

BAB II

DASAR TEORI

2.1 PHOTOVOLTAIC

2.1.1 Efek *Photovoltaic*

Photovoltaic (PV) adalah suatu sistem atau cara langsung (*direct*) untuk mentransfer radiasi matahari atau energi cahaya menjadi energi listrik. Sistem *photovoltaic* bekerja dengan prinsip efek *photovoltaic* [5]. Efek *photovoltaic* pertama kali ditemukan oleh Henri Becquerel pada tahun 1839. Efek *photovoltaic* adalah fenomena dimana suatu sel *photovoltaic* dapat menyerap energi cahaya dan merubahnya menjadi energi listrik. Efek *photovoltaic* didefinisikan sebagai suatu fenomena munculnya voltase listrik akibat kontak dua elektroda yang dihubungkan dengan sistem padatan atau cairan saat diexpose di bawah energi cahaya [5].

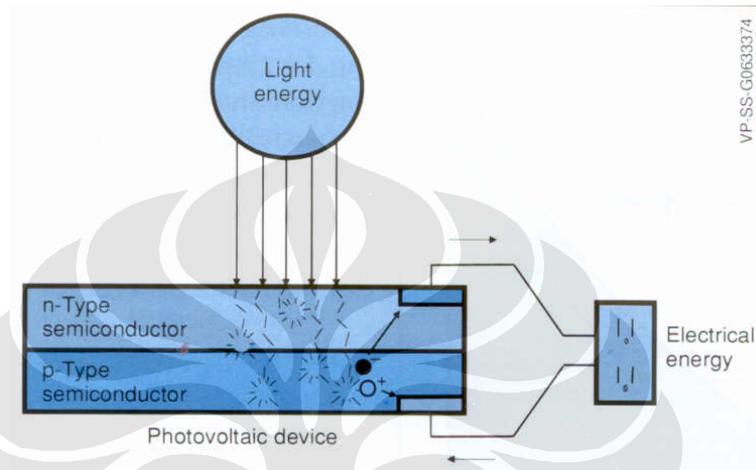
Energi solar atau radiasi cahaya terdiri dari biasan foton-foton yang memiliki tingkat energi yang berbeda-beda. Perbedaan tingkat energi dari foton cahaya inilah yang akan menentukan panjang gelombang dari spektrum cahaya. Ketika foton mengenai permukaan suatu sel PV, maka foton tersebut dapat dibiaskan, diserap, ataupun diteruskan menembus sel PV. Foton yang terserap oleh sel PV inilah yang akan memicu timbulnya energi listrik.

2.1.2 Sel *Photovoltaic*

Sel PV adalah suatu perangkat yang mengkonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik. Sistem sel PV pada dasarnya terdiri dari *pn junction* atau ikatan antara sisi positif dan negatif di dalam sebuah sistem semikonduktor. Sel PV juga dikenal dengan nama *solar cell* atau sel surya. Namun, perbedaannya terletak pada sumber cahaya yang digunakan. Pada sel PV sumber cahaya lebih

umum dan tidak disebutkan secara jelas. Sedangkan pada sel surya energi cahaya berasal dari radiasi sinar matahari [5].

Ilustrasi mekanisme sel PV secara sederhana ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Skema sederhana sistem sel PV [6]

2.2 SEL SURYA (*SOLAR CELL*)

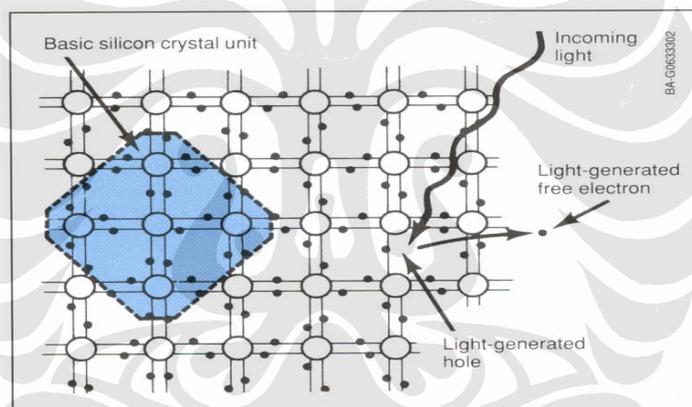
2.2.1 Mekanisme Konversi Energi

Pada dasarnya mekanisme konversi energi cahaya terjadi akibat adanya perpindahan elektron bebas di dalam suatu atom. Konduktifitas elektron atau kemampuan transfer elektron dari suatu material terletak pada banyaknya elektron valensi dari suatu material.

Sel surya pada umumnya menggunakan material semikonduktor sebagai penghasil elektron bebas. Material semikonduktor adalah suatu padatan (solid) dan seperti logam, konduktifitas elektriknya juga ditentukan oleh elektron valensinya [5]. Namun, berbeda dengan logam yang konduktifitasnya menurun dengan kenaikan temperatur, material semikonduktor konduktifitasnya akan meningkat secara *significant*.

Ketika foton dari suatu sumber cahaya menumbuk suatu elektron valensi dari atom semikonduktor, hal ini mengakibatkan suatu energi yang cukup besar untuk memisahkan elektron tersebut terlepas dari struktur atomnya. Elektron yang terlepas tersebut menjadi bebas bergerak di dalam bidang kristal dan elektron tersebut menjadi bermuatan negatif dan berada pada daerah pita konduksi dari material semikonduktor.

Sementara itu akibat hilangnya elektron mengakibatkan terbentuknya suatu kekosongan pada struktur kristal yang disebut dengan "hole" dan bermuatan positif. Skema sederhana terjadinya elektron bebas pada material semikonduktor diilustrasikan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Mekanisme terbentuknya elektron bebas pada material semikonduktor [7]

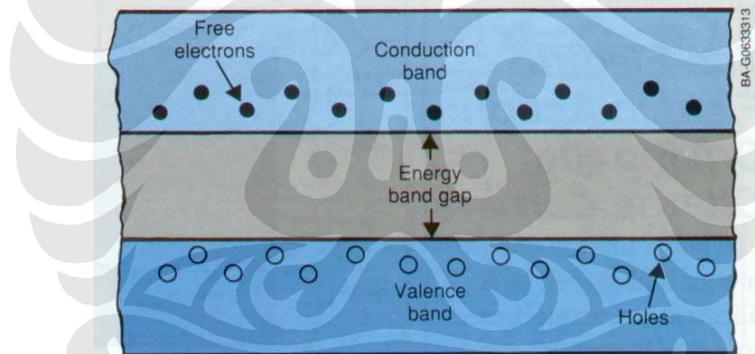
Daerah semikonduktor dengan elektron bebas dan bersifat negatif bertindak sebagai donor elektron. Daerah ini disebut *negatif type (n-type)*. Sedangkan daerah semikonduktor dengan *hole*, bersifat positif dan bertindak sebagai penerima (*acceptor*) elektron. Daerah ini disebut dengan *positive type (p-type)*.

