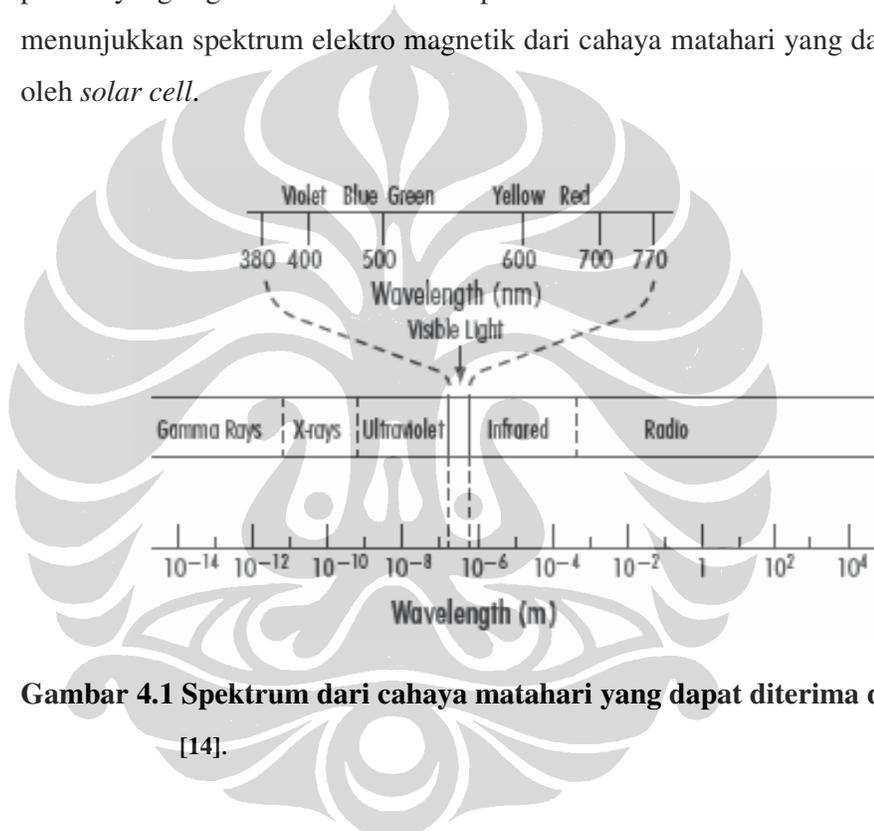


BAB 4 DISKUSI

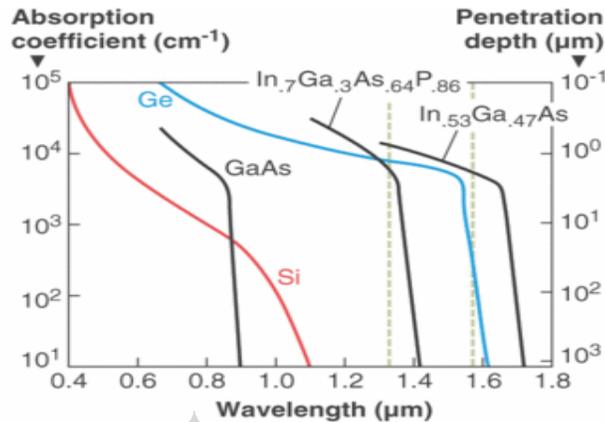
4.1 Aplikasi Up & Down – Converter Pada Solar Cell

Untuk menentukan besar kecilnya energi photon yang dikonversi oleh *converter* maka perlu diketahui spektrum cahaya matahari yang akan dikonversi. Tingkat *energi trap* atau *intermediate level* menentukan besar kecilnya energi photon yang ingin kita maksimalkan pada divais *converter* tersebut. Gambar 4.1 menunjukkan spektrum elektro magnetik dari cahaya matahari yang dapat diserap oleh *solar cell*.



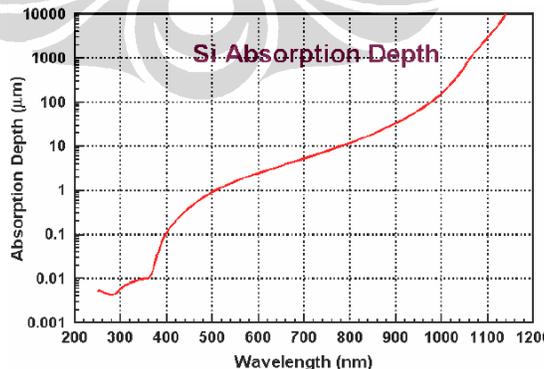
Gambar 4.1 Spektrum dari cahaya matahari yang dapat diterima di bumi
[14].

Tidak semua spektrum frekuensi tersebut dapat menghasilkan *elektron – hole pairs* atau mengeksitasi elektron untuk menghasilkan *photocurrent* pada *solar cell*. Hal tersebut disebabkan oleh desain *solar cell* yang dibuat, yaitu pada faktor kedalaman p-n *junction* yang diukur dari permukaan *solar cell*. Kedalaman p-n *junction* dipengaruhi oleh koefisien absorpsi (α) dari bahan semikonduktor yang digunakan. Sebagai contoh jika menggunakan bahan *silicon* (Si), semakin besar koefisien absorpsinya (α) maka semakin kecil panjang gelombang (λ) dari cahaya yang diserap oleh *solar cell*. Untuk lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Koefisien absorpsi dan *penetration depth* terhadap panjang gelombang pada berbagai macam jenis material semikonduktor [15].

Pada *solar cell* berbahan silikon, maka dapat dilihat jangkauan spektrum panjang gelombang berkisar antara $200 \mu\text{m} - 1200 \mu\text{m}$, atau dapat dikatakan antara ultraviolet (UV) hingga inframerah (IR). Kemudian dalam membuat aplikasi divais *up / down-converter* perlu juga dilihat hubungan spektrum panjang gelombang cahaya terhadap kemampuan absorpsi *solar cell*. Hal tersebut mempengaruhi kemampuan *solar cell* untuk menghasilkan *elektron-hole pairs*. Gambar 4.3 menunjukkan efektifitas kedalaman p-n *junction* pada *Si solar cell* agar mendapatkan *absorption depth* yang maksimal terhadap panjang gelombang cahaya yang diserap.



Gambar 4.3. Tingkat kedalaman absorpsi dari bahan Si terhadap panjang gelombang [7].

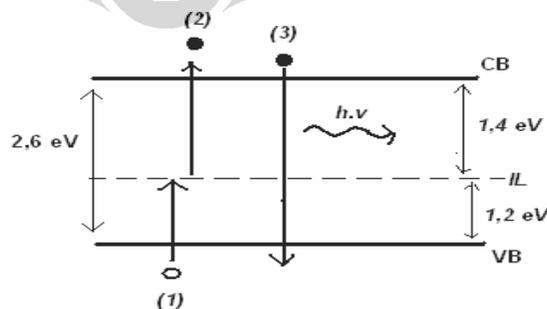
4.2 Karakteristik *Up – Converter* (UC).

Tujuan dibuat divais *up-converter* (UC) adalah mengurangi *transmission loss* akibat dampak dari kurangnya energi photon yang diserap *solar cell* terhadap besar *band gap*. Beberapa pertimbangan perlu diperhatikan untuk menentukan karakteristik *up-converter* seperti diuraikan sebagai berikut :

- 1) Mengkonversi dua buah energi photon yang lemah (kurang dari *band gap* energi) menjadi sebuah photon yang menghasilkan energi yang lebih besar sehingga mampu mengeksitasi elektron,
- 2) mengubah dua buah panjang gelombang (λ) photon yang panjang menjadi lebih pendek.

Untuk mengaplikasikan *up-converter* pada sebuah Si *solar cell*, maka perlu memperhitungkan panjang gelombang cahaya yang dikonversi dan besar energi yang diemisikan oleh photon tersebut. Jika Si *solar cell* mempunyai spesifikasi untuk spektrum cahaya tampak, maka dalam menentukan panjang gelombang cahaya yang akan dikonversi maupun hasil konversi, adalah mengacu pada faktor *thermalization* yang mungkin timbul akibat proses *up-conversion*.

Contoh apabila kita memiliki *solar cell* dengan optimasi pada cahaya biru (455 – 492 nm), maka energi photon yang dihasilkan pada *up-converter* minimal adalah 2,6 eV. Cahaya biru dengan $\lambda = 455 - 492$ nm memberikan energi sekitar 2,6 eV. Oleh karena itu diasumsikan sebuah *up-converter* dengan besar energi *gap* antara *valence band*, *intermediate level* dan *conduction band* digambarkan seperti Gambar 4.4.



Gambar 4.4. Konsep *up – conversion* secara *band-diagram*. Proses eksitasi melalui *intermediate level* (IL).

Berdasarkan asumsi pada Gambar 4.4, maka energi *gap* adalah 2,6 eV, lalu ditentukan posisi *intermediate level* (IL) 1,2 eV dari *valence band* dan 1,4 eV ke *conduction band*. Untuk menentukan spektrum cahaya yang dikonversi pada *up-converter* tersebut, maka dihitung panjang gelombangnya menggunakan Persamaan (4.1).

$$E_p = h \cdot \nu \quad (4.1)$$

Dan frekuensi $\nu = \frac{c}{\lambda}$; maka Persamaan (4.1) dapat ditulis :

$$E_p = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

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

$c = \text{Kecepatan cahaya} \approx 3 \times 10^8 \text{ (m/s)}$

$\lambda = \text{Panjang gelombang cahaya (m)}$

diketahui energi photon yang diserap pada proses (1) = 1,2 eV = $1,92 \times 10^{-19} \text{ J.s}$.

Maka panjang gelombang :

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_p}$$

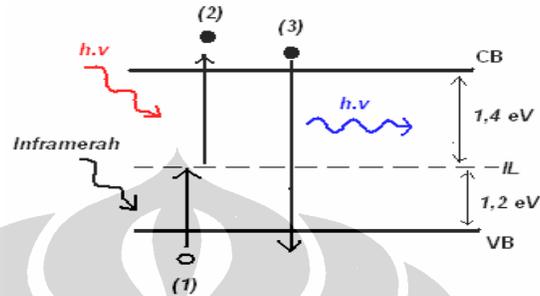
$$\lambda = \frac{6,62 \times 10^{-34} \cdot 3 \times 10^8}{1,92 \times 10^{-19}} = \frac{19,86 \times 10^{-26} \text{ J.s.m}}{1,92 \times 10^{-19} \text{ J.s}}$$

$$\lambda = 10,34 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda = 1034 \text{ nm}$$

Dari Gambar 4.4, masing – masing proses (1) dan (2) akan membutuhkan energi dan panjang gelombang cahaya yang berbeda. Dengan $1\text{eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J.s}$, maka menggunakan Persamaan (4.1) bisa dihitung panjang gelombang photon yang dibutuhkan pada proses (1) adalah 1034 nm dan proses (2) adalah 886 nm. Dari hasil perhitungan tersebut, spektrum cahaya yang dikonversi pada proses (1) dan (2) adalah cahaya inframerah dan cahaya merah. Inframerah memiliki *absorption depth* yang dalam pada Si *solar cell*, oleh sebab itu jika kita memiliki

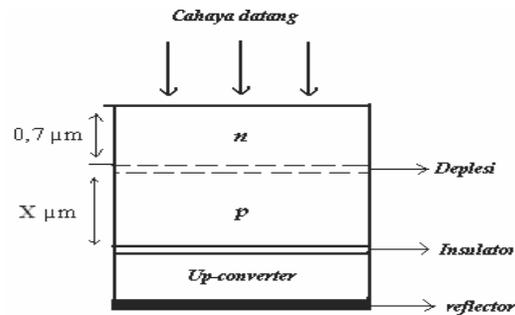
Si *solar cell* dengan optimasi pada gelombang cahaya biru, maka inframerah yang diserap *solar cell* tanpa *up-converter* dapat menembus *junction* dan kecil peluangnya menghasilkan *e-h pairs*. Cahaya merah juga memiliki *absorption depth* yang dalam, namun masih lebih kecil dibanding inframerah. Maka spektrum cahaya yang dapat dihasilkan *up-converter* ditunjukkan seperti pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5. Spektrum cahaya pada proses *up-conversion*.

