

BAB 2 TEORI PENUNJANG

2.1 Photon

Photon merupakan partikel dari cahaya yang mengakibatkan radiasi elektromagnetik. Photon identik dengan panjang gelombang (λ) yang menentukan spektrum dari gelombang elektromagnetik, diantaranya sinar gamma, sinar-X, cahaya ultraviolet, cahaya tampak, inframerah, *microwaves*, dan gelombang radio. Partikel photon tidak memiliki massa seperti elektron, sehingga dapat merambat dengan kecepatan cahaya termasuk dalam ruang hampa. Photon juga memiliki karakteristik seperti gelombang, seperti dapat dipantulkan oleh lensa, dan dapat saling menghilangkan apabila terjadi interferensi gelombang akibat pemantulan. Sebagai partikel, energi photon dapat dinyatakan dengan persamaan matematis yang menunjukkan transfer energi dari sebuah partikel.

$$E_p = h \cdot \nu \quad (2.1)$$

atau
$$E_p = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.2)$$

dengan h : Konstantan Plank ($6,62 \times 10^{-34}$ J.s)

ν : Frekuensi (Hz)

c : Kecepatan cahaya (3×10^8 m /s)

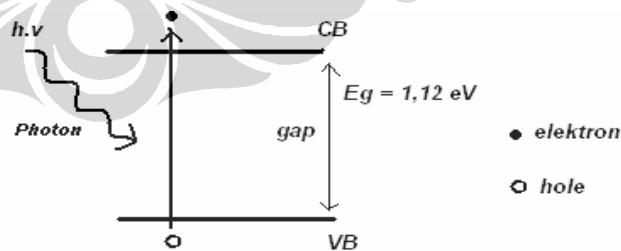
λ : Panjang gelombang (m)

Sebuah photon yang memiliki energi mampu mengeksitasi sebuah molekul seperti elektron pada *photoreceptor cell*, atau dengan efek *photovoltaic*, photon mampu mengeksitasi elektron menjadi elektron bebas yang dapat menghasilkan arus listrik. Dalam *solar cell*, efek *photovoltaic* merupakan dasar dari terbentuknya pasangan elektron – hole (*e-h pairs*) yang tentunya melibatkan photon. Ditinjau dari quantum mekanik bahwa energi yang dimiliki photon, seperti momentum dan polarisasi tidak memiliki nilai yang tetap, sehingga tidak

bisa memastikan molekul mana yang akan dieksitasi oleh photon [2]. Dalam eksperimen lebih lanjut, Einstein membuktikan bahwa cahaya itu sendiri adalah partikel yang terkumpul (*quantized*), dan photon adalah bagian partikel yang dikumpulkan tersebut [2].

2.2 Proses Absorpsi Elektron

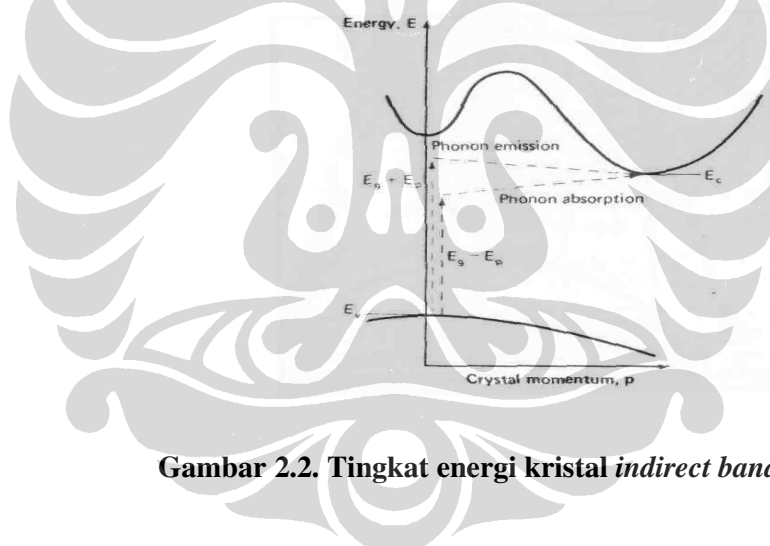
Terjadinya eksitasi elektron dari pita valensi (*valence band*) ke pita konduksi (*conduction band*) tidak terlepas dari energi yang cukup diterima elektron untuk bergerak menuju *conduction band*. Energi yang diterima elektron agar dapat tereksitasi bisa berasal dari pengaruh medan listrik yang diberikan dari luar atau berasal dari photon yang datang dengan besar energi tertentu. Pada penulisan ini, lebih dibahas proses absorpsi elektron akibat elektron menerima energi dari photon yang datang. Eksitasi elektron yang melibatkan photon biasa dijumpai pada efek *photovoltaic* yang juga merupakan dasar fenomena dari *solar cell*. Dalam *solar cell*, photon yang datang akan mengeksitasi elektron pada p-n *junction*, kemudian menyebabkan timbulnya pasangan elektron – *hole* (e-h pairs). Untuk dapat mengeksitasi elektron, maka energi photon yang diserap harus lebih besar dari energi *gap* yang dimiliki oleh material tersebut. Misalkan pada bahan semikonduktor, silikon (Si) memiliki energi *gap* sebesar 1,12 eV, germanium (Ge) sebesar 0,62 eV, dll. Gambar 2.1 menunjukkan elektron tereksitasi dari V_B ke C_B pada bahan silikon (Si) akibat adanya photon yang datang.



