



**UNIVERSITAS INDONESIA**

***Analisis Konsep Up & Down - Conversion Menggunakan  
Secondary Light Source Sebagai Luminescence Untuk  
Meningkatkan Efisiensi Solar Cell***

**TESIS**

**LUKMAN ADITYA  
0706173263**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM MAGISTER  
DEPOK  
JULI 2009**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

***Analisis Konsep Up & Down – Conversion Menggunakan  
Secondary Light Source Sebagai Luminescence Untuk  
Meningkatkan Efisiensi Solar Cell***

**TESIS**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister**

**LUKMAN ADITYA  
0706173263**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
KEKHUSUSAN ELEKTRONIKA DIVAIS  
DEPOK  
JULI 2009**

## HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh

Nama : Lukman Aditya  
NPM : 0706173263  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul Tesis : Analisis Konsep *Up & Down – Conversion*  
Menggunakan *Secondary Light Source* Sebagai  
*Luminescence* Untuk Meningkatkan Efisiensi  
*Solar Cell*.

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Djoko Hartanto, M.Sc. ( )  
Penguji : Prof. Dr. Ir. Nji Raden Poespawati, MT. ( )  
Penguji : Ir. Purnomo Sidi Priambodo, M.Sc., Ph.D. ( )  
Penguji : Arief Udiharto, ST, MT. ( )

Ditetapkan di : Depok.

Tanggal : 30 Juli 2009.

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

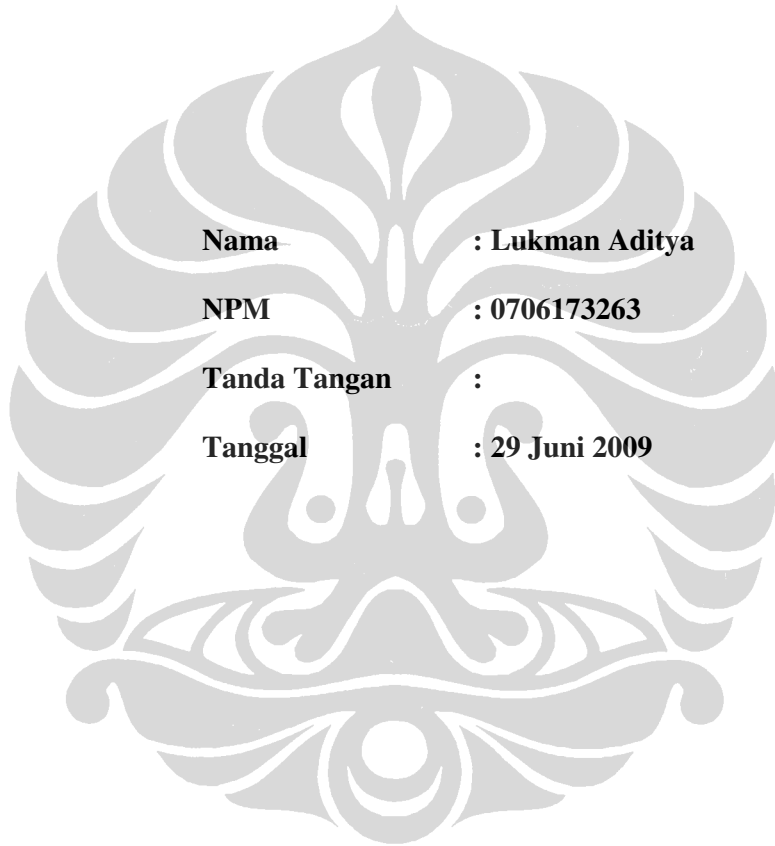
**Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Lukman Aditya**

**NPM : 0706173263**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 29 Juni 2009**



## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan Tesis ini. Penulisan Tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik Jurusan Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan Tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan Tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