Hasil spektrum cahaya yang ditunjukkan Gambar 4.5, memberikan pemahaman bahwa penempatan *up-converter* ditambahkan pada *rear surface* dari *solar cell*, karena spektrum cahaya merah dan inframerah memiliki *absorption depth* yang dalam. Namun untuk aplikasi *up-converter* pada *solar cell*, asumsi pada Gambar 4.5 tersebut tidak dapat merepresentasikan karakteristik material *rare earth* yang umum dipakai untuk membentuk divais *up-converter*. Material trivalen Erbium (Er^{3+}) yang didoping pada campuran material lainnya akan membentuk karakteristik tersendiri dalam proses absorpsi maupun eksitasi photon dalam panjang gelombang (λ) tertentu. Hal tersebut dibahas pada sub-Bab 4.2.2.

Untuk membuat skema devais *solar cell* dengan aplikasi *up-converter*, maka kita harus merujuk lagi pada asumsi Gambar 4.5, dimana letak kedalaman *junction* berdasarakan panjang gelombang cahaya dari hasil *up-converter*. Dari perhitungan yang telah dilakukan maka kedalam *junction* untuk optimasi panjang gelombang biru (455 – 492 nm) adalah sekitar 0,7 μm . Skema rancangan *solar cell* dengan aplikasi *up-converter* ditunjukkan seperti pada Gambar 4.6.



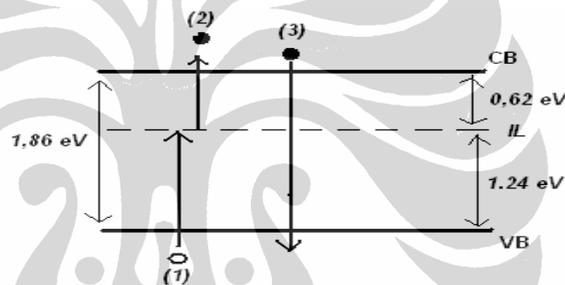
Gambar 4.6. Skema Si-solar cell dengan aplikasi up-converter.

Bifacial solar cell tentunya dipilih untuk aplikasi ini karena dapat menyerap cahaya atau photon dari arah *front surface*, dan *rear surface* yang tentunya diemisikan oleh *up-converter*. Lapisan *insulator* diasumsikan bahwa *up-converter* tidak terhubung langsung dengan *solar cell* secara elektrik maupun termal. *Reflector* sebagai cermin yang memantulkan photon agar dapat memaksimalkan proses absorpsi pada *solar cell*. *Reflector* secara selektif terhadap panjang gelombang photon bisa dijadikan pilihan untuk diterapkan dalam aplikasi sistem *up-converter* ini.

4.2.1 Konversi Spektrum Inframerah ke Cahaya Tampak.

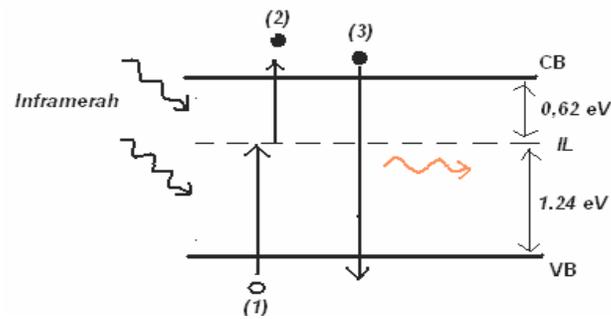
Up-converter juga dapat digunakan untuk mengkonversi inframerah menjadi spektrum cahaya tampak. Diketahui bahwa inframerah merupakan spektrum cahaya yang paling banyak dipancarkan oleh matahari sepanjang hari, walaupun memiliki koefisien absorpsi yang rendah. Disamping itu kendala dalam perancangan *solar cell* adalah pada inframerah dengan panjang gelombang yang besar, memiliki *absorption depth* yang lebih dalam. Oleh sebab itu bila ingin merancang *solar cell* dengan optimasi pada inframerah, maka letak *junction* lebih dalam letaknya dari permukaan dan tebal divais yang digunakan bertambah dan tidak efektif. Hal tersebut menyebabkan spektrum cahaya lain sulit mencapai *junction* dan tidak mampu menghasilkan *e-h pairs* karena *generation rate* menurun. Dengan memanfaatkan *up-converter*, mampu mengkonversi infra merah ke spektrum cahaya tampak dengan optimasi *solar cell* pada cahaya tampak.

Misalkan kita ambil panjang gelombang inframerah dalam spektrum 10^3 - 10^5 nm, yaitu sebesar 10^3 nm. Maka menggunakan Persamaan (4.1) diperoleh energi yang dihasilkan inframerah dengan $\lambda = 1000$ nm adalah 1,24 eV. Kemudian untuk proses absorpsi elektron berikutnya, kita tentukan panjang gelombang inframerah sekitar 2000 nm. Maka energi yang dihasilkan dengan menggunakan Persamaan (4.1) sebesar 0,62 eV. Dari hasil perhitungan tersebut, maka dengan mengacu pada asumsi dari pembahasan sebelumnya, dapat ditentukan jarak energi *gap* antar *valence band* via *intermediate level* (IL) sebesar 1,24 eV, dan dari *intermediate level* ke *conduction band* sebesar 0,62 eV. Hal tersebut menunjukkan bahwa energi photon yang dihasilkan pada *up-converter* sekitar 1,8 – 2 eV. Gambar 4.7 diasumsikan sebagai tingkat energi yang merepresentasikan proses yang terjadi dalam *up-converter*.



Gambar 4.7. Konversi inframerah ke cahaya tampak pada *up-converter*.

Dari Gambar 4.7, panjang gelombang yang dihasilkan pada proses (3) dapat dihitung menggunakan Persamaan (4.3), sehingga diperoleh $\lambda = 668$ nm. Dari hasil perhitungan tersebut, spektrum cahaya yang dihasilkan adalah antara spektrum cahaya oranye dan merah dengan panjang gelombang 668 nm. Hal ini menunjukkan bahwa *up-converter* bisa ditambahkan pada Si *solar cell* dengan menyesuaikan kedalaman *junction* untuk optimasi cahaya tampak tersebut. Spektrum cahaya tampak yang dihasilkan *up-converter* dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8. Spektrum cahaya konversi inframerah ke cahaya tampak.

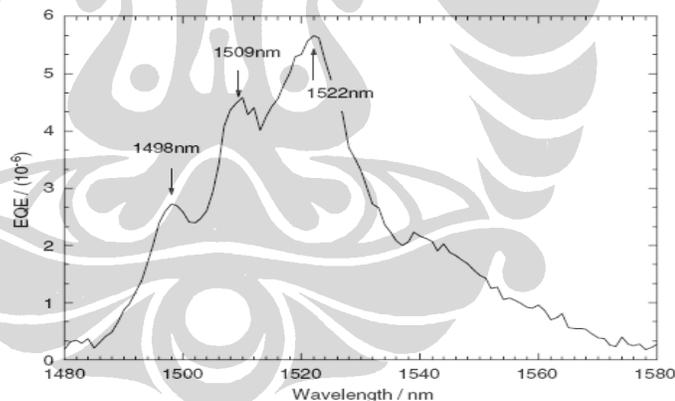
Dari semua hasil perhitungan pada *up-converter*, faktor *thermalization loss* tidak diperhitungkan karena pada dasarnya *up-converter* bertujuan untuk mengurangi dampak *transmission loss* pada *solar cell*. Oleh karena itu menjadi tidak efektif untuk menyatukan *up-converter* dan *down-converter* dalam satu buah *solar cell*. Pada material *rare earth* sangat memungkinkan untuk mengkonversi inframerah ke cahaya tampak, karena beberapa jenis *rare earth* memiliki absorpsi yang baik pada jangkauan spektrum 1400 nm – 1580 nm.

Kondisi yang didiskusikan pada sub-Bab ini diasumsikan menerapkan konsep *up-conversion* yang ideal. Proses pengkonversian photon melalui dua tahap dengan melibatkan panjang gelombang tertentu adalah mungkin jika direalisasikan pada material *rare earth*. Beberapa referensi mengungkapkan perancangan *up-converter* menggunakan jenis meterial tersebut. Sampai saat ini para ilmuwan masih melakukan riset pada jenis material *rare earth* serta disain *solar cell* yang tepat untuk mengaplikasikannya. Penjelasan jenis – jenis material *rare earth* tersebut didiskusikan dalam sub-Bab 4.2.2. Kalkulasi batasan efisiensi (*Shockley & Queisser limit*) yang mungkin didapat *solar cell* dengan aplikasi *up-converter* telah dilakukan oleh Trupke [11], yang ditunjukkan dalam Tabel 4.2.

4.2.2 Material Up – Converter

Pemanfaatan *up-converter* pada *solar cell* antara lain adalah untuk proses eksitasi menyerap photon dengan panjang gelombang yang panjang, dan diharapkan mampu mengemisikan menjadi photon dengan panjang gelombang yang lebih pendek. Untuk itu aplikasi *up-converter* diaplikasikan pada *rear*

surface dari *solar cell*. Perlu diperhatikan juga tentang bahan atau material pembentuk *up-converter* tersebut agar dapat memberikan fungsinya sesuai dengan tujuan penerapan. Jenis material *compound* sebagai *host materials* yang didoping oleh material jenis *rare earth* seperti *Trivalen Erbium* (Er^{3+}) menjadi pilihan. Erbium menjadi pilihan karena memiliki karakteristik absorpsi yang baik pada *Near Infrared* (NIR) dan *Infrared* (IR). Karakteristik tersebut mendukung untuk diaplikasikannya *up-converter* pada silikon *solar cell* khususnya, karena diharapkan *up-converter* mengkonversi photon menjadi energi yang lebih besar. Efisiensi dan jangkauan panjang gelombang untuk eksitasi sangat bergantung pada properti dari *host material* [6]. Beberapa jenis material seperti ($\text{NaYF}_4:\text{Er}^{3+}$) merupakan paling efisien pada proses eksitasi dalam panjang gelombang 1500 nm, dan saat ini $\text{BaCl}_2:\text{Er}^{3+}$ juga menjadi salah satu material yang efisien dan memberikan manfaat dari segi *phonic* [6]. Karakteristik dari material $\text{NaYF}_4:\text{Er}^{3+}$ tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.9. Gambar tersebut menunjukkan efisiensi eksternal terhadap iluminasi pada jangkauan panjang gelombang 1480-1580 nm.