Gambar 2.1. Proses absorpsi elektron pada bahan silikon (Si).

Elektron menerima energi dari photon yang datang, dan besar energi photon setidaknya lebih besar dari energi *gap* (E_g) pada bahan silikon tersebut, yaitu sebesar 1,12 eV. Elektron yang tereksitasi tersebut menjadi elektron bebas

(*generation*), meninggalkan *hole* pada pita valensi. Oleh karena itu pada bahan semikonduktor ekstrinsik, energi photon yang diserap mampu menghasilkan banyak elektron bebas sehingga dapat dihasilkan arus listrik. Dalam proses ekesitasi elektron yang melibatkan photon, dihasilkan juga panas (*heat*) yang timbul. Panas ini timbul karena pergerakan elektron pada pita konduksi setelah tereksitasi menuju tingkat energi terendah dari pita konduksi yang kemudian akan kembali berekombinasi pada pita valensi. Munculnya panas biasa dijumpai pada jenis material *indirect band-gap*, misalnya silikon (Si) seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2. Dalam silikon *solar cell*, fenomena munculnya panas tersebut disebut *thermalization loss* yang memiliki kerugian bagi kinerja *solar cell*. *Thermalization loss* disebabkan oleh energi photon yang diserap jauh lebih besar dari energi *gap* pada silikon *solar cell*. Energi panas tersebut ditandai dengan adanya phonon.



Gambar 2.2. Tingkat energi kristal *indirect band-gap* [3].

Tingkat energi maksimum pada pita valensi berada pada kristal momentum adalah saat $k = 0$, akan tetapi pada *indirect band gap*, energi minimum pada pita konduksi tidak berada saat k tidak nol. Inilah yang menimbulkan phonon akibat pergerakan elektron dari pita valensi ke pita konduksi membutuhkan transisi elektron ke titik minimum pada pita konduksi. Jika perpindahan elektron ke titik minimum pada pita konduksi ditandai dengan vektor k_0 , dan energi yang dibutuhkan elektron untuk berpindah adalah ϵ' , maka hubungan energi photon dengan transisi elektron tersebut adalah :

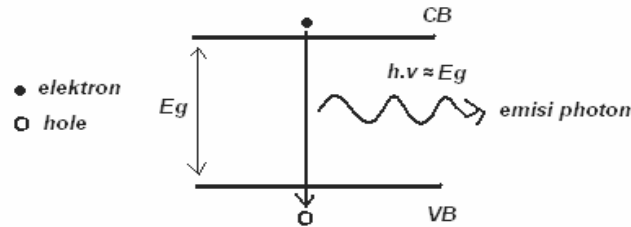
$$h \cdot \nu = \varepsilon_c - \varepsilon_v \pm \hbar \cdot k_0 \quad (2.3)$$

dimana ε_c adalah energi minimum pada pita konduksi, dan ε_v adalah energi maksimal pada pita valensi. Dalam implementasinya, banyaknya cahaya yang dapat diserap oleh *solar cell* dipengaruhi oleh intensitasnya. Dalam hal ini *photon flux* menentukan banyaknya cahaya yang dapat diserap untuk panjang gelombang tertentu. *Photon flux* dapat dinyatakan dengan jumlah *photon* dibanding terhadap unit area. Selanjutnya dari referensi [3], dijelaskan secara matematis bahwa intensitas cahaya monokromatis ditentukan juga oleh koefisien absorpsi (α). Parameter ini sangat penting dalam merancang sebuah *solar cell* karena menentukan seberapa jauh kedalaman dari permukaan *solar cell* yang dapat ditembus oleh cahaya pada panjang gelombang tertentu.