Ikatan dari kedua sisi positif dan negatif (*p-n junction*) menghasilkan energi listrik internal yang akan mendorong elektron bebas dan *hole* untuk bergerak ke arah yang berlawanan. Elektron akan bergerak menjauhi sisi negatif, sedangkan *hole*

bergerak menjauhi sisi positif. Ketika *p-n junction* ini dihubungkan dengan sebuah beban (lampu) maka akan tercipta sebuah arus listrik.

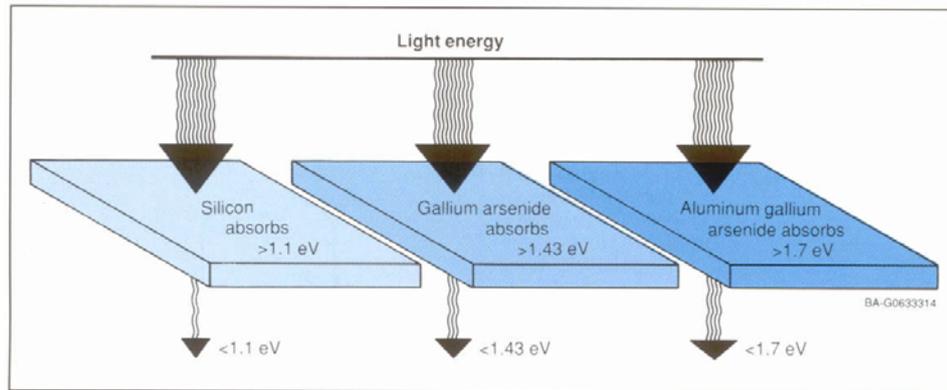
2.2.1.1 Material semikonduktor

Band gap dari suatu semikonduktor sangat menentukan banyaknya spektrum cahaya yang dapat di serap oleh sel PV. Hanya energi yang setara atau lebih besar dari *band gap* yang mampu terserap dan mengeksitasi elektron. Pergerakan elektron bebas dari pita konduktif dan pergerakan *hole* dari pita valensi melewati *band gap* inilah yang menimbulkan energi listrik [8]. Hal tersebut sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Struktur dari material semikonduktor [9]

Energi yang lebih rendah akan terpantul atau menembus sel PV. Sedangkan energi yang lebih tinggi akan terserap dan sebagian menjadi energi panas. Dengan demikian material dengan *band gap* yang lebih rendah mampu mengeksploitasi spektrum cahaya yang lebih banyak, menghasilkan transfer elektron yang lebih banyak, sehingga menghasilkan arus yang lebih tinggi tetapi dengan tegangan yang rendah. Hal tersebut sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Perbedaan *band gap* mempengaruhi besarnya energi yang diserap oleh sel surya [7]

Namun, *band gap* juga mempengaruhi kuatnya medan listrik yang dihasilkan. Material dengan *band gap* yang lebih tinggi akan menghasilkan tegangan (voltase) listrik yang semakin tinggi pula tetapi memiliki arus yang rendah. Semikonduktor dengan *band gap* antara 1-1.8 eV terbukti efektif digunakan pada sel PV [7].

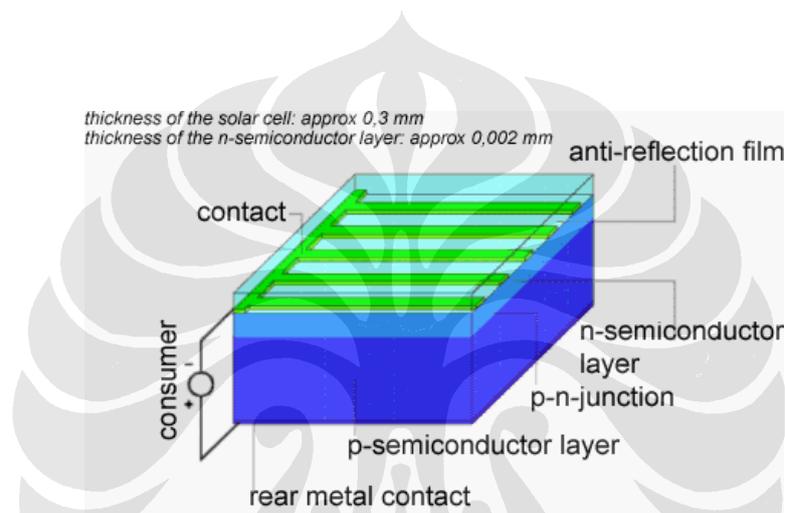
2.2.2 Struktur Umum Sel Surya

Struktur inti dari sel surya pada umumnya terdiri dari satu atau lebih jenis material semikonduktor dengan dua daerah berbeda yaitu, daerah positif dan negatif. Dua sisi yang berlainan ini berfungsi sebagai elektroda. Untuk menghasilkan dua daerah muatan yang berbeda umumnya digunakan *dopant* dengan golongan periodik yang berbeda. hal ini dimaksudkan agar *dopant* pada daerah negatif akan berfungsi sebagai pendonor elektron, sedangkan *dopant* pada daerah positif akan berfungsi sebagai *acceptor* elektron [5].