Gambar 4.9. Efisiensi pada *up – converter* dengan material $\text{NaYF}_4:\text{Er}^{3+}$ [11].

Hasil pada Gambar 4.9 adalah percobaan pada sistem *up-converter* dengan ditambahkan fosfor di lapisan *rear* [11]. Tanpa ditambahkan fosfor, EQE pada jangkauan panjang gelombang tersebut diabaikan [11]. Kemudian jika ditinjau lebih lanjut mengenai *luminescence* dari *up-converter*, maka tiap jenis material yang telah didoping *Trivalen Erbium* (Er^{3+}) akan menghasilkan jumlah photon yang berbeda. Besarnya jumlah photon mempengaruhi efektifitas *up-converter*,

serta meningkatkan *e-h pairs* yang dapat dihasilkan oleh divais *solar cell*. Efektifitas *up-converter* bergantung pada jangkauan absorpsi dan efisiensi *up-converter* tersebut [16]. Dengan menggunakan tiga jenis material *up-converter* dalam spektrum 1,5 AM, dan menggunakan spesifikasi absorpsi yang telah dibuat oleh Ohwaki dan Wang [16], maka pada Tabel 4.1 dapat dilihat perhitungan jumlah photon yang dihasilkan dengan asumsi *peak absorption* 100% [16]. Meskipun jumlah photon yang ditunjukkan pada Tabel 4.1 relatif kecil.

Tabel 4.1. Hasil Perhitungan jumlah photon dalam jangkauan panjang gelombang. Kolom kedua nilai pesentase relatif terhadap jumlah photon yang diterima silikon *solar cell*. Kolom ketiga menunjukkan densitas arus [16].

	Photon numbers ($s^{-1}m^{-2}$)	percentage (%)	current (mA/cm ²)
Upconvertable	13.0×10^{20}	48	20.8
Shiftable to Er ³⁺	6.9×10^{20}	26	11.1
Shiftable to Dy ³⁺	3.3×10^{20}	12	5.2
YF ₃ :Er ³⁺	0.4×10^{20}	1.5	0.6
BaCl ₂ :Er ³⁺	0.1×10^{20}	0.6	0.3
BaCl ₂ :Er ³⁺ , Dy ³⁺	0.7×10^{20}	2.4	1.1

4.2.3 Kalkulasi Batasan Efisiensi Pada Aplikasi *Up - Converter*

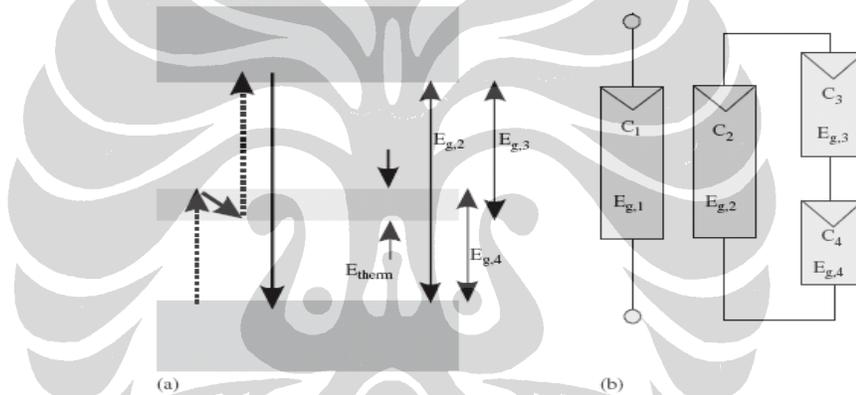
Batasan efisiensi *solar cell* yang telah dihitung menunjukkan peningkatan efisiensi yang dapat dicapai dengan mengaplikasikan sistem *up-conversion* pada *solar cell*. Dalam kondisi AM 1.5 dan *incident power* $\approx 1000 \text{ W/m}^2$ ($\sim 982,1 \text{ W/m}^2$), serta dipilih besar *refractive index* $n = 3.6$, maka kalkulasi efisiensi dalam beberapa nilai *band gap* dapat ditunjukkan dalam Tabel 4.2 [11].

Tabel 4.2. Batasan kalkulasi efisiensi pada *solar cell* dalam spektrum 1.5 AM untuk nilai energi *gap* yang berbeda [11].

$E_{g,1}$ (eV)	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.6	2.8	3
Effic. (%)	36.8	42.7	47.0	49.0	49.5	50.7	49.0	47.7	45.0	42.6	39.8
$E_{g,3}$ (eV)	0.54	0.58	0.70	0.74	0.92	0.94	1.02	1.13	1.22	1.34	1.43
$E_{g,4}$ (eV)	0.77	0.94	1.03	1.17	1.29	1.40	1.52	1.62	1.73	1.83	1.93
E_{therm} (eV)	0.31	0.32	0.33	0.31	0.41	0.34	0.34	0.35	0.35	0.37	0.36

The band gap energy $E_{g,3}$, the position of the impurity level (equivalent to $E_{g,4}$) and the relaxation energy E_{therm} are plotted in rows three to five.

Hasil dalam Tabel 4.2 merepresentasikan nilai efisiensi *solar cell* seperti pada material silikon dan GaAs [11]. Nilai energi *gap* E_{g3} adalah posisi dari tingkat impuritas dan E_{therm} , mengindikasikan besar energi saat proses *relaxation* pada *intermediate level*. E_{g3} dan E_{g4} masing-masing merepresentasikan besar energi antar pita valensi ke *intermediate level* dan antar *intermediate level* ke pita konduksi. Maksimum efisiensi dapat diraih sekitar 50,7 % dalam kondisi *band gap solar cell* 2 eV. Sedangkan untuk energi *gap* (1,12 eV) silikon dalam suhu ruangan, perhitungan batasan efisiensi yang didapat sebesar 40,2% [11]. Hasil kalkulasi efisiensi dalam Tabel 4.2 adalah berdasarkan asumsi skema Gambar 4.10. Gambar tersebut merepresentasikan konsep *up-conversion* dengan tiga buah *cell* yang memiliki energi *gap* yang berbeda (E_{g2}, E_{g3} , dan E_{g4}).



Gambar 4.10. Representasi pada material *up-converter*; (a) Berdasarkan diagram energi (b) Rangkaian ekuivalen untuk sistem *up-converter* [11].

E_{g3} , dan E_{g4} adalah energi dari dua buah *cell* (C_3 dan C_4) yang kecil merepresentasikan dua tingkat energi dalam *up-converter*. Sedangkan E_{g2} adalah energi C_2 yang merepresentasikan proses transisi radiasi. E_{g1} adalah energi *gap solar cell* yang diaplikasikan dengan *up-converter*. Karena pada C_2 menunjukkan transisi radiasi, maka C_2 dapat diasumsikan sebagai LED yang mengemisi photon setelah dikonversi secara *up-conversion*. LED (C_2) mendapatkan *bias forward* dari C_3 dan C_4 , atau tegangan $V_3+V_4=V_2$ [11]. Total energi $E_{g3} + E_{g4}$ lebih besar dibanding energi *gap* pada *solar cell* (E_{g1}) karena emisi photon setidaknya lebih

besar dibanding energi *gap solar cell* dan juga karena ada faktor mekanisme *loss* pada proses *relaxation* (E_{therm}). Besar E_{therm} bervariasi seperti dalam Tabel 4.2, namun rata – rata sebesar 0,3 eV [11]. E_{therm} mempengaruhi arus yang dihasilkan dalam C_2 . Dalam referensi [11], tanpa E_{therm} arus yang terukur lebih besar pada besar tegangan yang sama.

Dengan asumsi mengabaikan absorpsi yang terjadi pada pembawa (*free carrier*) [17], maka *photon current density* dalam masing-masing *cell* (C_1 - C_4) dari Gambar 4.10 dapat dideskripsikan sebagai berikut:

$$N(E_1, E_u, T, \mu, \epsilon) = \frac{\epsilon}{4 \cdot \pi^3 \cdot h^3 \cdot c_0^2} \int_{E_1}^{E_u} E^2 \cdot \left[\exp\left(\frac{E - \mu}{k \cdot T}\right) - 1 \right]^{-1} dE \quad (4.2)$$

dengan N adalah *photon flux*, E adalah energi *photon*, k adalah konstanta Boltzman, c_0 adalah kecepatan cahaya, T adalah temperatur, dan μ adalah *electrochemical potential*. Untuk intensitas cahaya yang datang, ditentukan langsung sebagai *solar irradiation*, dan diasumsikan sebesar 6000 $^{\circ}\text{K}$, *thermal* pada radiasi benda hitam [17]. Sedangkan untuk proses emisi *luminescence* oleh *solar cell* lain dalam rangkaian ekuivalen adalah 300 K [17]. Dengan menyamakan antara absorpsi dan emisi *photon current density*, maka dapat menghasilkan bentuk kurva I-V dari masing – masing *cell* (C_1 - C_4) [17]. Secara persamaan dapat tulis :

$$\begin{aligned} I_1/q &= N(E_g, \infty, 6000, 0, \epsilon_s) + N(E_g, \infty, 300, 0, \epsilon_{\text{amb}}) \\ &\quad - N(E_g, \infty, 300, \mu_1, \epsilon_{\text{em}}) \\ &\quad - N(E_g, E_g + E_2, 300, \mu_1, \epsilon_{\text{int}}) \\ &\quad + N(E_g, E_g + E_2, 300, \mu_2, \epsilon_{\text{int}}), \end{aligned} \quad (4.3)$$

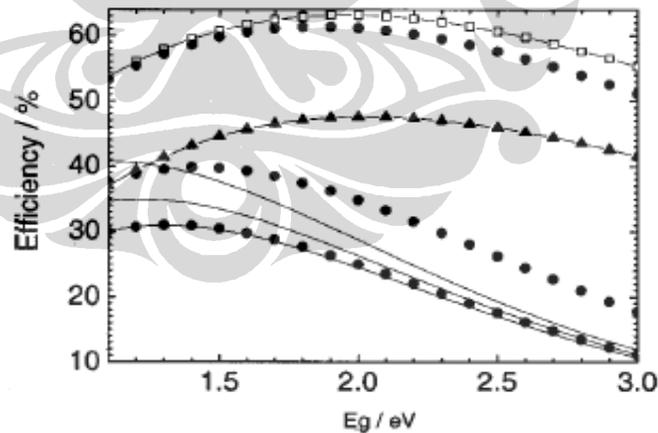
$$\begin{aligned} I_2/q &= N(E_g, E_g + E_2, 300, \mu_1, \epsilon_{\text{int}}) \\ &\quad - N(E_g, E_g + E_2, 300, \mu_2, \epsilon_{\text{int}}), \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} I_3/q &= N(E_1, E_2, 6000, 0, \epsilon_s) + N(E_1, E_2, 300, 0, \epsilon_{\text{amb}}) \\ &\quad - N(E_1, E_2, 300, \mu_3, \epsilon_{\text{em}}), \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} I_4/q &= N(E_2, E_g, 6000, 0, \epsilon_s) + N(E_2, E_g, 300, 0, \epsilon_{\text{amb}}) \\ &\quad - N(E_2, E_g, 300, \mu_4, \epsilon_{\text{em}}). \end{aligned} \quad (4.6)$$

Bentuk pertama di persamaan sebelah kanan pada Persamaan (4.3), menyatakan *solar radiation* yang diserap oleh *cell* C_1 , dan energi photon diatas besarnya *band gap*. Bentuk kedua mendeskripsikan absorpsi oleh *solar cell* dari radiasi sekeliling 300 K. Dalam bentuk tersebut, ϵ_{amb} menyatakan 'etendue pada kondisi tersebut dan ϵ_{amb} dapat dinyatakan dengan $\epsilon_{amb} = \epsilon_m - \epsilon_s$ [17]. Dengan ϵ_m adalah 'etendue dari *luminescence* yang dapat diemisikan, dan ϵ_s adalah 'etendue dari radiasi yang diterima langsung dari matahari. Bentuk ketiga menandakan *luminescence* yang diemisikan oleh *solar cell* melalui *front surface*. Kemudian bentuk dua terakhir menandakan *luminescence* yang diemisikan dari *cell* C_1 menuju *up-converter* dan *luminescence* yang diemisikan *up-converter* dan kemudian diserap oleh *solar cell*. Penjumlahan bentuk dua terakhir ini merepresentasikan ekstra generasi elektron-hole (*gained e-h generation rate*) [17].