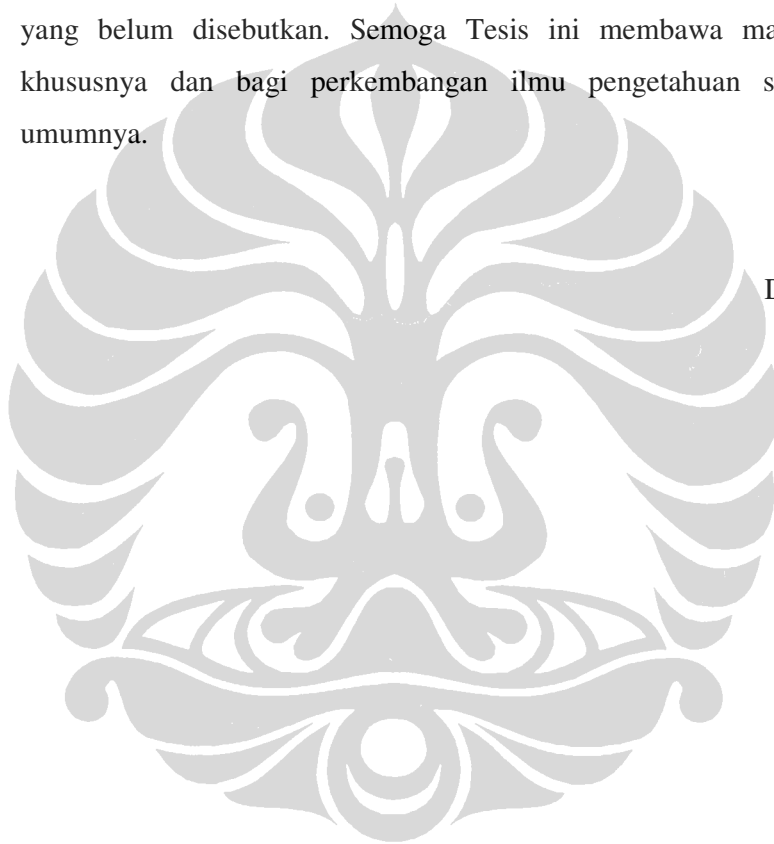
- 1) **Prof. Dr. Ir. Djoko Hartanto, M.Sc**, selaku dosen pembimbing yang telah menentukan judul penelitian ini sebagai bagian dari penelitian *sensor device research group*, serta bersedia meluangkan waktunya untuk memberikan petunjuk dan saran pada diskusi dalam penyelesaian penelitian ini.
- 2) Bapak Baruno Marsudi dan Ibu Trisnowati, selaku orang tua penulis yang telah memberikan dukungan moril maupun materil serta atas kasih sayangnya sehingga penulis dapat menyelesaikan perkuliahan dan Tesis ini.
- 3) Bapak Ir.Djiteng Marsudi yang telah memberikan dukungan material dan moral sehingga penulis dapat menyelesaikan perkuliahan dan penulisan Tesis.
- 4) Prof. M.A Green dari University of New South Wales yang telah memberikan literatur – literatur penting sebagai referensi dalam penulisan Tesis ini.
- 5) Para pengajar Universitas Indonesia khususnya para dosen Fakultas Teknik dari Departemen Elektro, atas pengajaran dan ilmu yang bermanfaat.
- 6) Ulfah Fitria, atas dukungan moral, perhatian dan kasih sayang kepada penulis hingga dapat menyelesaikan penulisan Tesis ini.

- 7) Para Sahabat seperjuangan, seperkuliahan, diantaranya Slamet M.B, dan Yohanes Calvinus yang telah memberikan motifasi dan inspirasi bagi penulis.
- 8) Teman – teman di Komplek TNI – AL Graha Jala Yudha yang telah memberikan dukungan moril kepada penulis.

Akhir kata, saya berdoa kepada Allah SWT agar berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu baik yang sudah disebutkan maupun yang belum disebutkan. Semoga Tesis ini membawa manfaat bagi penulis khususnya dan bagi perkembangan ilmu pengetahuan secara global pada umumnya.

Depok, 29 Juni 2009

Penulis.