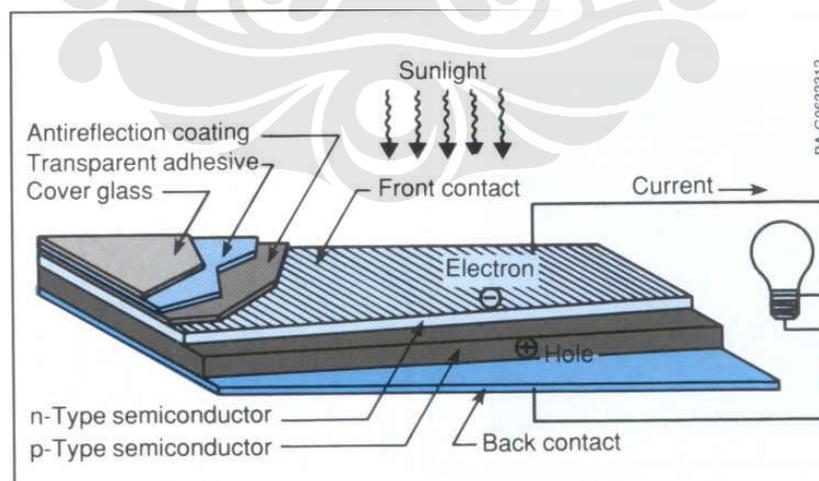
Sebagai contoh, pada solar sel konvensional digunakan material silikon (golongan IV pada tabel periodik) sebagai semikonduktor. Untuk menghasilkan dua muatan yang berbeda, maka pada satu sisi diberi *dopant* dari golongan periodik V yang mempunyai elektron valensi lima. Hal ini mengakibatkan silikon mempunyai

kelebihan elektron (*n-type*). Sedangkan pada sisi yang berlainan digunakan *dopant* dari golongan periodik III yang mengakibatkan silikon kekurangan elektron (*p-type*). Dikarenakan untuk membentuk suatu struktur yang stabil dibutuhkan empat elektron, maka kekurangan satu elektron akan didapat dari donor *n-type* [5].

Selain itu pada sel surya terdapat lapisan antirefleksi, dan substrat logam sebagai tempat mengalirnya arus dari lapisan tipe-n (elektron) dan tipe-p (hole). Skema sederhana struktur sel surya diilustrasikan pada Gambar 2.5 dan Gambar 2.6.



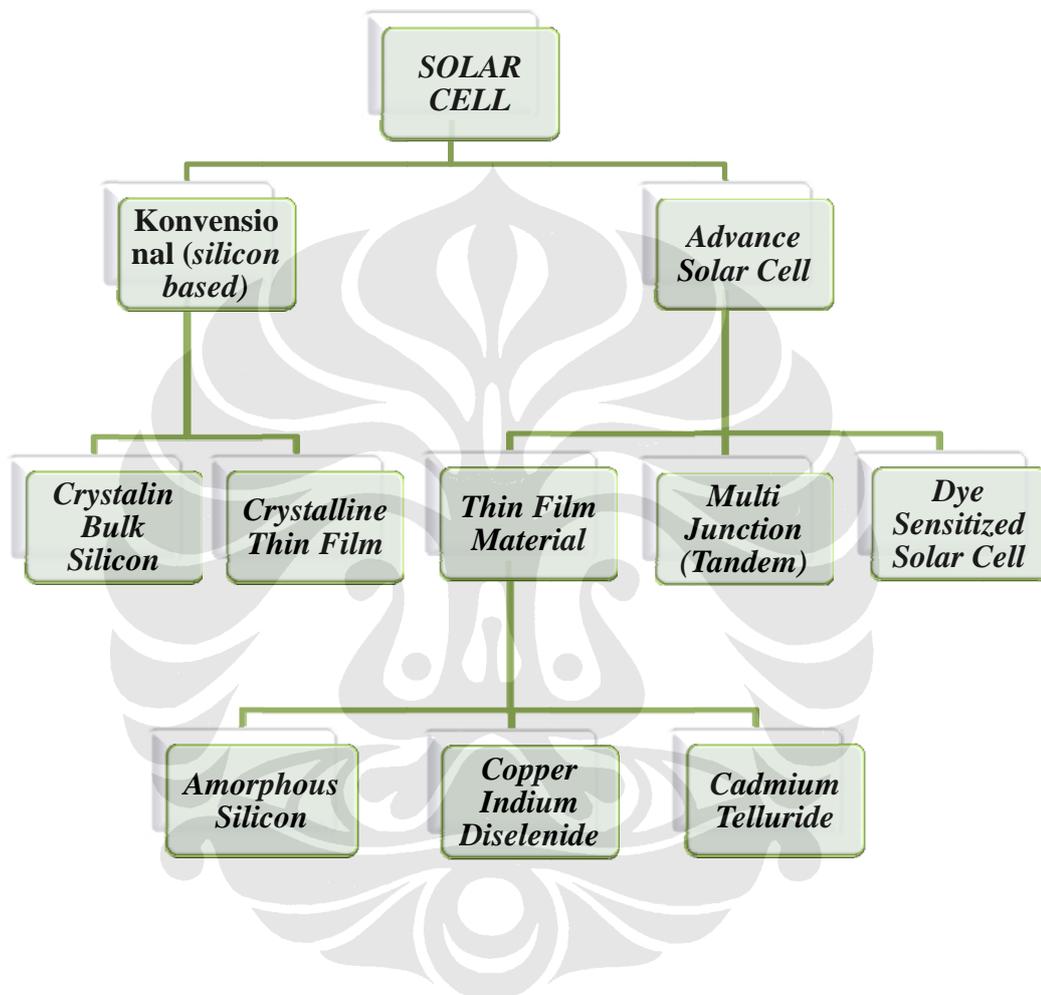
Gambar 2.5 Ilustrasi struktur sel surya [10]



Gambar 2.6 Susunan lapisan *solar cell* secara umum [11]

2.2.3 Klasifikasi Sel Surya

Secara sederhana klasifikasi sel surya yang ada hingga saat ini diilustrasikan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Skema klasifikasi *sel surya*

2.2.3.1 *Sel surya konvensional (silicon based)*

Sel surya berbahan dasar silikon adalah sel surya komersil pertama yang berhasil dikembangkan. Efisiensi komersilnya saat ini sudah mencapai 15% sedangkan efisiensi lab sudah mencapai 24.7 % [12] Saat ini *silicon based solar cell* masih mendominasi hingga 86 % pasar sel surya di seluruh dunia [13].