2.3 Proses *Spontaneous Emission*

Spontaneous emission adalah fenomena munculnya emisi *photon* saat elektron berekombinasi dari pita konduksi ke pita valensi. Jika proses absorpsi, elektron menerima energi agar dapat tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi, maka pada *spontaneous emission*, elektron melepas energi minimal sebesar energi *gap*, kemudian energi yang dilepaskan tersebut mengemisikan *photon* dengan besar yang sama dengan energi *gap*. Besarnya energi *gap* mempengaruhi panjang gelombang dari *photon* yang diemisikan, dalam aplikasi laser semikonduktor, biasanya jenis material yang digunakan adalah *direct band gap* dengan energi *gap* yang sudah ditentukan untuk menghasilkan spektrum cahaya yang diinginkan. Dalam penulisan ini, konsep *up/down-conversion* diilhami dari fenomena tersebut untuk mengkonversi energi *photon* yang diterima dari cahaya matahari dengan memaksimalkan panjang gelombang yang sesuai dengan karakteristik *solar cell*. Dalam divais *converter* terdapat *sub-band gap* atau *intermediate level* (IL) dalam *band gap*, sehingga emisi *photon* yang dihasilkan dapat disesuaikan besarnya terhadap tingkat energi IL tersebut. Pada akhirnya spektrum cahaya dan panjang gelombang *photon* dapat disesuaikan. Gambar 2.3 menunjukkan proses

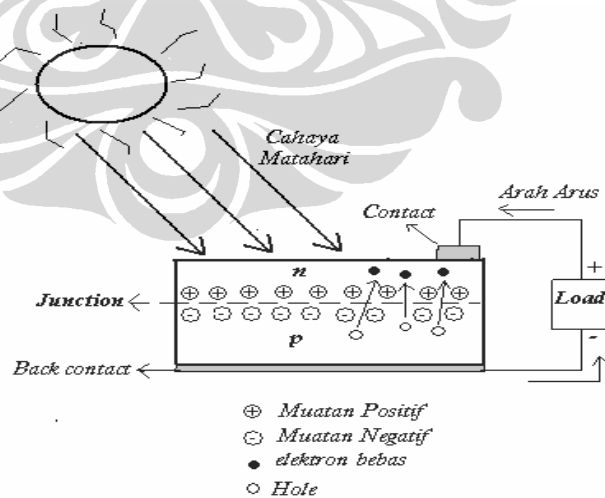
spontaneous emission yang menghasilkan photon dengan energi sama dengan energi gap (E_g)



Gambar 2.3. Rekombinasi elektron melibatkan emisi photon dengan energi sebesar E_g .

2.4 Efek *Photovoltaic*

Photovoltaic adalah sebuah divais yang mampu menghasilkan listrik dari cahaya matahari. Dalam hal ini divais yang dimaksud adalah *solar cell*. Sedangkan efek *photovoltaic* yaitu proses bagaimana dihasilkannya listrik oleh *solar cell* setelah menyerap cahaya matahari yang terdapat photon didalamnya yang mampu mengeksitasi elektron. Photon yang diserap menghasilkan elektron bebas pada divais *solar cell*, dengan begitu timbul arus listrik. Proses terjadinya elektron bebas pada *solar cell* dapat dilihat pada Gambar 2.4.

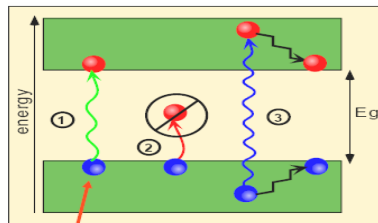


Gambar 2.4. Efek *photovoltaic* yang terjadi pada *solar cell*.

Pada dasarnya Gambar 2.4 menjelaskan proses sederhana terbentuknya elektron bebas dalam *solar cell* yang dapat menimbulkan arus listrik. Elektron – elektron bebas yang dihasilkan akan terkumpul pada *contact* di atas permukaan *solar cell*. Elektron – elektron tersebut membentuk pasangan elektron – hole (*e-h pairs*) sesaat setelah terbentuknya elektron bebas. Biasanya *contact* ini terbuat dari bahan metal atau aluminium (Al). Kemudian jika *solar cell* terhubung dengan beban, maka arus listrik akan timbul dan mengalir berlawanan dari arah elektron bebas tersebut. Elektron yang bergerak tadi akan kembali menuju *solar cell* melalui *back contact* yang diletakan dibagian bawah *solar cell*. Fungsinya sebagai penghubung agar elektron dapat berekombinasi kembali dan nantinya akan tereksitasi lagi jika menyerap photon dari cahaya matahari, sehingga terbentuk jaringan arus listrik.