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Lukman Aditya

NPM : 0706173263

Program Studi : Teknik Elektro

Departemen : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Tesis

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif ( *Non-exclusive Royalty Free Right* )** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

***Analisis Konsep Up & Down – Conversion Menggunakan Secondary Light Source Sebagai Luminescence Untuk Meningkatkan Efisiensi Solar Cell.***

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data ( *data base* ), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta  
Pada Tanggal : 29 Juni 2009  
Yang menyatakan

( Lukman Aditya )

## ABSTRAK

Nama : Lukman Aditya  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Analisis Konsep *Up & Down-Conversion* Menggunakan *Secondary Light Source* Untuk Meningkatkan Efisiensi *Solar Cell*.

Rugi-rugi (*losses*) pada saat terbentuknya pasangan elektron-hole (*e-h pairs*) di dalam *solar cell* adalah timbulnya *transmission-loss* dan *thermalization-loss*. Aplikasi konsep *up & down conversion* dibahas pada Tesis ini untuk mengurangi rugi – rugi tersebut sehingga perbaikan efisiensi *solar cell* bisa dicapai. Proses *up-conversion* melibatkan energi photon yang rendah dikonversi menghasilkan energi photon yang lebih tinggi untuk mengurangi *transmission loss*. *Down-conversion* melibatkan energi photon yang tinggi dikonversi menjadi energi photon yang lebih rendah untuk mengurangi *thermalization loss*.

Dalam riset ini dilakukan analisa dan simulasi terhadap aplikasi konsep *up/down-conversion* untuk mendapatkan perbaikan efisiensi pada *solar cell*. Dengan menggunakan simulator PC1D 5.9, sumber cahaya sekunder (*secondary light source*) diberikan dengan asumsi sebagai proses *luminescence* oleh *up/down-converter* masing – masing dari *rear surface* dan *front surface* sesuai dengan prinsip konversi photon pada aplikasi tersebut. Simulasi dilakukan dengan memberikan variasi spektrum cahaya secara transien pada cahaya sekunder dan variasi intensitas cahaya dengan batasan maksimum *terrestrial sun*  $0,1 \text{ W/cm}^2$ .

Efisiensi maksimum didapat sebesar 18,71% untuk aplikasi *up-converter*, dan 20,18% untuk aplikasi *down-converter* dengan kondisi matahari tak terkonsentrasi. Hasil simulasi konsep *up/down-conversion* tersebut menunjukkan dapat mengurangi rugi – rugi pada *solar cell* dan memperbaiki efisiensi untuk disain *solar cell*, dan dapat diaplikasikan untuk jenis *solar cell* konvensional yang ada sekarang.

Kata kunci : *Up & down-conversion, thermalization loss, transmission loss, sumber cahaya sekunder, efisiensi solar cell.*



## ABSTRACT

Name : Lukman Aditya  
Study Program: Electrical Engineering  
Title : Analysis of Up & Down-Conversion Concept Using Secondary Light Source As The Luminescence For Increasing Solar Cell Efficiency

The losses appeared when electron-hole pairs are formed in solar cell indicated as transmission and thermalization loss. The application of up/down-conversion concept is discussed in this Thesis, in order to reduce both loss, so the efficiency of solar cell can be improve. Up-conversion process involving two low energy photons converted into higher energy photon for reducing transmission loss. Down-conversion involving high energy photons converted into two lower energy photons for reducing thermalization loss.

In this research has been analyzed and simulated about up/down-conversion concept to achieved an improvement of solar cell efficiency. By using PC1D 5.9, a secondary light source is provided and it assumed as a luminescence from up/down-converter, which is directly emitted from front and rear surface according to each conversion process. The variation of secondary light intensity is given in this simulation with the maximum limits  $0,1 \text{ W/cm}^2$  of terrestrial sun.

Maximum efficiency obtained was 18.71% for the up-converter applications, and 20.18% for the down-converter applications with unconcentrated sun . The Results of applied up / down-conversion show can reduce losses in the solar cell and improve efficiency for solar cell design, and it can be applied also to the conventional solar cell.