Silikon adalah suatu material semikonduktor bervalensi empat. Keunggulan dari silikon adalah memiliki resistifitas yang sangat tinggi hingga 300,000 Ωcm , memiliki energi *band gap* yang cukup rendah, dan ketersediaan yang banyak di alam [5]. Namun, kekurangannya adalah biaya produksi *silicon wafer* yang sangat tinggi. Dikarenakan untuk mendapatkan performa sel surya yang baik dibutuhkan silikon dengan kemurnian sangat tinggi yaitu di atas 99.9 %.

Untuk mengurangi biaya produksi, maka pengembangan dilakukan dengan meminimalisir material yang digunakan. Antara lain dengan menciptakan *crystalline thin film silicon*. Selain itu telah dikembangkan metode-metode baru yang lebih mudah dan murah dalam memproduksi *semiconductor-grade silicon*.

2.2.3.2 Advance solar cell

Diperkirakan dalam 10 tahun ke depan kebutuhan akan sel surya non-silikon akan naik hingga 13 % [14]. Hal ini diakibatkan oleh kebutuhan akan sumber energi alternatif, khususnya sel surya, yang mempunyai efisiensi tinggi, harga yang lebih murah, dan juga proses produksinya yang lebih sederhana.

Sel surya non-silikon yang sampai saat ini berhasil dikembangkan antara lain sel surya berbasis lapisan tipis atau *thin film solar cell*, sel surya organik & polimer, dan *dye-sensitized solar cell*.

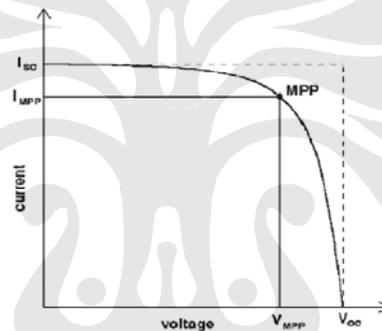
Advance solar tidak hanya pengembangan sel surya berbahan dasar non-silikon, namun juga pengembangan sel surya dengan konsep baru yang berbeda dari sel surya konvensional. Adapun beberapa alasan dan konsep dasar dikembangkannya *advance solar cell* adalah :

- Meningkatkan efisiensi, antara lain dengan cara [5] :
 - Termodinamik, besarnya energi yang diterima dan energi yang diserap
 - Detailed balance, menyeimbangkan perbedaan flux partikel

- *Reduce cost*, antara lain dengan cara :
 - Menggunakan bahan dasar yang lebih murah, sedikit, dan efisien
 - Sistem manufaktur yang lebih murah

2.2.4 Efisiensi Sel Surya

Daya listrik yang dihasilkan oleh sel surya ketika mendapat cahaya dihitung dari kemampuan untuk memproduksi tegangan ketika diberi beban dan arus melalui beban pada waktu yang sama. Hal tersebut sebagaimana direpresentasikan dalam kurva arus-tegangan (I-V) Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Kurva arus-tegangan pada sel surya [14]

Efisiensi adalah sifat terpenting yang menjadi tolak ukur performa pada sebuah perangkat sel surya. Nilai efisiensi suatu sel surya dihitung dengan besarnya daya yang dihasilkan sel surya dibagi dengan daya cahaya yang datang [5]:

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_{light}} = \frac{FF I_{sc} V_{oc}}{P_{light}} \quad (2.1)$$

Dimana V_{oc} adalah tegangan maksimum saat *open-circuit*, I_m adalah arus maksimum saat *close-circuit*, dan Titik pada kurva I-V yang menghasilkan arus dan tegangan maksimum disebut titik daya maksimum (m).

Sedangkan FF adalah *fill factor* dengan persamaan [5]:

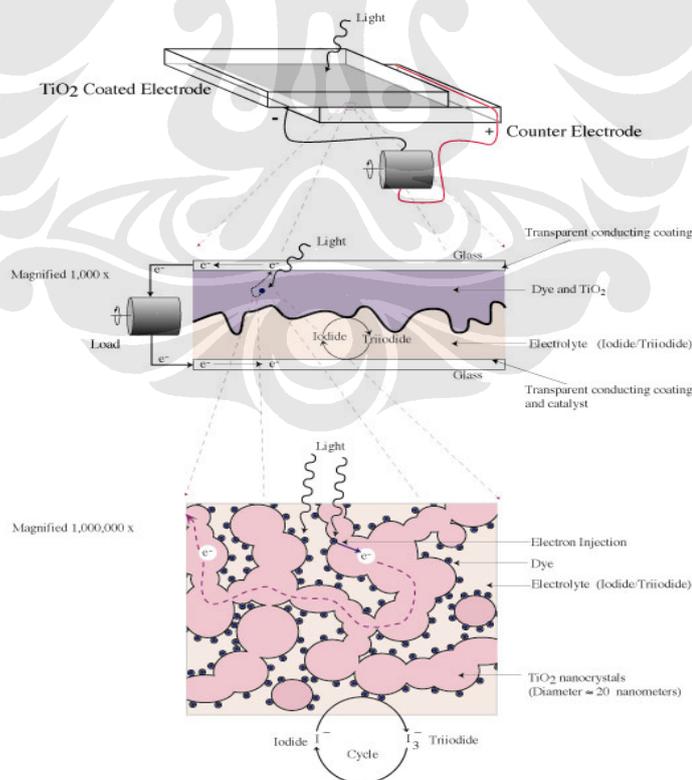
$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.2)$$

2.3 DYE SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC)

2.3.1 Prinsip Dasar dan Cara Kerja

Dye Sensitized Solar Cell (DSSC), sejak pertama kali ditemukan oleh Professor Michael Grätzel pada tahun 1991. Berbeda dengan prinsip kerja *solar cell* konvensional (*inorganic solar cell*), DSSC mengkonversi energi cahaya ke listrik dalam skala molecular. Prinsip kerjanya berdasarkan proses *photoelektrokemikal*. Dengan kata lain menggunakan prinsip fotosintesis atau elektrokimia sederhana [16].