2.5 Rugi – rugi Pada Proses *Generation*.

Dalam proses menghasilkan elektron bebas (*generations*) dengan menyerap energi photon dari matahari, ditemukan juga rugi – rugi yang timbul berupa *transmission* dan *thermalization loss*. Rugi – rugi tersebut mempengaruhi efisiensi dari *solar cell*. *Transmission loss* timbul akibat energi photon yang diserap kurang atau lebih kecil dibanding *band gap* yang terdapat dalam divais *solar cell*. Akibatnya *e-h pairs* yang terbentuk tidak maksimal, dan akan mempengaruhi dari I_{sc} (*short-circuit current*), dimana I_{sc} berperan dalam menentukan efisiensi *solar cell*. Untuk lebih jelas akan dibahas di sub – bab berikutnya. Kemudian *thermalization loss* timbul akibat energi photon yang diserap jauh lebih besar dari *band gap* yang terdapat dalam divais *solar cell*. Akibatnya akan timbul panas di dalam *solar cell*. Kenaikan temperatur akibat panas pada *solar cell* sebaiknya dihindari, karena kenaikan temperatur akan menurunkan V_{oc} (*open-circuit voltage*). V_{oc} juga merupakan salah satu parameter penting dalam *solar cell* untuk menentukan besar kecilnya efisiensi yang dihasilkan. Mekanisme terbentuknya rugi – rugi tersebut dapat dilihat seperti pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Mekanisme timbulnya rugi-rugi saat proses absorpsi [7].

Dari Gambar 2.5, proses (2) menunjukkan mekanisme timbulnya *transmission loss*, dan proses (3) menunjukkan mekanisme timbulnya *thermalization loss* yang akan menaikkan temperatur karena panas. Munculnya panas akibat adanya phonon, sebagai mana yang telah dijelaskan pada sub-bab 2.2.

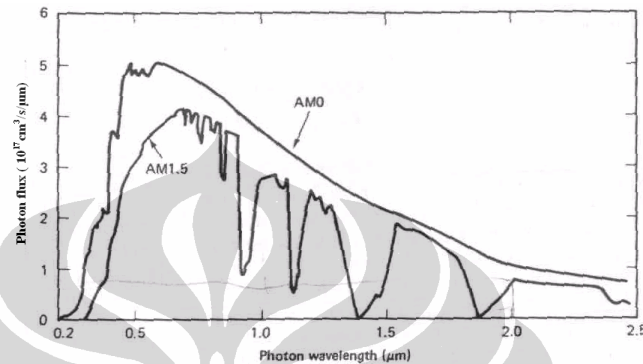
2.6 Efisiensi Pada *Solar Cell*

Dalam menentukan efisiensi pada sebuah *solar cell* terdapat beberapa parameter utama yang perlu diketahui dan pengaruhnya terhadap kinerja *solar cell* tersebut. Parameter tersebut diantaranya *open – circuit voltage* (V_{oc}), *short circuit current* (I_{sc}), dan *fill factor* (FF). Perlu diketahui bahwa nilai V_{oc} dibanding terhadap I_{sc} adalah berbanding terbalik, namun besar kecilnya nilai dari kedua parameter tersebut mempengaruhi besarnya efisiensi yang mungkin untuk didapat. Oleh karena itu dalam perancangan *solar cell* perlu diperhatikan nilai dari V_{oc} dan I_{sc} yang tepat sehingga mampu memberikan efisiensi yang maksimal.

2.6.1 Parameter *Short – Circuit Current* (I_{sc})

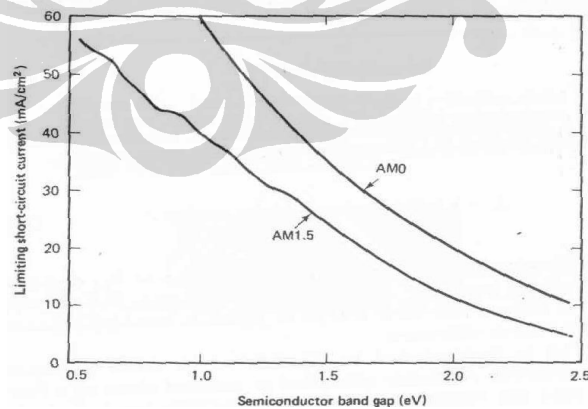
Secara ideal I_{sc} adalah menentukan seberapa besar kemampuan cahaya untuk menghasilkan arus listrik dari terbentuknya *e-h pairs* pada sebuah *solar cell*. Kondisi idealnya adalah ketika tiap photon datang yang diserap dengan energi lebih besar dari *band gap* menghasilkan sebuah elektron bebas yang mengalir pada rangkaian yang terhubung pada *solar cell* [3]. Dapat dikatakan bahwa jenis material semikonduktor yang digunakan pada *solar cell* memberikan andil dalam menentukan kemampuan menghasilkan I_{sc} yang maksimal. Panjang

gelombang dari pofoton yang diserap menentukan tingkat photon *flux* yang diperoleh, karena distribusi energi yang dipancarkan cahaya matahari juga bergantung pada panjang gelombang photon. Jika dibandingkan antara photon *flux* dengan tiap – tiap panjang gelombang, maka Gambar 2.6 menunjukkan grafik perbandingan photon *flux* terhadap panjang gelombang photon..