Maksimum efisiensi konversi energi dihitung dalam fungsi energi *band gap* pada *solar cell*. Dalam referensi [17], Persamaan (4.3) dan (4.4) dihitung untuk menghasilkan karakteristik kurva *I-V* dari *cell* C_1 yang menandakan maksimum power yang ditransmisikan oleh sistem tersebut sehingga efisiensi dapat dihitung. Gambar 4.11 menunjukkan batasan efisiensi dalam proses *illumination* yang berbeda terhadap besar energi *band gap*.



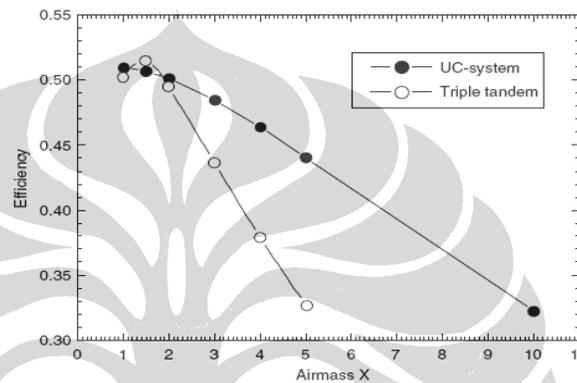
Gambar 4.11. Batasan maksimum untuk konversi energi surya dengan sistem *up-converter* dalam fungsi *band gap* [17].

Hasil pada Gambar 4.11, tidak hanya berdasarkan kondisi *illumination* yang berbeda, akan tetapi mengacu pada *cell* secara geometri [17]. Dua kondisi yang

mempengaruhi *cell* secara geometri antara lain *maximum concentration case* [17], yaitu mengkonsentrasikan cahaya matahari pada permukaan *solar cell* menggunakan lensa. Kondisi tersebut mengacu pada 46.200 matahari [17]. Kemudian kondisi *minimum emission case* [17], yaitu mempertimbangkan keterbatasan proses emisi *luminescence* yang terjadi pada lapisan *solar cell*. Hasil paling optimal 63,17 % dicapai dalam kondisi *minimum emission case* ditandakan dengan kotak kosong pada Gambar 4.11, untuk *band gap* $E_g = 1,955$ eV dan tingkat energi IL pada $E_l = 0,713$ eV [17]. Untuk kondisi *maximum concentration case*, efisiensi maksimum sebesar 61,40 % dengan *band gap* $E_g = 1,86$ eV dan IL pada $E_l = 0,667$ eV [17], ditandakan dengan lingkaran pada kurva paling atas dalam Gambar 4.11. Dalam batasan *Shockley-Queisser limit* untuk *solar cell* dengan satu buah *junction* dan dalam faktor konsentrasi yang sama (1.100 dan 46.200 *suns*) didapat lebih rendah, yang ditandakan dengan bentuk garis pada Gambar 4.11. Sedangkan jika intensitas diturunkan dengan konsentrasi 1 sampai 100 matahari [17], efisiensi yang bisa dicapai juga turun tajam, ditandai dengan bentuk lingkaran – lingkaran pada kurva dalam Gambar 4.11. Batasan maksimum untuk kondisi matahari yang tidak terkonsentrasi (*nonconcentrated sunlights*) dalam fungsi *band gap* adalah 47,6 % [17], ditandakan dengan bentuk segitiga dalam Gambar 4.11. Dalam kondisi tersebut, proses *relaxation* (E_{therm}) dipertimbangkan dalam kalkulasi yang dilakukan, menjadikan $E_g + E_{\text{therm}} = E_{g3} + E_{g4}$ (Gambar 4.10).

Dari kalkulasi batasan efisiensi yang dilakukan, menunjukkan bahwa untuk *solar cell* dengan *single junction* dengan kondisi cahaya matahari tidak terkonsentrasi, efisiensi yang mungkin dicapai lebih rendah dibanding dengan kondisi yang sama dengan mengaplikasikan sistem *up-converter* (bentuk segitiga dan garis. Gambar 4.11). Hal ini mengindikasikan penerapan *solar cell* dengan mengaplikasikan sistem *up-converter* memberikan peluang untuk memperbaiki efisiensi *solar cell* yang telah ada. Meskipun dalam asumsi dan kalkulasi terhadap potensi efisiensi konversi photon yang dapat dicapai dari aplikasi *up-converter*. Kalkulasi yang dilakukan adalah sebagai acuan dan prediksi pencapaian efisiensi pada *solar cell* dengan mengaplikasikan konsep *up-conversion*.

Sebagai perbandingan, aplikasi sistem *up-converter* ini dibandingkan dengan sistem *triple tandem solar cell* karena aplikasi *up-converter* juga melibatkan tiga tingkat energi yang berbeda seperti yang ada dalam Tabel 4.2. Uji coba perbandingan dilakukan berdasarkan spektrum *airmass* (AM) yang ditentukan dari 0 AM sampai 10 AM [11]. Pada 1.5 AM, efisiensi mencapai maksimum untuk kedua sistem seperti ditunjukkan Gambar 4.12. Perbandingan ini dilakukan untuk menunjukkan efisiensi yang dapat dicapai diantara dua metode.



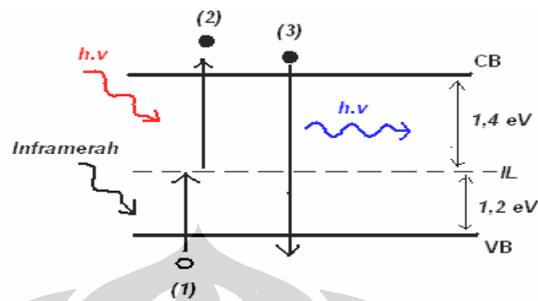
Gambar 4.12. Perbandingan efisiensi dari UC dan *triple tandem solar cell* [11].

Penurunan efisiensi seiring dengan naiknya *airmass* lebih tajam terjadi pada aplikasi *tandem solar cell*. Dalam kondisi yang sama, yaitu pada 1 AM sampai dengan 5 AM, *tandem solar cell* mengalami penurunan sekitar 17 % dan 6 % untuk aplikasi *up-converter*.

4.3 Analisa Simulasi *Solar Cell* dengan Aplikasi *Up-Converter*.

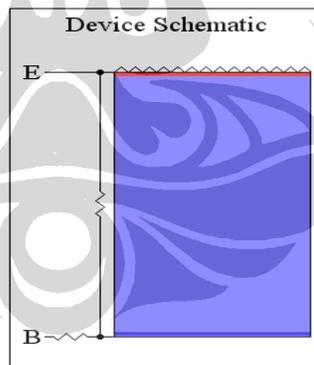
Pada sub-Bab ini akan dibahas mengenai hasil simulasi desain *solar cell* dengan penerapan konsep *up & down-conversion* serta analisa terhadap data yang telah didapat. Sebelum mencoba mensimulasikan *solar cell* dengan penerapan konsep *up-conversion*, maka digunakan *solar cell* konvensional dengan optimasi cahaya biru, kemudian dicari karakteristik dari jenis *solar cell* tersebut. Simulasi ini diharapkan mampu menunjukkan hasil yang lebih baik pada simulasi *solar cell* dengan penerapan konsep *up-conversion*. Dengan menggunakan *software* PC1D 5.9, didapat hasil simulasi *solar cell* jenis konvensional dengan optimasi cahaya

biru. Pada sub-Bab 4.2 telah dijelaskan bagaimana konsep *up-conversion* diterapkan pada *solar cell*. Gambar 4.13 menunjukkan konsep dasar *up-conversion*.



Gambar 4.13. Penerapan konsep *up-conversion* untuk mengkonversi menjadi cahaya biru.

Untuk mengimplementasikan konsep tersebut, maka perlu dirancang atau ditentukan jenis *solar cell* dengan optimasi cahaya biru. Dengan PC1D 5.9 dapat diperoleh data atau hasil simulasi *solar cell* tersebut. Gambar 4.14 menunjukkan skematik devais *solar cell* pada PC1D 5.9.



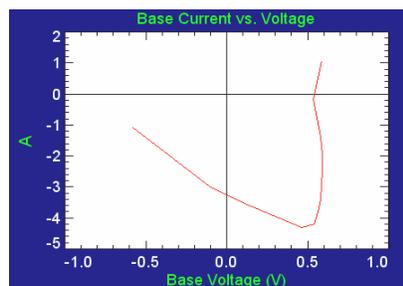
Gambar 4.14. Skematik *Solar Cell* menggunakan PC1D 5.9.

Kemudian beberapa parameter juga dapat dilihat nilainya sebagai hal yang mendukung atau menunjukkan karakteristik *solar cell*, sehingga bisa dibandingkan dari hasil keluaran *solar cell* tersebut. Skematik *solar cell* pada Gambar 4.14 memiliki luas devais 100 cm^2 dan secara umum terdiri dari ARC, lapisan tipe-n, substrat-p, daerah *dopping* pada *rear surface*, elemen hambatan

shunt (R_{sh}), dan hambatan seri (R_s). Pada Gambar 4.14, lapisan berwarna merah adalah lapisan tipe-n, sedangkan yang berwarna biru adalah substrat tipe-p, dan yang berwarna biru tua adalah lapisan *dopping* tinggi tipe-p pada *rare surface*. Berikut dapat dilihat beberapa parameter berdasarkan disain *solar cell* dalam PCID 5.9, diantaranya:

- a) Lapisan ARC *front surface*, dengan sudut 65° . dan tebal lapisan $4 \mu\text{m}$.
- b) Material Silikon (Si) dengan *band gap* $1,12 \text{ eV}$.
- c) Konsentrasi intrinsik pada $300 \text{ }^\circ\text{K}$ sebesar $1 \times 10^{10} / \text{cm}^3$,
- d) *Back ground dopping* tipe-p sebesar $2,6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,
- e) *First front diffusion*, tipe-n, $2,9 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ peak.
- f) *Second front diffusion*, tipe $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ peak
- g) *First rear diffusion*, tipe-p, $4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ peak
- h) Temperatur $25 \text{ }^\circ\text{C}$,
- i) *Constant intensity* $0,1 \text{ W/cm}^2$,
- j) *Monochrome wavelength* dari $450 \text{ nm} - 1200 \text{ nm}$.
- k) *Short circuit* $I_b = 3,254 \text{ amps}$
- l) *Max Base Power Out* = $2,277 \text{ Watt}$
- m) *Open Circuit* $V_b = 0,5419 \text{ Volts}$.