Umumnya digunakan *titanium oxide nanocrystalline porous* sebagai active layer yang menyerap energi cahaya. Monomolekular layer dari *sensitizing dye* berfungsi sebagai penyerap spektrum cahaya. Hal ini sebagaimana diilustrasikan oleh Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Ilustrasi struktur molekular TiO₂ nanopartikel pada DSSC [15]

DSSC merupakan salah satu jenis dari *exitonic solar cell*, dimana ketika layer oksida menangkap foton cahaya akan menghasilkan *exiton* yang merupakan ikatan kuat dari pasangan *elektron-hole*. Adapun mekanisme dari konversi energi cahaya (foton) menjadi energi listrik (elektron) pada DSSC adalah sebagai berikut [17]:

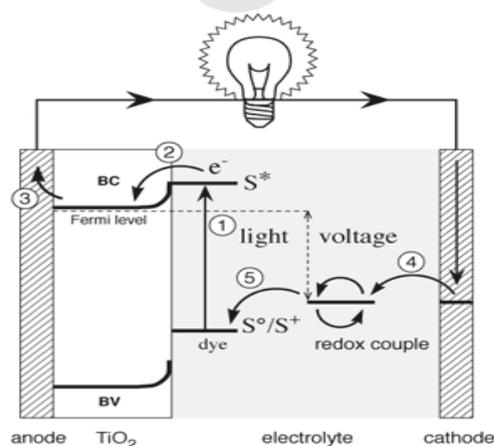
1. Sensitizer menyerap photon dan elektron dari S° (*ground state*) menuju level energi (tereksitasi) yang lebih tinggi S^*



2. Penginjeksian elektron yang tereksitasi ke *conduction band* semikonduktor terjadi dalam waktu *femtosecond*. Pada tahap ini molekul dye teroksidasi menjadi S^+
3. Elektron bergerak melalui poros TiO_2 layer ke daerah konduktif dan mencapai counter elektrode.
4. Akibat adanya katalis pada *counter* elektroda Elektron kemudian ditransfer dari elektrolit triiodida ke *yield* dari iodida membentuk elektron *hole* (I_3^-).
5. Iodida akan mereduksi S^+ ke bentuk awal S° .



Mekanisme transfer elektron tersebut sebagaimana yang ditunjukkan oleh gambar 2.10.



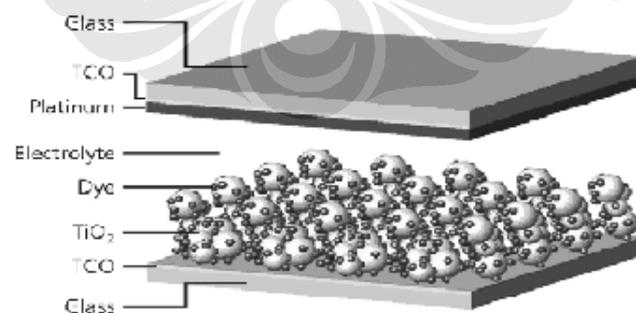
Gambar 2.10 Skema mekanisme transfer elektron pada DSSC[17]

2.3.2 Struktur DSSC

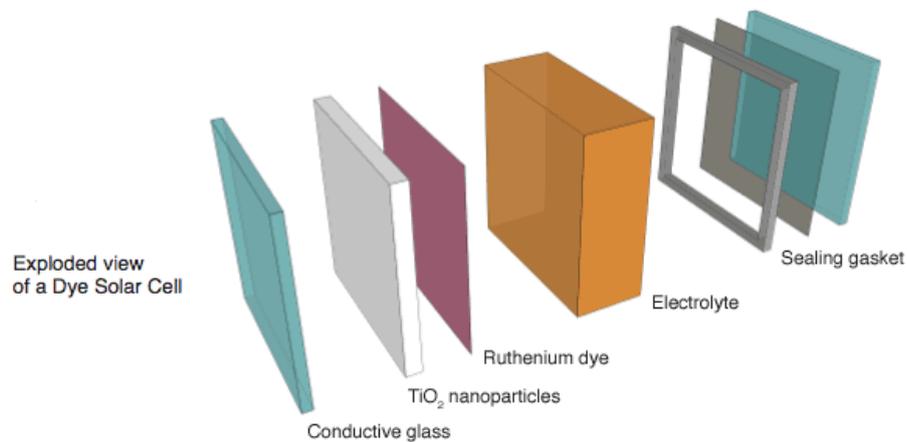
DSSC pertama kali ditemukan oleh Professor Michael Grätzel pada tahun 1991 dan dipatenkan dengan nama Grätzel *cell*. DSSC merupakan suatu perangkat sel surya yang tersusun dari sepasang elektroda dan *counter* elektroda. Elektroda terbuat dari substrat kaca konduktif, yang telah dilapisi *transparent conductive oxide* (TCO), umumnya digunakan SnO₂.

Pada elektroda dilapisi oleh layer oksida nanopartikel yang dilapisi oleh molekul *dye* (zat pewarna) sensitasi. Molekul *dye* berfungsi sebagai penangkap foton cahaya, sedangkan nanopartikel semikonduktor berfungsi menyerap dan meneruskan foton menjadi elektron. Pada *counter* elektroda diberi katalis, umumnya carbon atau platinum, berfungsi untuk mempercepat kinetika reaksi proses reduksi triiodide pada TCO.

Selain itu DSSC juga menggunakan media elektrolit sebagai medium transport muatan. Elektrolit yang umum digunakan pada DSSC terdiri dari iodine (I₂) dan triiodide (I₃⁻) sebagai pasangan redoks dalam pelarut. Skematis susunan *sandwich layer* dari DSSC diilustrasikan pada Gambar 2.11 dan Gambar 2.12.



Gambar 2.11 Struktur DSSC [18]



Gambar 2.12 Susunan *sandwich layer* dari DSSC [19]

2.4 MATERIAL DSSC

2.4.1 Substrat DSSC

Substrat yang umum digunakan pada DSSC yaitu jenis TCO (*Transparent Conductive Oxide*), merupakan kaca transparan konduktif yang dapat mengalirkan muatan. Material substrat berfungsi sebagai badan dari sel surya dimana layer oksida dan *counter electrode* karbon atau platina akan didekomposisikan.

