LED *Warm White* tinggi pada panjang

gelombang sekitar 610 nm dan memiliki temperatur warna sebesar 3000 K seperti yang ditampilkan dalam Gambar 2.15 dan Gambar 2.16.



Gambar 2.15 Spektrum Cahaya LED *Cool Daylight*
 Sumber : Philips Lumileds Lighting Company, 2014 : 11



Gambar 2.16 Spektrum Cahaya LED *Warm White*
 Sumber : Philips Lumileds Lighting Company, 2014 : 12