Parameter (a) s/d (m) di atas perlu diperhatikan dan dianalisa untuk mengetahui karakteristik *solar cell*. Hasil keluaran *solar cell* secara umum yaitu arus *short circuit* (I_{sc}), tegangan *open circuit* (V_{oc}), dan *power out*. Secara grafik *I-V*, keluaran *solar cell* dapat dilihat pada Gambar 4.15 yang menunjukkan perbandingan kedua parameter tersebut. Maksimum *base power-out* diperoleh sebesar 2.298 Watt saat kondisi maksimum V_{oc} dan I_{sc} , masing – masing $0,5419 \text{ Volts}$ dan $3,254 \text{ Amps}$.



Gambar 4.15. Hasil grafik *I-V solar cell* yang optimum pada cahaya biru.

Kemudian efisiensi *solar cell* dapat dihitung menggunakan Persamaan (4.7) dengan mencari terlebih dahulu parameter *fill factor* (FF).

$$\eta = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (4.7)$$

Kemudian nilai *fill factor* dapat dicari menggunakan Persamaan (4.8)

$$FF = \frac{V_{oc} - \ln(V_{oc} + 0,72)}{v_{oc} + 1} \quad (4.8)$$

Untuk sebuah *cell* dengan efisiensi yang mungkin untuk didapat adalah dengan nilai *fill factor* (FF) = 0,7 – 0,85 [3]. Maka dipilih nilai *fill factor* sebesar 0,8 untuk semua perhitungan efisiensi pada penulisan ini. Maka efisiensi *solar cell* dapat dihitung dengan Persamaan (4.7), dengan P_{in} adalah total daya dari cahaya yang datang sebesar 0,1 W/cm².

$$\eta = \frac{0,5419 \times 3,245 \times 0,8}{0,1} = 14,06\%$$

Setelah didapat hasil simulasi dari jenis *solar cell* konvensional yang optimal pada cahaya biru memiliki efisiensi sebesar 14,06 %, maka langkah selanjutnya adalah menganalisa hasil simulasi *solar cell* tersebut dengan menerapkan konsep *up-conversion* menggunakan PC1D 5.9.

Karena aplikasi *up-converter* dilakukan menggunakan *bifacial solar cell*, maka diasumsikan disain *solar cell* dengan PC1D 5.9 ini adalah sebagai *bifacial solar cell* dengan menambahkan ARC pada *rear surface*. Kemudian diberikan sumber cahaya sekunder dari sisi yang sama, dengan asumsi sebagai photon yang diemisikan oleh *up-converter*. Dalam hal ini intensitas sumber cahaya yang diberikan dari *front* atau *rear surface* diasumsikan sama. Baik dari *front surface* atau dari *rear surface* dipilih intensitas cahaya sebesar 0.1 W/cm². Hal ini diasumsikan juga bahwa intensitas cahaya yang diserap *solar cell* dari emisi *up-converter* adalah seragam, baik yang diserap langsung atau yang direfleksikan

oleh *reflector*. Kemudian photon yang diemisikan dari *rear surface* dipilih dalam jangkauan panjang gelombang 450 – 500 nm secara *transient* yang bisa diindikasikan dalam cahaya biru. Berdasarkan parameter *solar cell* (a) – (m), kemudian disimulasikan menggunakan PC1D 5.9 untuk mendapatkan keluaran pada Voc dan Isc yang berdampak langsung pada efisiensi. Dari simulasi tersebut menghasilkan Voc = 0.6057 Volts dan *short circuit* = -3,774 Amps. Menggunakan Persamaan (4.7), maka didapat efisiensi sebesar:

$$\eta = \frac{Voc.Isc.FF}{P_{in}}$$

$$\eta = \frac{0,6057 \times 3,774 \times 0,8}{0,1}$$

$$\eta = 18,28\%$$

Hasil tersebut mengalami peningkatan sebesar 4,22 % dari efisiensi sebelumnya dan maksimum *base power-out* didapat naik menjadi 2,77 Watt . Untuk P_{in} dipilih sama besarnya terhadap sumber cahaya primer. Kemudian dilakukan juga simulasi dengan mengubah spektrum dari sumber cahaya sekunder dalam spektrum cahaya tampak hingga inframerah. Tabel 4.3 menunjukkan hasil keluaran dari *solar cell* setelah dilakukan simulasi dan Gambar 4.16 menunjukkan grafik pencapaian efisiensi terhadap variasi jangkauan panjang gelombang.

Tabel 4.3. Keluaran *solar cell* dan efisiensi dengan diberikan sumber cahaya sekunder dari *rear surface*.

Panjang Geombang (nm)	Voc (Volt)	Short Circuit Ib (Amps)	Efisiensi (%)
380 – 400	0.590	3,623	17,10
400 – 500	0,6051	3,666	17,74
500 – 600	0,6119	3.761	18,41
600 – 770	0,6192	3,779	18,71
770 – 1000	0,6012	3,786	18,20
1000 - 1200	0,5426	3,616	15,69

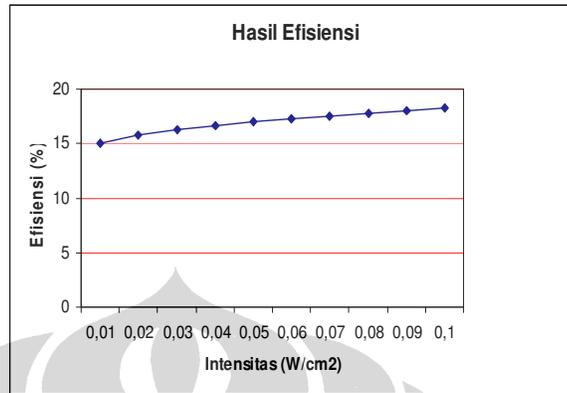
Jangkauan spektrum cahaya tersebut bekerja secara transien berdasarkan simulator PC1D 5.9 yang digunakan, dimulai dari panjang gelombang yang lebih rendah sampai yang lebih besar.



Gambar 4.16. Pencapaian efisiensi yang didapat dengan simulasi konsep *up-conversion* terhadap variasi panjang gelombang tertentu.

Dapat dilihat dari Gambar 4.16 peningkatan efisiensi optimum terjadi pada saat spektrum panjang gelombang transien dari 660 – 770 nm, dan untuk hal tersebut besar arus *short circuit* (I_{sc}) mengalami peningkatan lebih signifikan dibanding nilai tegangan *open circuit* (V_{oc}). Hal tersebut sejalan dengan tujuan penerapan konsep *up-conversion*, yaitu memperbaiki *transmission loss* yang ditandakan dengan peningkatan nilai *short circuit current* (I_{sc}). Dalam kondisi efisiensi maksimum, EQE dan IQE masing – masing mencapai nilai optimum sebesar 153,5 % dan 170,5 %. Dan untuk simulasi yang dilakukan, semua kondisi panjang gelombang cahaya sekunder yang diberikan menunjukkan peningkatan nilai optimum pada EQE dan IQE dibandingkan tanpa mensimulasikan aplikasi *up-conversion*. Kemudian dilakukan juga simulasi untuk mendapatkan peningkatan efisiensi dengan dipengaruhi oleh intensitas dari sumber cahaya sekunder, yang diasumsikan photon yang dapat diserap oleh *solar cell*. Seperti yang ditunjukkan dalam grafik pada Gambar 4.17, faktor intensitas cahaya sangat berpengaruh dalam pencapaian efisiensi *solar cell*, contohnya dengan mengaplikasikan konsentrator untuk percobaan yang telah dilakukan. Sebagaimana yang telah disebutkan, intensitas cahaya diasumsikan sama sebesar $0,1 \text{ W/cm}^2$ dalam semua kondisi dan dalam spektrum cahaya biru dengan panjang gelombang 450-500 nm.

Untuk kondisi sumber cahaya sekunder bervariasi dari $0,01 \text{ W/cm}^2$ sampai $0,1 \text{ W/cm}^2$, efisiensi yang didapat ditunjukkan dalam grafik pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17. Hasil efisiensi yang didapat dengan simulasi konsep *up-conversion* terhadap intensitas cahaya.

Dari simulasi yang dilakukan, data parameter keluaran dari *solar cell* yang didapat ditunjukkan dalam Tabel 4.4. Dalam percobaan tersebut dikondisikan sumber cahaya sekunder dalam spektrum biru ($450 - 500 \text{ nm}$) yang diasumsikan sebagai emisi photon dari *up-converter*. Pencapaian efisiensi meningkat seiring dengan naiknya intensitas cahaya sekunder tersebut.

Tabel 4.4. Hasil perhitungan efisiensi *solar cell* dengan aplikasi *up-converter* terhadap variasi intensitas cahaya sekunder.

Panjang Gelombang (nm)	Intensitas W/cm^2	Voc (Volt)	Short Circuit (Amps)	Efisiensi (%)
450 - 500	0,01	0,5593	3,356	15,01
	0,02	0,5702	3,466	15,81
	0,03	0,5781	3,53	16,32
	0,04	0,5842	3,571	16,68
	0,05	0,5891	3,609	17,0
	0,06	0,5933	3,646	17,3
	0,07	0,5970	3,680	17,57
	0,08	0,6002	3,713	17,82
	0,09	0,6031	3,744	18,06
	0,1	0,6057	3,774	18,28

Dalam kondisi panjang gelombang 450 – 500 nm, Tabel 4.4 memperlihatkan peningkatan efisiensi seiring dengan kenaikan intensitas cahaya sekunder yang bervariasi. Nilai optimum yang diperoleh sebesar 18,28 % lebih besar dibanding hasil simulasi yang didapat dalam Tabel 4.3 untuk kondisi panjang gelombang 400- 500 nm.

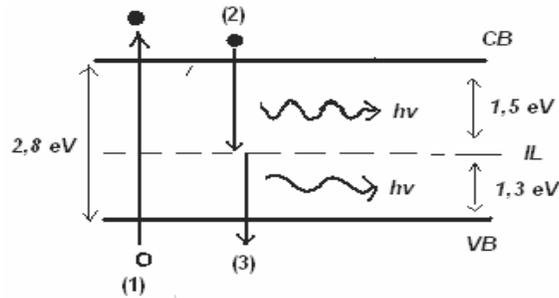
4.4 Karakteristik *Down – Converter*

Tujuan diaplikasikan *down-converter* pada *solar cell* adalah mengurangi penyebab terjadinya *thermalization loss* pada *solar cell*. Beberapa pertimbangan yang perlu diperhatikan dalam menentukan karakteristik dari *down-converter* diantaranya diuraikan di bawah ini :

- 1) dapat mengonversi energi photon yang diserap agar tidak terlalu berlebih terhadap *band gap solar cell* menjadi energi photon dengan besar energi minimal yang diserap untuk mengeksitasi elektron. Untuk *band gap solar cell* silikon $E_g = 1,12$ eV.
- 2) Mengubah panjang gelombang photon (λ) datang, menjadi dua buah photon dengan panjang gelombang yang lebih panjang.