Umumnya lapisan konduktif TCO terbuat dari lapisan tipis tin oksida (SnO_2) yang diberi *dopant fluorine* (*fluorine tin oxied* atau FTO) atau indium (*indium tin oxide* atau ITO). Hal ini dikarenakan dalam proses *sintering* layer oksida pada substrat di suhu 400-500°C, material-material tersebut memiliki konduktifitas yang baik dan tidak mengalami *defect* atau cacat pada rentang temperatur tersebut [14].

Jika kaca konduktif komersil seperti FTO dan ITO tidak tersedia maka kaca preparat (*soda lime*) biasa dapat digunakan dengan mendekomposisikan layer konduktif SnO_2 yang diberi *dopant Antimony* (Sb). Caranya dengan menyemprotkan secara berlapis-lapis larutan tin oksida ke permukaan kaca preparat yang telah dipanaskan pada temperatur 450-550°C [16].

2.4.2 Layer Oksida Nanopori DSSC

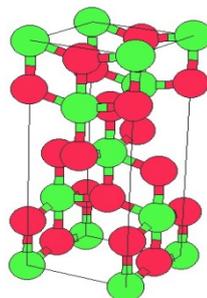
Performa dari kemampuan suatu DSSC dalam mengkonversi energi cahaya menjadi energi listrik sangat ditentukan oleh layer oksida yang digunakan. Penggunaan oksida semikonduktor dalam fotoelektrokimia dikarenakan kestabilannya menghadapi fotokorosi [20]. Selain itu lebar pita energinya yang besar ($> 3\text{eV}$) dibutuhkan untuk transparansi semikonduktor pada sebagian besar spektrum cahaya matahari, sehingga foton cahaya yang terserap pun lebih banyak [14].

Struktur nanopori dalam layer oksida DSSC sangat mempengaruhi kemampuannya dalam menyerap cahaya. Hal ini dikarenakan struktur nanopori mempunyai karakteristik luas permukaan yang tinggi. Dengan demikian *dye* yang teradsorpsi semakin banyak sehingga kinerja sistem pun lebih maksimal.

Layer semikonduktor yang paling sering digunakan pada DSSC adalah TiO_2 nanopartikel. Selain itu material-material lain yang juga dapat digunakan untuk layer oksida DSSC antara lain ZnO , CdSe , CdS , WO_3 , Fe_2O_3 , SnO_2 , Nb_2O_5 , dan Ta_2O_5 [14].

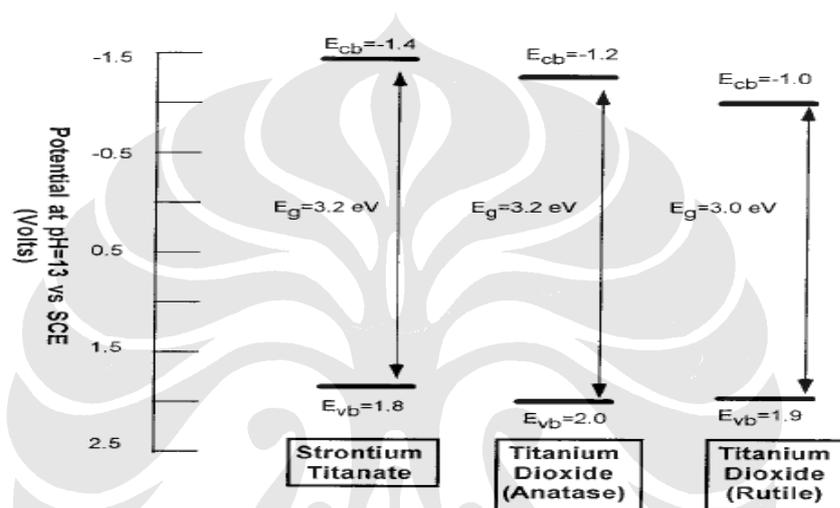
2.4.2.1 Titanium Dioksida (TiO_2)

Titanium dioxide yang juga dikenal dengan *titanium(IV) oxide* atau titania adalah bentuk dari oksida alami titanium. Di alam umumnya TiO_2 mempunyai tiga fasa yaitu *rutile*, *anatase*, dan *brookite* [21]. Struktur kristal TiO_2 *anatase* ditunjukkan pada Gambar 2.13



Gambar 2.13 Struktur kristal TiO_2 *anatase* [22]

Pada aplikasi DSSC umumnya digunakan TiO_2 fasa *anastase*. Hal ini dikarenakan pada fasa tersebut TiO_2 memiliki sifat fotoaktif yang tinggi, antara lain *photovoltaic* dan *photocatalytic*. Hal ini dikarenakan fasa *rutile* memiliki energi level lebih tinggi dibandingkan fasa TiO_2 lainnya. Fasa *rutile* memiliki pita valensi yang rendah dan *band gap* yang lebih lebar. Hal ini sebagaimana ditunjukkan Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Perbandingan pita energi berbagai fasa TiO_2 [22]

Untuk aplikasi DSSC digunakan struktur nanopori TiO_2 , dikarenakan luas permukaan yang tinggi dapat meningkatkan daya serap TiO_2 terhadap molekul *dye*. Hal ini selanjutnya akan meningkatkan daya serap foton oleh DSSC.

Hingga saat ini TiO_2 masih merupakan layer oksida yang paling sering digunakan dalam aplikasi DSSC karena efisiensinya yang belum tertandingi oleh layer oksida semikonduktor lainnya. Hal ini salah satunya disebabkan oleh nilai *band gap* dari TiO_2 (3.2eV) berada pada rentang panjang gelombang dari sinar UV. Sehingga efektifitas penyerapan sinar matahari juga akan lebih baik. Selain itu kelebihan TiO_2 adalah harganya yang relatif lebih murah dibandingkan material

