



**SIMULASI 2D KARAKTERISTIK  $J$ - $V$  SEL SURYA BERBASIS  
SILIKON KRISTAL PERSAMBUNGAN P-I-N  
PADA VARIASI KETEBALAN LAPISAN-I**

**SKRIPSI**

Oleh

**Imroatus Solihah  
NIM 131810201055**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS JEMBER**

**2018**



**SIMULASI 2D KARAKTERISTIK  $J$ - $V$  SEL SURYA BERBASIS  
SILIKON KRISTAL PERSAMBUNGAN P-I-N  
PADA VARIASI KETEBALAN LAPISAN-I**

**SKRIPSI**

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat  
untuk menyelesaikan studi di Progam Studi Ilmu Fisika (S1)  
dan mencapai gelar Sarjana Sains

Oleh

**Imroatus Solihah**  
**NIM 131810201055**

**JURUSAN FISIKA**  
**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**  
**UNIVERSITAS JEMBER**

**2018**

## PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan dengan penuh rasa cinta, syukur, dan terimakasih kepada:

1. Ibunda Jumaiyah dan ayahanda (alm) Qosim tercinta yang selalu mendoakan, memberikan restu dan pengorbanan, serta kesabaran dalam mendidik Ananda selama ini;
2. Kakak Masfufah dan (alm) kakak Sholahuddin yang selalu memberikan semangat, dukungan, doa dan motivasi selama ini;
3. Seluruh keluarga besar “Bani Qodim” yang telah memberikan dukungan, doa, dan nasehat yang sangat berguna;
4. Para pahlawan tanpa tanda jasa yang sejak taman kanak-kanak hingga perguruan tinggi yang telah mendidikku dengan penuh kesabaran dan perhatian;
5. Sahabat-sahabatku Yazella Feni Frahma, S.Si, Kholifatus Sa'diyah, Siti Mutmainah, Erlynda Hapsari yang telah memberikan semangat dan doa selama ini;
6. Tim Komputasi Material: Khoirul Anwar, S.Si, Yuningtyas Nely Kusuma Dewi, S.Si, Aprizal Faruchi, Dwi Indah Prabandari, Fitri Wahyu Islamy, Gutaminingsih, dan Lailatul Muawanah;
7. Keluarga besar Fisika angkatan 2013 yang telah memberikan keceriaan, semangat, dan motivasinya;
8. Almamater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

**MOTTO**

“Barang siapa yang kafir, dia sendirilah yang menanggung akibat kekafirannya itu; dan barang siapa yang berbuat kebajikan, berarti dia telah mempersiapkan tempat yang menyenangkan untuk dirinya.”  
(terjemahan Surat Ar-Rum ayat 44)<sup>\*)</sup>



---

<sup>\*)</sup> Departemen Agama Republik Indonesia. 1978. *Terjemah & Tafsir Al-Qur'an*. Bandung: Fa. SUMATRA

**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Imroatus Solihah

NIM : 131810201055

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Simulasi 2D Karakteristik  $J$ - $V$  Sel Surya Berbasis Silikon Kristal Persambungan p-i-n Pada Variasi Ketebalan Lapisan-i” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian bersama dosen dan mahasiswa dan hanya dapat dipublikasikan dengan mencantumkan nama dosen pembimbing.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 19 Januari 2018

Yang menyatakan,

Imroatus Solihah  
NIM 131810201055

**SKRIPSI**

**SIMULASI 2D KARAKTERISTIK  $J$ - $V$  SEL SURYA BERBASIS  
SILIKON KRISTAL PERSAMBUNGAN P-I-N  
PADA VARIASI KETEBALAN LAPISAN-I**

Oleh

Imroatus Solihah  
NIM 131810201055

Pembimbing:

Dosen Pembimbing Utama : Endhah Purwandari, S.Si., M.Si.

Dosen Pembimbing Anggota : Ir. Misto, M.Si.

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Simulasi 2D Karakteristik  $J$ - $V$  Sel Surya Berbasis Silikon Kristal Persambungan p-i-n Pada Variasi Ketebalan Lapisan-i” telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal :

tempat : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas  
Jember

**Tim Penguji**

Ketua,

Endhah Purwandari, S.Si., M.Si.  
NIP. 198111112005012001

Anggota II,

Agung T. Nugroho, S.Si., M.Phill., Ph.D.  
NIP. 196812191994021001

Anggota I,

Ir. Misto, M.Si.  
NIP. 195911211991031002

Anggota III,

Nurul Priyantari, S.Si., M.Si.  
NIP. 197003271997022001

Mengesahkan,  
Dekan,

Drs. Sujito, Ph.D.  
NIP. 196102041987111001

## RINGKASAN

**Simulasi 2D Karakteristik  $J-V$  Sel Surya Berbasis Silikon Kristal Persambungan  $p-i-n$  Pada Variasi Ketebalan Lapisan- $i$ ,** Imroatus Solihah, 131810201055; 2017: 61 halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