Untuk aplikasi *down-converter* pada sebuah *solar cell*, maka langkah yang diperhatikan adalah menghitung panjang gelombang photon yang berperan dalam proses konversi dan absorpsi pada *solar cell*. Pada sub-Bab ini, *down-converter* diaplikasikan pada *solar cell* silikon. Untuk Si-*solar cell* maka minimal energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan *e-h pairs* sekitar 1,2 eV. Ini berarti energi photon yang dikonversi dan diemisikan oleh *down-converter* setidaknya sebesar 1,2 eV atau lebih, agar tidak terdapat rugi photon ($h\omega < E_g$) dalam proses absorpsi pada *solar cell*. Maka secara *band diagram*, karakteristik *down-converter* dapat diasumsikan seperti pada Gambar 4.18. Dari Gambar 4.18, dapat ditentukan besarnya energi photon yang diemisikan pada *down-converter* dengan proses transisi melalui *intermediate level* (IL) masing – masing sebesar 1,3 eV dan 1,5 eV yang disesuaikan dengan besar energi *gap* minimal pada Si sebesar 1,12 eV. Jika dipilih emisi photon 1,12eV menjadi tidak efektif dalam proses absorpsi,

karena panjang gelombang yang relatif panjang (inframerah) dan *junction depth* yang terlalu dalam.



Gambar 4.18. Konsep *down-conversion* secara *band-diagram*. Transisi radiasi melalui *intermediate level* (IL).

Dengan besar *band gap* pada *down-converter* sebesar 2,8 eV, maka diasumsikan besar energi photon yang diserap *down-converter* dalam proses eksitasi dari *band* ke *band* sebesar 2,8 eV. Dari Gambar 4.18, maka dapat dihitung besar energi dan pajang gelombang photon yang dikonversi pada *down-converter* dan emisi yang dihasilkan saat proses *luminescence*.

Jika *band gap* pada *down-converter* = 2,8 eV, maka menggunakan Persamaan (4.1), panjang gelombang minimum yang dapat diserap *down-converter* dapat dihitung menjadi :

$$\lambda = \frac{h.c}{E_p} = \frac{6,62 \times 10^{-34} \cdot 3 \times 10^8}{4,48 \times 10^{-19}}$$

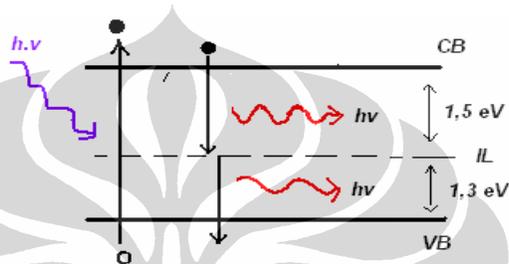
$$\lambda = \frac{19,86 \times 10^{-26} \text{ J.s.m}}{4,48 \times 10^{-19} \text{ J.s}}$$

$$\lambda = 4,43 \times 10^{-7} \text{ m} = \mathbf{443 \text{ nm}}$$

Dari hasil perhitungan di atas dapat dinyatakan panjang gelombang minimal cahaya yang dikonversi pada *down-converter* adalah 443 nm, atau antara spektrum cahaya ungu dan biru.

Dari Gambar 4.18, Proses (1) menjelaskan *down-converter* menyerap photon datang, kemudian mengeksitasi elektron dengan transisi *band* ke *band*. Proses (2) menunjukkan proses transisi dari C_B melalui *intermediate level* (IL) melibatkan emisi photon. Kemudian proses (3) menunjukkan proses transisi dari

intermediate level (IL) ke V_B , juga melibatkan emisi photon. Masing – masing proses (2) atau (3) mengemisikan photon dengan energi yang berbeda. Jika dihitung dengan Persamaan (4.1), maka dari proses (2) diemisikan photon dengan panjang gelombang 826 nm. Dan dari proses (3) diemisikan photon dengan panjang gelombang 954 nm. Dari hasil perhitungan tersebut, kedua emisi photon berada dalam spektrum cahaya merah atau bahkan mendekati inframerah. Pada Gambar 4.19 menunjukkan spektrum cahaya dalam proses konversi dengan *down-converter* tersebut.

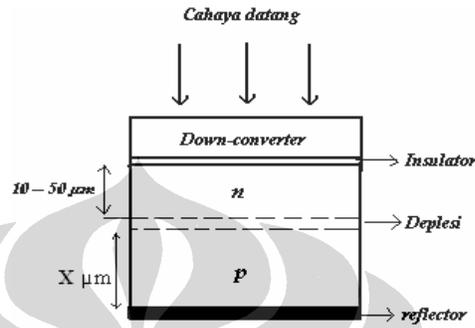


Gambar 4.19. Spektrum cahaya pada aplikasi *down-converter*.

Dari Gambar 4.19 menunjukkan emisi photon yang dapat diserap *solar cell* setelah dikonversi oleh *down-converter* adalah dengan panjang gelombang sekitar 800 – 960 nm. Tentunya kondisi tersebut kurang efektif untuk diserap oleh *solar cell*, sehingga *Quantum dots* (QD's) atau *IPV cell* menjadi pilihan untuk diaplikasikan sebagai *down-converter*. Namun beberapa material *compounds* III – V (AlAs atau GaP) yang didoping dengan penyesuaian impuritas adalah material – material yang dapat diaplikasikan sebagai *down-converter* [18].

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan dan mengacu pada asumsi karakteristik *down-converter* dari Gambar 4.18, maka dapat dibuat karakteristik *solar cell* disesuaikan dengan spektrum gelombang hasil konversi yaitu pada cahaya merah. Dengan melihat hubungan antara *absorption depth* dan panjang gelombang seperti yang ditunjukkan Gambar 4.3, maka karakteristik *solar cell* optimum pada panjang gelombang 826 nm – 924 nm. Sehingga kedalaman *junction solar cell* yang dirancang sesuai dengan perhitungan adalah sekitar 10 – 15 μm dari permukaan. Dalam praktisnya hal ini mungkin sulit untuk diterima, karena kedalaman *junction* tersebut memiliki *generation rate* yang rendah dan kurangnya efisiensi pemakaian material. Sehingga diharapkan jika

down-converter tersebut diaplikasikan dengan *solar cell*, maka dapat memaksimalkan photon yang diserap *solar cell* agar mengurangi *thermalization loss* dan meningkatkan efisiensi *solar cell*. Skema rancangan *solar cell* dengan aplikasi *down-converter* ditunjukkan seperti pada Gambar 4.20.



Gambar 4.20. Skema Si-*solar cell* dengan aplikasi *down-converter*.

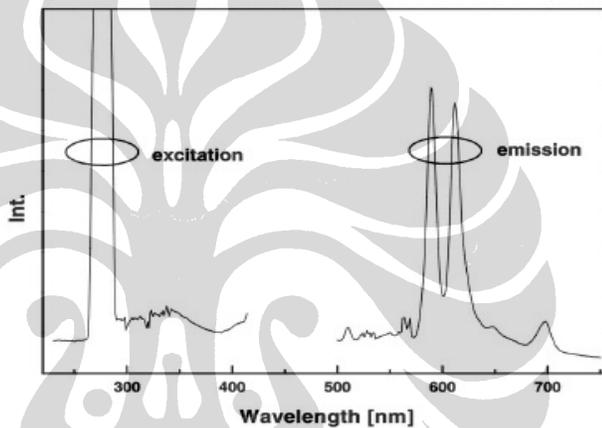
Penggunaan *reflector* adalah untuk mengoptimalkan penyerapan photon yang ditransmisikan masuk kedalam *solar cell* dari hasil emisi dari *down-converter*. *Reflector* tersebut dapat digunakan secara selektif untuk merefleksikan dalam panjang gelombang tertentu.

Kondisi yang didiskusikan pada bagian sub-Bab ini juga diasumsikan dalam keadaan ideal. Proses yang ditunjukkan pada Gambar 4.18 adalah untuk merepresentasikan konsep *down-conversion* secara *band diagram* serta mekanisme absorpsi dan emisi photon yang terlibat didalam. Untuk kondisi yang merepresentasikan divais sesungguhnya, maka perlu dilakukan eksperimen serta kalkulasi efisiensi yang mungkin dicapai oleh *solar cell* dengan mengaplikasikan *down-converter*. Untuk kalkulasi efisiensi akan didiskusikan pada bagian sub-Bab 4.6.

4.5 Material Down – Converter

Konsep *down-conversion* atau *quantum cutting* bisa aplikasikan pada dua buah jenis material, diantaranya material *host* yang didoping oleh ion – ion *rare earth* seperti Pr^{3+} dalam *fluoridic*, atau jenis *oxidic host* seperti Gd^{3+} didoping Eu^{3+} , atau Eu^{3+} didoping Er^{3+} - Tb^{3+} -*codoped* LiGdF_4 dengan proses *down-*

conversion terjadi hanya pada ion [19]. Kemudian secara *band* diagram seperti *down-converter* dengan proses *Auger*, berperan di dalam material *host* dan ion berperan dalam proses emisi [19]. Jenis material LiGdF_4 yang didoping Eu^{3+} banyak dipilih dan dibahas dalam beberapa literatur karena kedua kristal tersebut menunjukkan spektrum eksitasi yang tajam pada panjang gelombang yang panjang relatif terhadap jenis MRX_4 lainnya, seperti kristal K_3GdF_4 dan kristal $\text{K}_5\text{Li}_2\text{GdF}_{10}$ [20]. MRX_4 ditandakan dengan M adalah atom alkali, R adalah atom *rare-earth*, dan X adalah atom halogen [20]. Gambar 4.21 menunjukkan spektrum eksitasi dan emisi pada LiGdF_4 dengan doping 1,5% Eu.



Gambar 4.21. Spektrum eksitasi dan emisi dari LiGdF_4 didoping Eu [20].

Emisi maksimum ditunjukkan dengan panjang gelombang 590 – 610 nm dalam cahaya tampak, dan pada eksitasi maksimum sekitar 275 nm pada spektrum ultraviolet (UV). Dalam proses *luminescence*, emisi lebih mengarah pada Eu^{3+} , sehingga fenomena tersebut dinamakan efek *quantum cutting* [20].

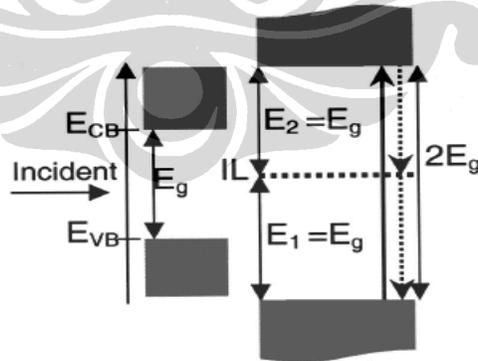
Untuk eksperimen sesungguhnya, lapisan transparan dengan *quantum dots* atau *nano crystal* yang berperan dalam menggeser panjang gelombang cukup menjanjikan dalam membentuk sistem *photoluminescence* [19]. Hal tersebut didasarkan dengan dibutuhkannya tingkat transparansi yang baik pada daerah permukaan *solar cell* yang tidak dimodifikasi terhadap spektrum cahaya. CdSe quantum dots digunakan dalam lapisan transparan *polymeric matrix* pada mc-Si,

namun hanya secara teori dapat diprediksi memperbaiki *short-circuit* relatif sebesar 10 % [19].