Gambar 2.6. Perbandingan photon *flux* cahaya matahari dengan panjang gelombang (λ) tertentu berdasarkan distribusi energi pada saat AM 0 dan AM 1.5 [3].

Atau bisa dibandingkan juga antara besarnya I_{sc} dengan energi *gap* pada *solar cell*. Untuk menentukan maksimum I_{sc} yang mungkin untuk diperoleh, maka dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Batasan nilai *short-circuit* (I_{sc}) terhadap band gap pada AM 0 dan AM 1.5 [3].

Dari Gambar 2.7 bisa dinyatakan bahwa densitas dari I_{sc} meningkat seiring dengan bertambahnya energi *gap* pada semikonduktor. Untuk silikon (Si) dengan energi *gap* 1,12 eV, maka bisa diprediksikan batasan I_{sc} maksimum yang dapat diperoleh, mengingat jika I_{sc} bertambah maka V_{oc} menurun.

2.6.2 Parameter *Open – Circuit Voltage* (V_{oc})

Tegangan *open – circuit* (V_{oc}) ditentukan oleh karakteristik dari semikonduktor yang bergantung pada parameter arus – saturasi (I_0). Pada kondisi ideal p – n *junction cell*, V_{oc} dinyatakan dengan :

$$V_{oc} = \frac{k.T}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (2.4)$$

dengan : I_L adalah besarnya arus yang dihasilkan oleh cahaya.

T adalah temperatur ($^{\circ}K$)

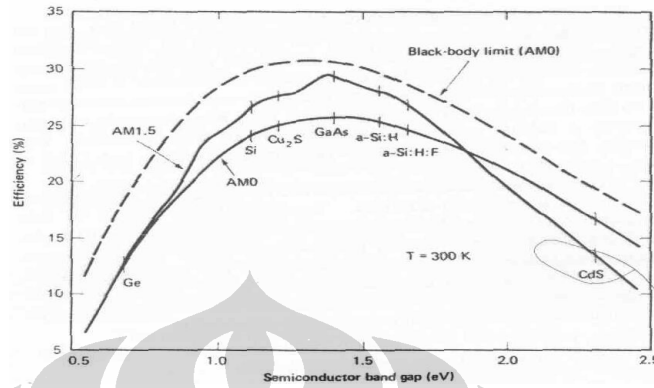
k adalah konstanta Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)

Dalam hal ini untuk mendapatkan nilai V_{oc} maksimal yang mungkin diperoleh adalah dengan mendapatkan I_0 sekecil mungkin. Kalkulasi yang telah dilakukan menyatakan untuk silikon (Si) maksimum V_{oc} yang dapat dihasilkan sekitar 700 mV [3]. Pada pembahasan mengenai karakteristik material semikonduktor, I_0 memiliki hubungan terhadap besar energi *gap* (E_g) pada material semikonduktor sebagaimana yang diuraikan pada Persamaan (2.5)

$$I_0 = 1,5 \times 10^5 \exp\left(-\frac{E_g}{k.T}\right) \quad (2.5)$$

Hubungan yang dinyatakan Persamaan (2.5) memberikan perbandingan jika nilai maksimum V_{oc} menurun seiring berkurangnya energi *gap*. Hal ini yang menyebabkan V_{oc} berbanding terbalik terhadap I_{sc} . Diketahui bahwa V_{oc} , I_{sc} , dan FF berbanding lurus terhadap efisiensi *solar cell*. Oleh karena itu perlu menentukan besar energi *gap* untuk mendapatkan efisiensi yang maksimal.

Gambar 2.8 menunjukkan efisiensi yang dapat diperoleh dibandingkan terhadap energi *gap* dari beberapa macam material *cell*.

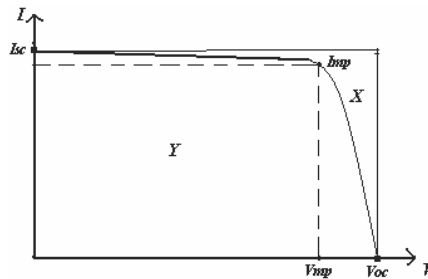


Gambar 2.8. Efisiensi *solar cell* yang dapat diperoleh bergantung dari beberapa jenis material berbeda yang digunakan [3].

Jika dilihat dari Gambar 2.8 material silikon (Si) dengan energi *gap* 1,12 eV memiliki efisiensi dibawah efisiensi maksimal, namun efisiensi tersebut masih relatif tinggi. Material GaAs memiliki efisiensi paling dekat maksimum, karena karakteristik GaAs yang merupakan semikonduktor *direct band-gap*.