Keywords : *Up/down-conversion, thermalization loss, transmission loss, secondary light source, solar cell efficiency.*

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI .....	vi
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	viii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiv
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang Masalah .....	1
1.2 Tujuan Penelitian .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Metode Penelitian .....	2
1.5 Sistematika Penulisan .....	3
<b>BAB 2 TEORI PENUNJANG .....</b>	<b>5</b>
2.1 Photon .....	5
2.2 Proses Absorpsi Elektron .....	6
2.3 Proses <i>Spontaneous Emission</i> .....	8
2.4 Efek <i>Photovoltaic</i> .....	9
2.5 Rugi – rugi Pada Proses <i>Generation</i> .....	10
2.6 Efisiensi Pada <i>Solar Cell</i> .....	11
2.6.1 Parameter <i>Short-Circuit (Isc)</i> .....	11
2.6.2 Parameter <i>Open-Circuit Voltage (Voc)</i> .....	13
2.6.3 Parameter <i>Fill Factor (FF)</i> .....	14
2.7 Efisiensi Kuantum .....	15
2.8 Konsep <i>Up / Down-Conversion</i> .....	16
2.8.1 Penerapan Konsep <i>Up-Conversion</i> .....	17

2.8.2	Material <i>Up-Converter</i> .....	18
2.8.3	Penerapan Konsep <i>Down-Conversion</i> .....	20
<b>BAB 3</b>	<b>KONSEP DASAR</b> .....	<b>21</b>
3.1	Konsep Dasar <i>Up / Down-Conversion</i> .....	21
3.2	Konsep <i>Up / Down-Conversion</i> Secara <i>Band Diagram</i> .....	23
3.2.1	Spektrum Cahaya Dalam Konsep <i>Up/down-Conversion</i> .	25
3.3	Proses Eksitasi dan Emisi Melibatkan <i>Level Energi Trap</i> Dalam <i>Up / Down-Converter</i> .....	28
3.4	Mekanisme Pada Proses <i>Up-conversion</i> .....	31
3.5	Aplikasi Konsep <i>Down-Conversion</i> .....	32
3.6	Aplikasi Konsep <i>Up-Conversion</i> .....	34
3.7	Simulai Konsep <i>Up / Down-Conversion</i> .....	37
<b>BAB 4</b>	<b>DISKUSI</b> .....	<b>40</b>
4.1	Aplikasi <i>Up &amp; Down-Converter</i> Pada <i>Solar cell</i> .....	40
4.2	Karakteristik <i>Up-Converter</i> .....	42
4.2.1	Konversi Spektrum Inframerah ke Cahaya Tampak .....	45
4.2.2	Material <i>Up-Converter</i> .....	47
4.2.3	Kalkulasi batasan efisiensi pada aplikasi <i>up-converter</i> ...	49
4.3	Analisa Simulasi <i>Solar Cell</i> dengan Aplikasi <i>Up-Converter</i> .....	54
4.4	Karakteristik <i>Down-Converter</i> .....	61
4.5	Material <i>Down-Converter</i> .....	64
4.6	Kalkulasi Batasan Efisiensi Pada Aplikasi <i>Down-Converter</i> .....	66
4.7	Analisa Simulasi <i>Solar Cell</i> Dengan Optimasi Cahaya Merah ....	70
<b>BAB 5</b>	<b>KESIMPULAN</b> .....	<b>76</b>
	<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>77</b>
	<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Konsep <i>up / down conversion</i> dengan <i>intermediate level</i> secara <i>band diagram</i> .....	2
Gambar 2.1	Proses absorpsi elektron pada bahan silikon (Si) .....	6
Gambar 2.2	Tingkat energi kristal <i>indirect band-gap</i> .....	7
Gambar 2.3	Rekombinasi elektron melibatkan emisi photon dengan energi sebesar $E_g$ .....	9
Gambar 2.4	Efek <i>photovoltaic</i> yang terjadi pada <i>solar cell</i> .....	9
Gambar 2.5	Mekanisme timbulnya rugi - rugi saat proses absorpsi .....	11
Gambar 2.6	Perbandingan photon <i>flux</i> cahaya matahari dengan panjang gelombang ( $\lambda$ ) tertentu berdasarkan distribusi energi pada saat AM0 dan AM1.5.....	12
Gambar 2.7	Batasan nilai <i>short-circuit</i> ( $I_{sc}$ ) yang dipengaruhi <i>band-gap</i> pada AM 0 dan AM 1.5 .....	12
Gambar 2.8	Efisiensi <i>solar cell</i> yang dapat diperoleh bergantung dari beberapa jenis material berbeda yang digunakan .....	14
Gambar 2.9	Grafik karakteristik untuk menentukan <i>fill factor</i> .....	14
Gambar 2.10	Struktur <i>solar cell</i> dengan penerapan konsep <i>up-conversion</i> .....	17
Gambar 2.11	Struktur <i>solar cell</i> dengan penerapan konsep <i>down-conversion</i> .....	20
Gambar 3.1	Struktur <i>solar cell</i> dengan aplikasi <i>down-converter</i> .....	21
Gambar 3.2	Struktur <i>solar cell</i> dengan aplikasi <i>up-converter</i> .....	22
Gambar 3.3	Mekanisme <i>losses</i> pada proses <i>electron absorption</i> .....	23.
Gambar 3.4	Karakteristik konsep <i>up/down-conversion</i> secara <i>band diagram</i> .....	24
Gambar 3.5	Spektrum cahaya yang melibatkan konsep <i>up - conversion</i> .....	26
Gambar 3.6	Spektrum cahaya yang melibatkan konsep <i>down - conversion</i> ..	27
Gambar 3.7	Diagram energi <i>band</i> dengan elektron <i>trap</i> pada Semikonduktor .....	29
Gambar 3.8	Proses dasar yang terjadi pada <i>trap</i> melibatkan elektron dan <i>hole</i> .....	29