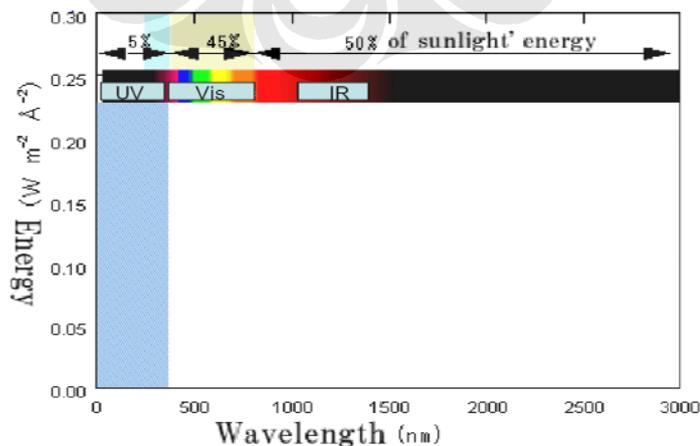
semikonduktor lain. Beberapa hasil penelitian skala lab terhadap efisiensi DSSC TiO₂ dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Efisiensi DSSC TiO₂ dengan berbagai macam *dye* [4]

Semi-conductor	Dye	η (%)	area (cm ²)	illumination (mW/cm ²)	reference
TiO ₂	?	11	0.25	100 (AM1.5)	Green 2001
TiO ₂	Black Dye	10.4	?	100 (AM1.5)	Grätzel 2000
TiO ₂	N3	10.0	0.3	96 (AM1.5)	Nazeeruddin et al. 1993
TiO ₂	N719 ²²	9.2	1.5	? (AM1.5)	Deb et al. 1998
TiO ₂	RuL ₂ (μ - (CN)Ru(CN)L'' ₂) ₂	7.1	0.5	75 (AM1.5)	O'Regan & Grätzel 1991
TiO ₂	N3	6	1	100 (ELH lamp)	Hagfeldt et al. 1994
TiO ₂	A Ru -phenantroline derivative	7.3		11.5 (ELH lamp)	
TiO ₂	A Ru -phenantroline derivative	6.1	0.44	100 (AM 1.5)	Yanagida et al. 2000
TiO ₂	a coumarin derivative	5.6	?	100 (AM1.5)	Hara et al. 2001a
TiO ₂	Cu-2- α -oxymesoisochlorin	2.6	0.5	100 ("white light")	Kay & Grätzel 1993
TiO ₂	A natural cyanin-dye	0.56	0.9	100 (AM1.5)	Cherepy et al. 1997

L = 2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylic
L'' = 2,2'-bipyridine

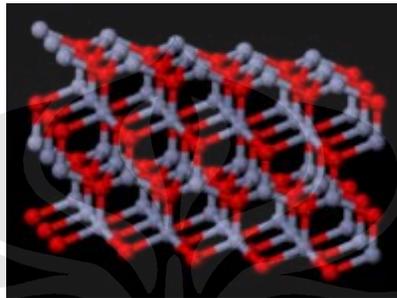
Namun, kelemahan dari TiO₂ adalah kecilnya daya rentang dari spektrum cahaya matahari yang diserap [22]. TiO₂ hanya mampu menyerap 5 % dari seluruh spektrum cahaya matahari yaitu pada spektrum sinar UV. Sedangkan 45 % spektrum cahaya tampak dan 50 % spektrum *infra red* tidak dapat diserap oleh TiO₂, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.15. Selain itu, pada umumnya proses sintesis nanopartikel dari TiO₂ cukup rumit dan mahal.



Gambar 2.15 Spektrum cahaya matahari

2.4.2.2 Zinc Oxide (ZnO)

Di alam ZnO berbentuk mineral *zincite*. ZnO hampir tidak larut dalam air namun larut dalam basa dan asam. Pada struktur kristal, ZnO mempunyai sifat *piezoelectric* dan *thermocromic* [23]. Struktur kristal ZnO diperlihatkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16. Struktur kristal ZnO [23]

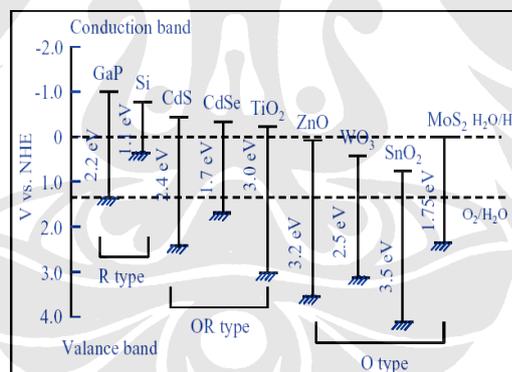
ZnO adalah material semikonduktor dengan *band gap* sekitar 3.37 eV pada temperatur kamar. Sebagian besar ZnO mempunyai karakterisasi *n-type* semikonduktor, bahkan tanpa adanya *dopant* [23]. Hal ini dikarenakan adanya cacat kristal alami ZnO seperti *oxygen excess*, dan atom interstisi dari *zinc*. Sifat inilah yang menjadi dasar aplikasi ZnO dalam teknologi *thin film* antara lain adalah penggunaan ZnO sebagai TCO dan *thin film solar cell*.

Beberapa penelitian pada skala lab telah dilakukan untuk penggunaan ZnO sebagai alternatif material pengganti TiO₂ nanopartikel. Walaupun secara umum efektifitas dari layer oksida TiO₂ nano partikel masih belum dapat tertandingi. Namun, dewasa ini ZnO mulai dijadikan alternatif utama pengganti TiO₂ nanopartikel khususnya untuk aplikasi pada *exitonic solar cell* seperti *organic solar cell* dan DSSC. Hal ini dikarenakan ZnO memiliki banyak kelebihan dan potensi yang tidak dimiliki semikonduktor lainnya. Adapun beberapa hasil lab tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.2

Semi-conductor	Dye	η (%)	area (cm ²)	illumination (mW/cm ²)	reference
SnO ₂ /ZnO	N3	8 15	1.9	90 ("direct sunlight") 10 ("diffuse daylight")	Tennakone et al. 1999
ZnO	mercurochrome	2.5 1.4	0.09 0.25	100 (AM1.5)	Hara et al. 2000a
Nb ₂ O ₅	N3	2	0.5	100 (AM1.5)	Sayama et al. 1998
ZnO	N3	2	0.25	56 ("solar simulator")	Rensmo et al. 1997

Tabel 2.2 Hasil penelitian skala lab terhadap efisiensi DSSC menggunakan layer oksida selain TiO₂ [4]

Kelebihan ZnO antara lain memiliki *band gap* yang lebar dengan level pita konduksi yang hampir sama dengan pita konduksi TiO₂, seperti yang diperlihatkan oleh Gambar 2.17 dan Tabel 2.3. Selain itu jika dibandingkan dengan TiO₂, nano struktur dari ZnO dapat disintesis dengan sangat banyak metode, khususnya untuk *vertically aligned nano structure* [27].