2.6.3 Parameter *Fill Factor* (FF)

Fill factor merupakan parameter untuk menentukan seberapa kotak bentuk grafik keluaan dari karakteristik *solar cell* antara I_{sc} dan V_{oc} . Untuk jenis *cell* yang cukup efisiensi, FF bernilai dalam kisaran 0,7 sampai 0,85 [3]. Gambar 2.9 menunjukkan grafik karakteristik keluaan pada *solar cell* dengan *fill factor* cukup tinggi.



Gambar 2.9. Grafik keluaan *solar cell* untuk menentukan *Fill Factor*.

Dari Gambar 2.9 menunjukkan bahwa *fill factor* ditentukan dengan membandingkan nilai pada titik – titik I_{mp} dan V_{mp} . Titik – titik tersebut menandakan nilai oprasional dari V_{oc} dan I_{sc} untuk mendapatkan nilai optimum masing – masing parameter. Maka FF dapat dinyatakan dengan Persamaan (2.6).

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2.6)$$

Atau dengan persepsi lain, FF dapat juga ditentukan oleh perbandingan luas daerah Y dibanding luas daerah X.

2.7. Efisiensi Kuantum

Efisiensi kuantum / *Quantum Efficiency* (QE) dapat didefinisikan sebagai jumlah atau besaran sensitifitas pada suatu devais terhadap adanya cahaya (photon) yang mengenai permukaan *photoreactive* sehingga bisa menghasilkan pasangan elektron-hole [4], Sensitifitas tersebut dapat disebut sebagai photosensitive [4]. QE biasa diukur berdasarkan panjang gelombang photon yang berbeda – beda untuk menentukan karakteristik efisiensi suatu devais. Devais yang dimaksud seperti *photographic film* atau *charge-coupled device* (CCD) yang memiliki QE masing – masing 10 % dan CCD sebesar 90 % untuk panjang gelombang tertentu [4]. *Quantum efficiency* terkadang disebut IPCE atau *Incident-Photon-to-electron Conversion Efficiency* [5]. Dalam hubungannya pada penulisan Tesis ini, menentukan efisiensi kuantum pada divais *solar cell* adalah sangat penting, karena memberikan indikasi seberapa besar arus dalam *solar cell* saat terjadi proses iluminasi pada panjang gelombang tertentu. *Quantum efficienci* dapat dilihat sebagai *collection probability* mengacu pada proses *generation* dalam sebuah spektrum panjang gelombang. Diketahui bahwa tidak semua photon dalam sebuah spektrum panjang gelombang mampu menghasilkan e-h *pairs*. Namun jika semua photon pada panjang gelombang tersebut dapat diserap dan menghasilkan e-h *pairs* atau *minority carriers* (elektron pada daerah tipe-p), maka perbandingan QE bernilai 1 [5]. Sedangkan Nilai QE untuk energi photon dibawah *band gap* adalah nol.

Ada dua tipe *quantum efficiency* dari *solar cell* yang sering dipertimbangkan. Selain QE ada juga *internal quantum efficiency* (IQE) yang dapat didefinisikan sebagai perbandingan jumlah *charge carrier* yang dikoleksi oleh *solar cell* terhadap jumlah *photon* pada energi tertentu yang disinari pada *solar cell* dari luar dan tidak terpantul ataupun tidak tembus melewati *cell* [5]. Nilai IQE juga cenderung lebih besar dibanding EQE [5]. Kecilnya nilai IQE mengindikasikan lapisan aktif pada *solar cell* tidak dapat berfungsi dengan baik terhadap *photon* [5]. Sedangkan kecilnya nilai EQE biasanya diindikasikan langsung pada banyaknya cahaya yang telah terefleksikan [5]. Untuk mengukur IQE biasanya diukur dulu EQE pada divais *solar cell*, kemudian diukur *transmission* dan refleksi pada divais tersebut [5].

Pada *Solar cell* biasa diukur sebagai eksternal efisiensi kuantum / *external quantum efficiency* (EQE), yaitu sebagai jumlah *charge carrier* yang dikoleksi pada *solar cell* berbanding pada jumlah *photon* yang datang [4]. Secara umum efisiensi didapat dengan perbandingan keluaran terhadap masukan (efisiensi = output/input). Untuk EQE pada *solar cell* dapat dinyatakan dalam Persamaan (2.7) yang bergantung pada absorpsi cahaya dan *collection charge* [4].

$$EQE = \frac{\text{elektron/det}}{\text{photon/det}} \quad (2.7)$$

Divais *solar cell* yang baik diharapkan memiliki EQE sebesar mungkin, namun *charge recombination* pada *solar cell* dapat mengurangi nilai EQE.