Gambar 3.9	Tingkat energi <i>trivalen</i> erbium .....	30
Gambar 3.10	Tingkat energi $\text{Er}^{3+}$ menunjukkan <i>multi-step up-conversion</i> .....	31
Gambar 3.11	Tiga langkah proses ETU antara dua buah $\text{Er}^{3+}$ .....	32
Gambar 3.12	Lapisan plastik yang terdapat <i>quantum dot</i> diaplikasikan di atas permukaan <i>solar cell</i> .....	33
Gambar 3.13	Diagram tingkat energi pada sistem $\text{Gd}^{3+}$ - $\text{Eu}^{3+}$ , menunjukkan dua langkah transfer energi dari $\text{Gd}^{3+}$ ke $\text{Eu}^{3+}$ .....	33
Gambar 3.14	Skematik <i>up-converter</i> dengan enam proses optikal .....	35
Gambar 3.15	Struktur <i>solar cell</i> dan <i>up-converter</i> dengan <i>blackbody absorber</i> .....	36
Gambar 3.16	Skematik <i>solar cell</i> yang dibuat menggunakan PC1D 5.9 .....	37
Gambar 3.17	Skema simulasi aplikasi <i>up-converter</i> dengan simulator PC1D 5.9 .....	38
Gambar 3.18	Skema simulasi aplikasi <i>down-converter</i> dengan simulator PC1D 5.9 .....	39
Gambar 4.1	Spektrum dari cahaya matahari yang dapat diterima di Bumi .....	40
Gambar 4.2	Koefisien absorpsi dan <i>penetration depth</i> terhadap panjang gelombang pada berbagai macam jenis material semikonduktor .....	41
Gambar 4.3	Tingkat kedalaman absorpsi dari bahan Si terhadap panjang gelombang .....	41
Gambar 4.4	Konsep <i>up-conversion</i> secara <i>band-diagram</i> .....	42
Gambar 4.5	Spektrum cahaya pada proses <i>up-conversion</i> .....	44
Gambar 4.6	Skema Si- <i>solar cell</i> dengan aplikasi <i>up-conversion</i> .....	45
Gambar 4.7	Konversi inframerah ke cahaya tampak pada <i>up-converter</i> .....	46
Gambar 4.8	Spektrum cahaya konversi inframerah ke cahaya tampak .....	47
Gambar 4.9	Efisiensi pada <i>up-converter</i> dengan material $\text{NaYF}_4:\text{Er}^{3+}$ .....	48
Gambar 4.10	Representasi pada material <i>up-converter</i> .....	50
Gambar 4.11	Batasan maksimum untuk konversi energi surya dengan sistem <i>up-converter</i> dalam fungsi <i>band-gap</i> .....	52
Gambar 4.12	Perbandingan efisiensi dari UC dan <i>triple tandem solar cell</i> ....	54