4.6 Kalkulasi Batasan Efisiensi Pada Aplikasi *Down – Converter*

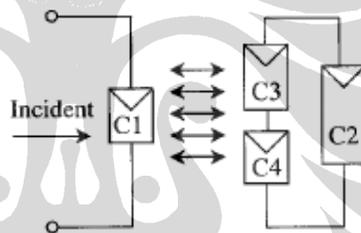
Dalam menganalisa dan mengkalkulasikan batasan efisiensi pada aplikasi *down-converter* dengan *solar cell* dapat dibedakan secara letak geometris *down-converter* tersebut. Pada referensi [18], dilakukan kalkulasi dan didapat efisiensi maksimum dengan letak *down-converter* pada *rear surface*. Untuk aplikasi *down-converter* pada *front surface* didapat efisiensi lebih rendah, namun masih lebih tinggi dibanding dengan batasan efisiensi dari sebuah *single junction solar cell* dalam batasan Shockley-Queisser dengan asumsi pada kondisi 6000 K spektrum *black body*. Dengan berpedoman pada teori konsep *down-conversion*, diasumsikan juga bahwa tidak ada rekombinasi *non-radiative* yang terjadi di dalam divais untuk mengkalkulasi batasan efisiensi [18].

Dalam kondisi *down-converter* diletakkan pada *rear surface*, maka jika ditinjau mekanisme absorpsi dari cahaya datang dapat direpresentasikan secara diagram energi pada Gambar 4.22. Energi photon yang lebih besar dari *band gap solar cell* akan diserap oleh *solar cell*, sedangkan kondisi energi photon dengan energi dua kali besar *band gap solar cell* dibutuhkan untuk dapat diserap dan dikonversi oleh *down-converter*.



Gambar 4.22. Skematik diagram energi *down-converter* pada *rear surface* [18].

Gambar panah dengan garis titik-titik adalah proses emisi photon *via intermediate level*. Emsisi photon tersebut dalam *down-converter* lebih besar dari besar *band gap solar cell*, maka hal tersebut merepresentasikan energi *loss* [18]. Dalam kondisi ideal, besar energi E_2 dan E_1 diharapkan sama besar dengan *band gap solar cell* ($E_1 = E_2 = E_g$) agar proses emisi melalui *intermediate level* dapat diserap *solar cell* tanpa ada kontribusi energi *loss* yang cukup besar. Untuk kondisi tersebut, maka posisi *intermediate level* harus tepat ditengah *band gap* dari *down-converter*. Dari refrensi [18], pemahaman absorpsi photon secara selektif pada *down-converter* diasumsikan bahwa photon dengan energi dua kali lebih besar dari *band gap solar cell* akan diserap dan dikonversi secara *down-conversion*, sedangkan absorpsi photon tersebut melalui *intermediate level* tidak diperbolehkan. Gambar 4.23 merepresentasikan rangkaian ekivalen untuk kalkulasi batasan efisiensi dalam kondisi tersebut.



Gambar 4.23. Rangkaian ekivalen sistem *down-converter* pada *rear surface* [18].

Dari rangkaian ekivalen sistem *down-conversion*, dapat dideskripsikan bahwa photon datang dengan energi dua kali *band gap solar cell* diserap dan dikonversi oleh *cell C2* dengan *band gap* cukup besar ($2E_g$) setelah melewati *solar cell C1*. *Photovoltage* yang timbul pada *C2* memberikan tegangan bias maju pada dua buah *cell C3* dan *C4*, sehingga photon dengan energi yang lebih rendah diemisikan oleh kedua *cell* tersebut dan dapat diserap oleh *solar cell C1*. Untuk kalkulasi batasan efisiensi pada penerapan sistem *down-conversion* ini dilakukan menggunakan perumusan yang sama seperti Persamaan (4.2). Pendekatan yang dilakukan oleh Shockley-Queisser sebagai perbedaan absorpsi photon *current density* dan emisi photon *current density* [18]. Definisi parameter seperti yang

dijelaskan pada sub – Bab 4.2.3. Untuk photon *current* yang diserap oleh *solar cell* pada rangkaian ekivalen diasumsikan dalam kondisi pada cahaya matahari langsung dengan $T_s = 6000$ K spektrum *black body*, kemudian kondisi *hemispherical* dengan $T_z = 300$ K dan *luminescence* yang diterima dari ketiga buah *cell* yang lain [18]. Maka karakteristik *I-V* dari *cell* C1 – C4 dapat dikalkulasi berdasarkan Persamaan (4.9) sampai Persamaan (4.12). Temperatur *solar cell* ditentukan menjadi $T_z = 300$ untuk semua kalkulasi yang dilakukan [18].

$$I_1(\mu_1)/q = \dot{N}(E_g, 2E_g, T_s, 0, \epsilon_s) + \dot{N}(E_g, 2E_g, T_z, 0, \epsilon_{\text{hemi}}) - I_3(\mu_{3,4})/q - I_4(\mu_{3,4})/q \quad (4.9)$$

$$I_2(\mu_2)/q = \dot{N}(2E_g, \infty, T_s, 0, \epsilon_s) + \dot{N}(2E_g, \infty, T_z, 0, \epsilon_{\text{hemi}}) - \dot{N}(2E_g, \infty, T_z, \mu_2, \pi), \quad (4.10)$$

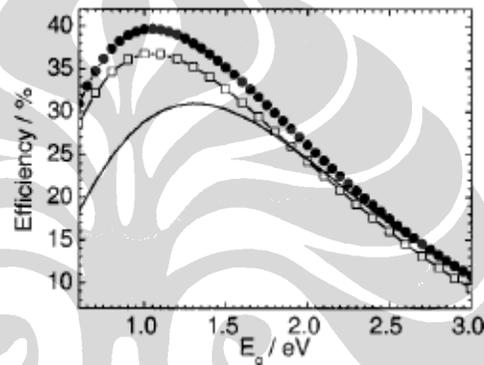
$$I_3(\mu_{3,4})/q = 1/2 \cdot [\dot{N}(E_g, 2E_g, T_z, \mu_1, \epsilon_{\text{int}}) - \dot{N}(E_g, 2E_g, T_z, \mu_{3,4}, \epsilon_{\text{int}})], \quad (4.11)$$

$$I_4(\mu_{3,4})/q = 1/2 \cdot [\dot{N}(E_g, 2E_g, T_z, \mu_1, \epsilon_{\text{int}}) - \dot{N}(E_g, 2E_g, T_z, \mu_{3,4}, \epsilon_{\text{int}})]. \quad (4.12)$$

Pada kondisi optimum dalam sistem tersebut, kedua *cell* C3 dan C4 mememisikan dan menyerap photon dalam interval energi E_g dan $2E_g$ [18]. Karena kedua *cell* tersebut memiliki batas bawah dan batas atas energi untuk proses absorpsi, maka *cell* C3 dan C4 dimodelkan secara identik dengan perbedaan *electrochemical* yang sama [18]. Oleh sebab itu untuk photon *current cell* C3 dan C4 ditandakan dengan $\mu_{3,4}$. Bentuk dua pertama di sebelah kanan pada Persamaan (4.9) mendeskripsikan *generation rate* dalam *cell* C1 ketika mengabsorpsi cahaya datang dalam kondisi langsung dan kondisi *hemispherical* yang dapat diserap oleh *solar cell* [18], ditandai dengan parameter T_s dan T_z . Pada Persamaan (4.11) dan (4.12) diindikasikan sebagai photon *current density* yang diemisikan oleh *cell* C1 ke arah C3 dan C4, begitu juga sebaliknya. Bentuk terakhir dari Persamaan (4.9) mendeskripsikan *photon current density* yang diemisikan oleh C1 melalui *front surface* menjadi kondisi *hemispherical* [18]. Kondisi dalam lingkup tertentu untuk kalkulasi efisiensi harus dipenuhi [18].

Kondisi tersebut yaitu : *down-converter* dalam keadaan rangkaian terbuka, sehingga arus yang mengalir adalah sama melalui *cell C2*, *C3*, dan *C4*, kemudian jumlah tegangan pada *cell C3* dan *C4* sama dengan tegangan *cell C2* [18].

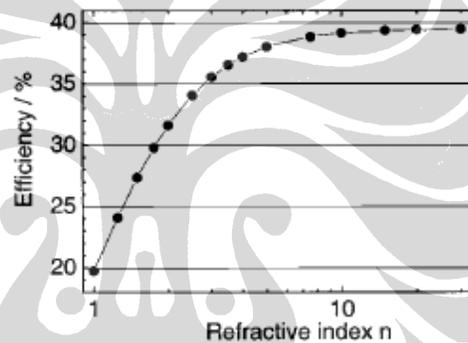
Hasil pencapaian efisiensi berdasarkan kalkulasi tersebut digambarkan secara grafik pada Gambar 4.24. Efisiensi optimal pada sistem *down-conversion* dikalkulasi sebagai fungsi dari *band gap C1* [18]. *Refractive index* pada *solar cell* dan *lumescence* pada *converter* diperhitungkan dalam kalkulasi tersebut. Untuk $n = 3,6$ dipilih sebagai tipikal dari material silikon dan GaAs [18].



Gambar 4.24. Hasil kalkulasi untuk konversi energi surya dengan sistem *down-converter* dalam fungsi *band gap* [18].

Dari Gambar 4.24 ditunjukkan tiga buah grafik pencapaian kalkulasi efisiensi pada *solar cell*. Untuk kalkulasi pada konvensional *solar cell* dalam batasan Shockley-Queisser ditandakan dengan bentuk garis. Sekitar 30,9 % efisiensi optimum didapat untuk perhitungan tersebut dengan asumsi rekombinasi terjadi secara radiatif [18]. Kemudian efisiensi yang didapat dengan meletakkan *down-converter* pada *front surface* ditandakan dengan bentuk garis dan kotak. Efisiensi optimum didapat sekitar 36 % dalam kalkulasi tersebut. Efisiensi paling optimum didapat sekitar 39,63 % untuk besar *band gap* pada *solar cell* sebesar 1,05 eV [18]. Hasil tersebut ditandakan dengan garis dan lingkaran penuh. Perbedaan efisiensi optimum yang didapat pada perbedaan letak *converter* adalah karena faktor *refractive index* dalam material *down-converter* jika diletakkan pada *front surface*.

Aplikasi *down-converter* yang diletakkan pada *front surface* dimungkinkan untuk diaplikasikan pada *solar cell* konvensional yang telah ada. Perbedaan yang terjadi dalam aplikasi tersebut adalah energi photon datang yang besar langsung diserap oleh *down-converter*, sementara *solar cell* menerima dan menyerap photon dari radiasi *luminescence* yang diemisikan *down-converter*. Karena hanya sebagian photon yang diemisikan ke dalam *solar cell*, sehingga diharapkan menghasilkan *photo current*, maka *refractive index* dari *down-converter* dan *solar cell* yang besar sangat esensial untuk pencapaian efisiensi konversi yang baik jika *down-converter* diletakkan pada *front surface* [18]. Gambar 4.25. menunjukkan efisiensi dengan *down-converter* pada *front surface* untuk *band gap solar cell* 1,1 eV dalam fungsi *refractive index* n .



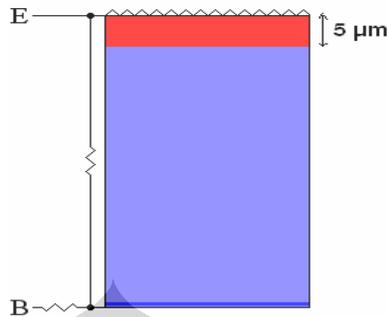
Gambar 4.25. Efisiensi *solar cell* dalam sistem *down-conversion* terhadap fungsi *refractive index* n [18].