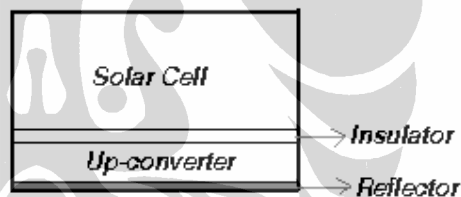
2.8 Konsep *Up / Down-Conversion*

Inti dari permasalahan yang dibahas pada penulisan ini adalah bagaimana mengurangi rugi – rugi yang muncul dalam kinerja *solar cell* seperti yang telah dibahas pada sub-bab sebelumnya. Konsep *up/down-conversion* diterapkan pada silikon *bifacial solar cell* untuk mengurangi rugi – rugi tersebut dengan harapan dapat meningkatkan efisiensi *solar cell*. Konsep ini telah dilakukan riset beberapa tahun terakhir karena menjanjikan perbaikan efisiensi yang cukup besar dan dapat diterapkan pada jenis *solar cell* konvensional. Sebagaimana telah dijelaskan,

konsep *up/down-conversion* ditujukan untuk mengkonversi energi photon yang diserap oleh *solar cell* agar tidak timbul *thermalization loss* dan *transmission loss*. Konsep ini diaplikasikan dalam sebuah divais *converter* semikonduktor yang bekerja sebagai lapisan *luminescence*. Secara *band-diagram* konsep ini memiliki *intermediate level* (IL) sebagai sub *ban-gap* agar mampu untuk mengkonversi energi photon baik dalam proses absorpsi elektron maupun *spontaneous emission*.

2.8.1 Penerapan Konsep *Up-Conversion*

Divais *up-converter* diterapkan pada *solar cell* dengan menambahkan divais tersebut dibagian bawah atau *rear* pada *solar cell*. Tujuannya adalah karena *up-converter* diterapkan untuk mengkonversi energi photon yang lemah menjadi lebih besar agar dapat menghasilkan *e-h pairs*. Karena photon dengan panjang gelombang besar memiliki energi yang lemah, dan *absorption depth* yang cukup dalam. Secara strukurnya, *solar cell* yang ditambahkan *up-converter* diasumsikan seperti pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Struktur *solar cell* dengan penerapan konsep *up-conversion*.

Dari berbagai referensi jurnal, untuk merancang struktur *solar cell* seperti pada Gambar 2.10 dibutuhkan kondisi temperatur ($300\text{ }^{\circ}\text{K}$) yang stabil. Untuk menjaga kondisi tersebut, diantara *solar cell* dan *up-converter* terdapat lapisan *insulator* yang diasumsikan mengisolasi secara *thermal* maupun elektrik. Untuk membuat divais *up-converter* ini masih menemui kendala, diantaranya penggunaan material yang tepat untuk didoping *rare earth* sebagai pembentuk *up-converter*. Faktor EQE dan IQE menjadi prioritas dalam membentuk material *up-converter*, karena divais ini bergantung pada seberapa efisien dapat menyerap atau mengkonversi photon dengan energi yang relatif kecil.

2.8.2 Material *Up-Converter*

Untuk memenuhi aplikasi *up-converter* pada *Si solar cell*, maka perlu dipertimbangkan beberapa karakteristik dari material yang dibutuhkan, yaitu :

- 1) Proses eksitasi memerlukan panjang gelombang yang lebih dari 1100 nm;
- 2) emisi yang dihasilkan lebih pendek dari panjang gelombang 1100 nm;
- 3) efisiensi *up-conversion* yang cukup tinggi;
- 4) transmisi cahaya dari *up-converter* yang baik.

Ada beberapa mekanisme *up-conversion* yang dapat terjadi dan memiliki efisiensi konversi berbeda-beda. Mekanisme yang memiliki efisiensi cukup tinggi adalah proses *ground-state absorption* (GSA) dan *excited state absorption* (ESA) [6]. Untuk mengetahui jangkauan panjang gelombang yang dibutuhkan saat eksitasi dan yang dihasilkan saat emisi adalah berdasarkan tingkat energi aktif pada intermediate level dan karakteristik *host material* [6], yang akan didoping untuk devais *up-converter*. Jenis material *rare earth* yang baik digunakan untuk membentuk lapisan *up-converter* adalah jenis Erbium. Material tersebut digunakan untuk mendoping beberapa jenis *rare earth* yang lainnya, sehingga memiliki karakteristik *up-converter* yang berbeda berdasarkan panjang gelombang saat absorpsi dan eksitasi. Namun ada juga beberapa material *rare earth* lainnya yang hampir sejenis digunakan sebagai doping untuk membentuk *up-converter*. Material – material tersebut biasa digunakan untuk membentuk devais optik yang dalam aplikasinya untuk laser. Tabel 2.1 menunjukkan bermacam - macam material *rare earth* yang membentuk karakteristik pada proses absorpsi dan emisi.