Gambar 2.17 Perbandingan pita energi dari berbagai semikonduktor [22]

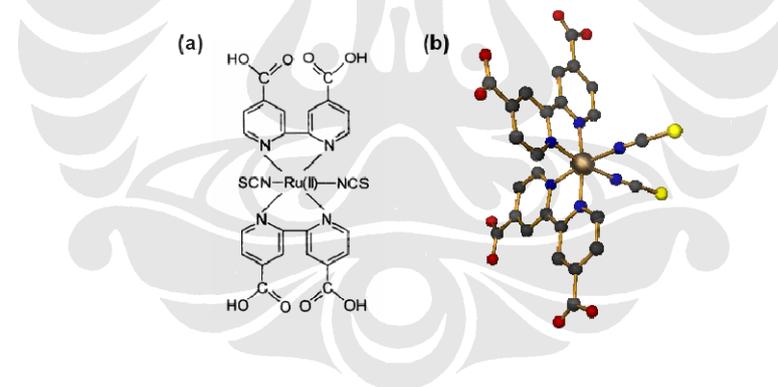
Tabel 2.3 Perbandingan *band gap* dari berbagai semikonduktor [22]

Semi conductor	VB vs NHE (eV)	Band gap (eV)	Band gap wavelength (nm)
TiO ₂	+3.1	3.2	387
SnO ₂	+4.1	3.9	318
ZnO	+3.0	3.2	387
WO ₃	+3.0	2.8	443

Penyebab kecilnya efisiensi dari DSSC berbasis ZnO belum diketahui secara pasti, namun beberapa hasil penelitian mengatakan bahwa hal ini mungkin disebabkan oleh stabilitas permukaan oksida dan densitas permukaan. Selain itu kontrol parameter proses seperti *dyes*, pH, dan waktu sensitasi juga mempengaruhi efisiensi dari DSSC berbasis ZnO [27].

2.4.3 Zat Pewarna (*dyes*)

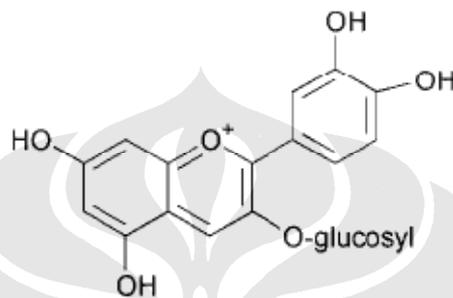
Zat pewarna pada layer oksida DSSC berfungsi untuk menangkap foton cahaya. Selanjutnya foton tersebut akan diabsorpsi ke dalam nanopartikel TiO₂. Pada Grätzel *cell*, zat pewarna yang umumnya digunakan dan mencapai efisiensi paling tinggi yaitu jenis *ruthenium complex*. Struktur *ruthenium complex* diperlihatkan pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 a) Struktur formula *ruthenium dye*, dan b) Struktur molekular *red ruthenium dye* [24]

Namun, *dye* jenis *ruthenium complex* cukup sulit untuk disintesis dan berharga mahal. Dewasa ini telah dikembangkan DSSC dengan zat pewarna organik yang murah dan mudah didapat yaitu, dengan menggunakan unsur pewarna alami (*Flavonoids*) dari buah-buahan, bunga, kayu dan bahan organik lainnya. Flavonoids berfungsi sebagai proteksi terhadap sinar UV [16].

Falvonoids yang umum digunakan pada DSSC adalah yang memiliki kandungan *antocyanin*. *Antocyanin* umum didapat pada buah-buahan, bunga, dan tumbuhan berwarna merah atau keungu-unguan. Salah satu pigmen *cyanin* yang memegang peranan penting dalam proses absorpsi cahaya yaitu *cyanidin 3-O-β-glucoside*, struktur kimianya ditunjukkan pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Struktur kimia *antocyanin dye* [14]

2.4.4 Elektrolit DSSC

Elektrolit pada DSSC berfungsi sebagai penghasil reaksi redoks dalam sistem *photoelectrochemical*. Elektrolit yang digunakan pada DSSC terdiri dari pasangan iodine (I) dan triiodide (I³⁻) sebagai redoks dalam pelarut. Adapun beberapa karakteristik elektrolit yang ideal digunakan pada DSSC adalah [14,25] :

1. Potensial redoksnnya secara termodinamika berlangsung sesuai dengan potensial redoks dari dye untuk tegangan sel yang maksimal.
2. Tingginya kelarutan terhadap pelarut untuk mendukung konsentrasi yang tinggi dari muatan pada elektrolit.
3. Pelarut mempunyai koefisien difusi yang tinggi untuk transportasi massa yang efisien.
4. Tidak adanya karakteristik spektral pada daerah cahaya tampak untuk menghindari absorpsi cahaya datang pada elektrolit.
5. Kestabilan yang tinggi baik dalam bentuk tereduksi maupun teroksidasi.

6. Mempunyai reversibilitas tinggi.
7. Inert terhadap komponen lain pada DSSC.

2.4.5 Katalis Counter Elektroda

Katalis dibutuhkan untuk mempercepat kinetika reaksi proses reduksi triiodide pada TCO. Umumnya digunakan platina sebagai katalis dalam berbagai aplikasi dikarenakan efisiensi katalitiknya yang tinggi [14]. Pendekomposisi platina pada TCO dapat dilakukan dengan berbagai metoda antara lain elektrokimia, *sputtering*, *spin coating*, atau *pyrolysis*.

Namun, platina merupakan material yang mahal. Sebagai alternatif, Kay & Grätzel mengembangkan desain DSSC menggunakan counter-elektroda karbon [26]. Karbon digunakan karena memiliki luas permukaan yang tinggi, sehingga keaktifannya dalam reduksi triiodida dapat menyerupai platina.

Untuk mendapatkan *coating* karbon yang lebih tahan lama dapat dihasilkan dengan melakukan *anneal* karbon *counter* elektroda pada suhu 450°C untuk beberapa menit [16].