Gambar 4.13	Penerapan konsep <i>up-conversion</i> untuk mengkonversi pada cahaya biru .....	55
Gambar 4.14	Skematik <i>solar cell</i> menggunakan simulator PC1D 5.9 .....	55
Gambar 4.15	Hasil grafik <i>I-V solar cell</i> yang optimum pada cahaya biru .....	56
Gambar 4.16	Pencapaian efisiensi yang didapat dengan simulasi terhadap variasi panjang gelombang tertentu .....	59
Gambar 4.17	Hasil efisiensi yang didapat dengan simulasi konsep <i>up-conversion</i> terhadap intensitas cahaya .....	60
Gambar 4.18	Konsep <i>down-conversion</i> secara <i>band-diagram</i> . Transisi radiasi melalui <i>intermediate level</i> (IL) .....	62
Gambar 4.19	Spektrum cahaya pada aplikasi <i>down-converter</i> .....	63
Gambar 4.20	Skema Si- <i>solar cell</i> dengan aplikasi <i>down-converter</i> .....	64
Gambar 4.21	Spektrum eksitasi dan emisi dari LiGdF <sub>4</sub> didoping Eu .....	65
Gambar 4.22	Skematik diagram energi <i>down-converter</i> pada <i>rear surface</i> ....	66
Gambar 4.23	Rangkaian ekivalen sistem <i>down-converter</i> pada <i>rear surface</i> ...	67
Gambar 4.24	Hasil kalkulasi untuk konversi energi surya dengan sistem <i>down-converter</i> dalam fungsi <i>band gap</i> .....	67
Gambar 4.25	Efisiensi <i>solar cell</i> dalam sistem <i>down-conversion</i> terhadap fungsi <i>refractive index n</i> .....	70
Gambar 4.26	Skematik <i>solar cell</i> dengan optimasi cahaya merah menggunakan PC1D 5.9 .....	71
Gambar 4.27	Hasil grafik <i>I - V</i> menggunakan simulator PC1D 5.9 .....	72
Gambar 4.28	Hasil pencapaian efisiensi dengan simulasi <i>down-conversion</i> terhadap variasi panjang gelombang cahaya sekunder .....	73
Gambar 4.29	Hasil efisiensi yang didapat dengan simulasi konsep <i>down-conversion</i> terhadap intensitas cahaya .....	75

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Jenis – jenis <i>host materials</i> yang didoping <i>rare earth</i> menunjukkan karakteristik <i>up-converter</i> yang dapat dibentuk .....	19
Tabel 4.1	Hasil Perhitungan jumlah photon dalam jangkauan panjang gelombang .....	49
Tabel 4.2	Batasan kalkulasi efisiensi pada <i>solar cell</i> dalam spektrum 1.5 AM untuk nilai energi <i>gap</i> yang berbeda .....	49
Tabel 4.3	Keluaran <i>solar cell</i> dan efisiensi dengan diberikan sumber cahaya sekunder dari <i>rear surface</i> .....	58
Tabel 4.4	Hasil perhitungan efisiensi <i>solar cell</i> dengan aplikasi <i>up-converter</i> terhadap variasi intensitas cahaya sekunder .....	60
Tabel 4.5	Hasil keluaran <i>solar cell</i> dan efisiensi dengan aplikasi konsep <i>down-conversion</i> menggunakan PC1D 5.9 .....	73
Tabel 4.6	Hasil keluaran dan efisiensi <i>solar cell</i> dengan aplikasi konsep <i>down-conversion</i> terhadap variasi intensitas cahaya sekunder ....	74