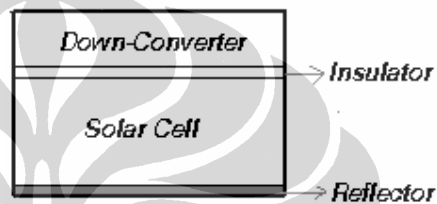
Tabel 2.1. Jenis – jenis *host materials* yang didoping *rare earth* menunjukkan karakteristik *up-converter* yang dapat dibentuk [6].

Up-converter	Absorption peak [nm]	Emission [nm]
NaYF ₄ : Yb ³⁺ , Er ³⁺	980	555, 670
Y ₂ O ₃ :Yb ³⁺ , Er ³⁺	980	670
Y ₂ O ₃ S:Yb ³⁺ , Er ³⁺	980	560, 680
Ga ₂ S ₃ -La ₂ O ₃ :Er ³⁺ , Yb ³⁺	1064	555
YF ₃ :Yb ³⁺ , Tm ³⁺	970	810, 475
NaYF ₄ :Yb ³⁺ , Tm ³⁺	980	480, 650
Y ₂ O ₃ S:Yb ³⁺ , Tm ³⁺	980	490, 660, 705
fluorohafnate glass:Yb ³⁺ , Tm ³⁺	974	544, 650, 750, 802
YVO:Yb ³⁺ , Ho ³⁺	975	550, 650
NaYF ₄ :Yb ³⁺ , Tb ³⁺	976	350, 370, 417, 455, 476, 526, 540, 645, 667
tellurite glass: Yb ³⁺ , Tb ³⁺	1064	485, 550, 590, 625, 655
BaCl ₂ :Er ³⁺ , Dy ³⁺	1300	460, 550, 670, 810
ThBr ₄ :U ⁴⁺	940, 950, 1170	689, 690
LaCl ₃ :U ³⁺	975.2	555, 681
phosphate glass:Yb ³⁺	980	500
SrCl ₂ :Tm ³⁺	1064, 1130	704, 715
CsCdBr ₃ :Ho ³⁺	909	491
YAG:Pr ³⁺	900	471, 473, 475, 476, 480, 481, 482
LiYF ₄ :Pr ³⁺	900	466, 467, 471, 474
ZrF ₄ -BaF ₂ -LaF ₃ :Pr ³⁺	930	488, 522, 539, 605, 634

Dari Tabel 2.1 dapat dilihat karakteristik *rare earth* yang dapat digunakan sebagai *up-converter*. Panjang gelombang untuk proses absorpsi sekitar 900 – 1500 nm dan saat mengemisikan foton dengan panjang gelombang berkisar antara 400 – 800 nm. Untuk saat ini jenis NaYF₄: Yb³⁺, Er³⁺ memiliki efisiensi *up-converter* yang cukup tinggi dengan eksitasi pada 980 nm dan memiliki emisi foton untuk spektrum hijau dan biru [4]. Pada Bab 4 nanti dijelaskan mengenai analisa perancangan *solar cell* yang dirancang untuk optimasi spektrum antara biru dan hijau dengan menerapkan konsep *up-conversion* yang menyesuaikan dengan karakteristik material *rare earth*.

2.8.3 Penerapan Konsep *Down - Conversion*

Penerapan *down-conversion* adalah dengan menambahkan *converter* tersebut di atas permukaan *solar cell*. Tujuannya agar *down-converter* mampu mengkonversi energi photon datang yang sangat besar menjadi photon dengan energi yang cukup untuk menghasilkan e-h *pairs*. Hal ini dimungkinkan karena photon dengan energi yang besar mempunyai panjang gelombang relatif pendek dan *absorption depth* yang rendah. Gambar 2.11 menunjukkan struktur *solar cell* dengan menerapkan konsep *down-conversion*.



Gambar 2.11. Struktur *solar cell* dengan penerapan konsep *down-conversion*.

Aplikasi *down-converter* dapat menggunakan lapisan *quantum-dots* (QDs) sebagai *converter*. QDs memiliki karakteristik menggeser panjang gelombang dari yang pendek menjadi lebih panjang. Atau dengan kata lain QDs mengkonversi energi photon yang lebih besar menjadi lebih kecil, namun tetap memenuhi syarat untuk terbentuknya e-h *pairs*. Untuk penjelasan lebih lanjut mengenai konsep dasar *up/down-converter* pada *solar cell* dibahas pada Bab 3.