Hasil grafik yang ditunjukkan dalam Gambar 4.25 diasumsikan untuk *solar cell* dan *down-converter* dengan nilai *refractive index* yang sama [18]. Dengan demikian absorpsi arah pancaran photon dari cahaya matahari maupun dari emisi *converter* tidak mengalami perubahan.

4.7 Analisa Simulasi *Solar Cell* Dengan Optimasi Cahaya Merah

Untuk mensimulasi konsep *down-conversion* menggunakan PC1D 5.9, didisain *solar cell* dengan optimasi pada cahaya merah. Hal ini mengacu pada perhitungan yang telah dibuat berdasarkan Gambar 4.19, yaitu penerapan konsep *down-conversion* yang diharapkan mengemisikan photon dalam spektrum cahaya merah. Skematik *solar cell* tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.26. Kedalaman

junction dipilih dan disesuaikan dengan absorpsi pada kedalaman 5 μm dari permukaan.



Gambar 4.26. Skematik solar cell dengan optimasi cahaya merah menggunakan PC1D 5.9.

Gambar skematik yang ditunjukkan pada Gambar 4.26, disimulasikan menggunakan PC1D 5.9. Luas divais yang digunakan adalah sebesar 100 cm^2 , dan tebal divais $30 \mu\text{m}$. Susunan solar cell terdiri dari lapisan ARC dengan kedalaman $4 \mu\text{m}$, divais berwarna merah adalah daerah tipe-n, sedangkan yang berwarna biru adalah daerah tipe-p, dan *refractive index* sesuai dengan material silikon ($n = 3,58$). Hasil keluaran dari parameter setelah dilakukan simulasi menggunakan PC1D 5.9, dapat dilihat dalam parameter 1) sampai 13) di bawah ini.

- 1) Lapisan ARC, dengan sudut $58,6^\circ$.
- 2) Material Silikon (Si) dengan *band gap* $1,12 \text{ eV}$.
- 3) Konsentrasi intrinsik pada 300°K sebesar $1 \times 10^{10} / \text{cm}^3$,
- 4) *Back ground doping* tipe-p sebesar $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,
- 5) *First front diffusion*, tipe-n, $2,9 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ peak.
- 6) *Second front diffusion*, tipe $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ peak
- 7) *First rear diffusion*, tipe-p, $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ peak
- 8) Temperatur 25°C ,
- 9) Sumber cahaya dengan *Constant intensity* $0,1 \text{ W/cm}^2$,
- 10) *Monochrome wavelength* dari $400 \text{ nm} - 1200 \text{ nm}$.
- 11) *Short circuit* $I_b = 1,967 \text{ amps}$

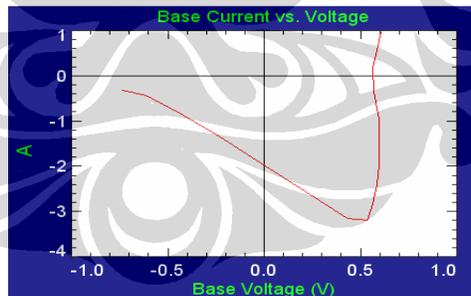
12) *Max Base Power Out* = 1,728 Watts

13) *Open Circuit Vb* = 0,5668 Volts.

Dari hasil parameter (11) dan (13) dapat dihitung efisiensi menggunakan persamaan (4.7). Maka maksimal *base power-out* didapat sebesar 1,728 Watt untuk kondisi *Voc* dan *Isc* maksimum seperti yang ditunjukkan oleh parameter (11) dan (12). Dengan *P_{in}* adalah total daya dari cahaya yang datang sebesar 0,1 W/cm², maka efisiensi menjadi :

$$\eta = \frac{0,5668 \times 1,967 \times 0,8}{0,1} = 8,91\%$$

kemudian dengan mengaplikasikan *down-converter* yang diletakkan pada *front surface*, maka disimulasikan menggunakan PC1D 5.9, sehingga hasil akhir yang diharapkan adalah efisiensi *solar cell* dapat ditingkatkan dengan memperbaiki keluaran dari parameter *Voc* (*open-circuit voltage*) sesuai dengan teori yang dipahami. Gambar 4.27 menunjukkan grafik *I-V* dari hasil simulasi *solar cell* dengan parameter dari (1) sampai (13).



Gambar 4.27. Hasil grafik *I - V* menggunakan simulator PC1D 5.9.

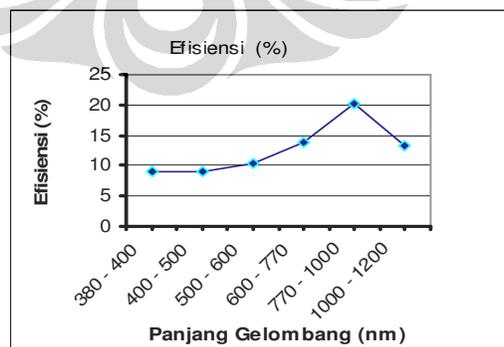
Untuk mensimulasi aplikasi *down-converter*, dilakukan dengan memberikan sumber cahaya sekunder dari arah *front surface* dengan asumsi cahaya yang diberikan tersebut sebagai proses *luminescence* yang diemisikan *down-converter*. Sumber cahaya primer dipertahankan dalam jangkauan panjang gelombang yang lebar (400 -1200 nm) yang mengacu pada spektrum cahaya matahari. Langkah

simulasi yang dilakukan adalah sama dengan simulasi pada sub-Bab 4.3, yaitu sumber cahaya primer ditentukan dengan intensitas $0,1 \text{ W/cm}^2$, kemudian cahaya sekunder diberikan dengan variasi spektrum cahaya dengan asumsi intensitas sama. Hasil simulasi tersebut ditunjukkan dalam Tabel 4.5 dengan pencapaian efisiensi yang berubah – ubah bergantung pada spektrum cahaya sekunder.

Tabel 4.5. Hasil keluaran *solar cell* dan efisiensi dengan aplikasi konsep *down-conversion* menggunakan PC1D 5.9.

Panjang Gelombang (nm)	Voc (Volts)	Short Circuit Ib (Amps)	Efisiensi (%)
380 - 400	0,5669	1,967	8,92
400 - 500	0,5756	1,971	9,07
500 - 600	0,6044	2,169	10,48
600 - 770	0,6312	2,751	13,89
770 - 1000	0,6334	3,983	20,18
1000 - 1200	0,5677	2,916	13,24

Dengan menggunakan parameter (1) sampai (13), maka dapat dilihat hasil simulasi dari Tabel 4.5 saat kondisi cahaya sekunder 600 - 770 nm mengalami peningkatan efisiensi sebesar 3,82 %, dan maksimum *base power-out* meningkat menjadi 2,210 Watt. Jika digambarkan secara grafik, efisiensi naik hingga optimum 20,18 % dan kembali turun seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 4.28. Pencapaian efisiensi tersebut bergantung pada spektrum cahaya sekunder yang diberikan.



Gambar 4.28. Hasil pencapaian efisiensi dengan simulasi *down-conversion* terhadap variasi panjang gelombang cahaya sekunder.

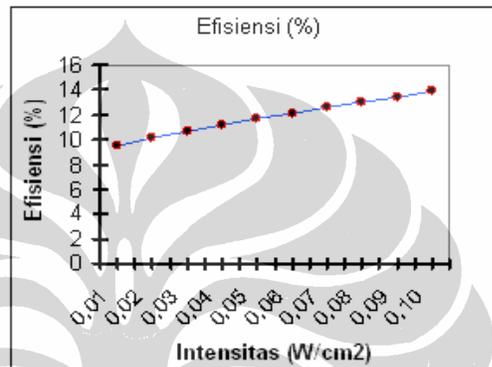
Dari grafik yang ditunjukkan Gambar 4.28, pencapaian efisiensi tertinggi pada spektrum 770 – 1000 nm. Hal tersebut terkait dengan optimasi *solar cell* yang dirancang untuk optimasi cahaya merah dalam simulasi tersebut. Meskipun pada spektrum tersebut mendekati inframerah, namun keberadaan cahaya sekunder yang diasumsikan proses *luminescence* pada *down-converter* berperan dalam meningkatkan efisiensi yang dicapai. Kenaikan nilai Voc sangat signifikan jika dilihat dalam Tabel 4.5, yang mengacu pada teori bahwa konsep *down-conversion* memperbaiki *thermalization loss* yang diindikasikan naiknya nilai Voc. Dalam kondisi maksimum tersebut, pencapaian nilai maksimum EQE dan IQE masing – masing mencapai 110 % dan 122,2 %. Untuk di luar kondisi maksimum pencapaian EQE dan IQE dibawah seratus persen, namun tetap mengalami peningkatan jika dibandingkan tanpa mengaplikasikan konsep *down-conversion*. Walaupun banyak faktor yang dipertimbangkan dalam eksperimen divais yang sebenarnya, seperti faktor *refractive indeks* (n) dan *absorbance* (α) yang dilakukan dalam refrensi [18].

Kemudian disimulasikan juga untuk intensitas pada sumber cahaya sekunder yang bervariasi. Pengaruh intensitas cahaya sekunder yang diasumsikan sebagai photon yang diemisikan oleh *down-converter* berperan dalam proses eksitasi dalam *solar cell*. Langkah simulasi yang dilakukan adalah sama seperti pada sub-Bab 4.3, dan Tabel 4.6 menunjukkan pencapaian efisiensi dari hasil simulasi yang dilakukan.

Tabel 4.6. Hasil keluaran dan efisiensi *solar cell* dengan aplikasi konsep *down-conversion* terhadap variasi intensitas cahaya sekunder.

Panjang Gelombang (nm)	Intensitas (W/cm ²)	Voc (Volts)	Short Circuit Ib (Amps)	Efisiensi (%)
600 - 770	0,01	0,5822	2,051	9,55
	0,02	0,593	2,135	10,12
	0,03	0,6011	2,217	10,66
	0,04	0,6079	2,297	11,17
	0,05	0,6134	2,374	11,65
	0,06	0,6179	2,450	12,11
	0,07	0,6219	2,526	12,56
	0,08	0,6253	2,603	13,02
	0,09	0,6284	2,678	13,46
	0,10	0,6312	2,751	13,89

Hasil dari Tabel 4.6 didapat dengan menaikkan intensitas cahaya sekunder dari $0,01 \text{ W/cm}^2$ sampai $0,1 \text{ W/cm}^2$, sedangkan intensitas cahaya primer ditentukan tetap sebesar $0,1 \text{ W/cm}^2$ dan dalam spektrum cahaya merah. Kemudian dari data Tabel 4.6 digambarkan secara grafik seperti pada Gambar 4.29 yang menunjukkan kenaikan efisiensi bergerak linier terhadap kenaikan intensitas cahaya sekunder yang diberikan. Hal tersebut serupa dengan simulasi yang dilakukan pada sub-Bab 4.3 untuk konsep *up-conversion*.



Gambar 4.29. Hasil efisiensi yang didapat dengan simulasi konsep *down-conversion* terhadap intensitas cahaya.

Untuk intensitas rendah seperti dalam kondisi cahaya matahari yang tidak terkonsentrasi, mayoritas *elektron-hole* pairs berekombinasi melalui dua buah transisi *intermediate level* [18]. Akan tetapi dengan menaikkan intensitas, rekombinasi melalui transisi *band-to-band* meningkat sehingga membuat material dengan karakteristik *down-conversion* dapat berlaku sebagai *up-converter* [18].