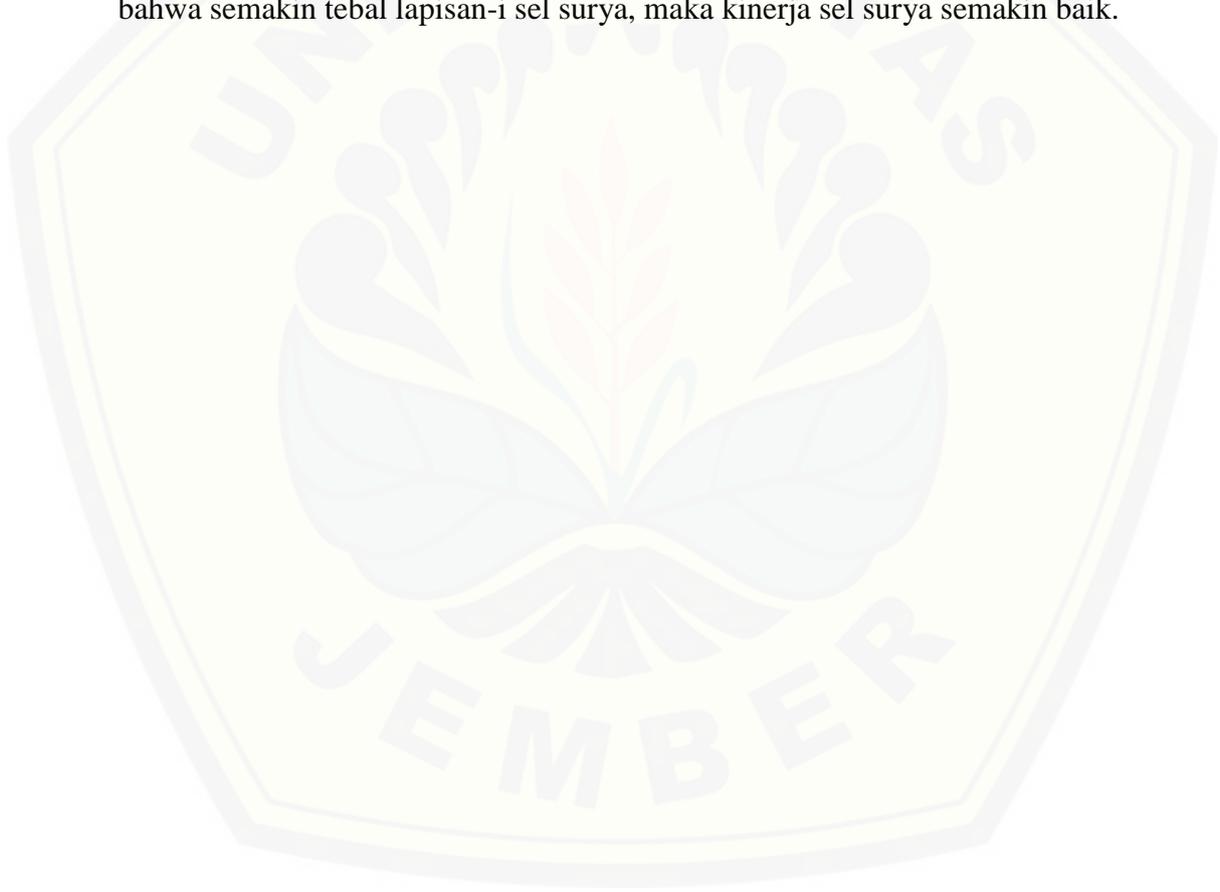
Energi memiliki peranan penting dalam kehidupan manusia, karena energi merupakan unsur penunjang dalam proses pertumbuhan ekonomi. Namun, kesediaan energi semakin menipis dikarenakan kebutuhan energi semakin lama semakin meningkat yang tidak diimbangi dengan kesediaan energi fosil. Terciptanya energi fosil membutuhkan waktu yang cukup lama. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu energi alternatif yang dapat memenuhi kebutuhan energi dalam kehidupan manusia. Salah satunya yaitu energi matahari yang dimanfaatkan dengan mendesain divais semikonduktor yang dapat mengubah langsung cahaya matahari menjadi energi listrik yang disebut sebagai sel surya. Foton dari matahari yang jatuh ke permukaan sel surya itu diserap, apabila bahan sel surya memiliki energi *gap* lebih besar dari pada energi foton. Silikon merupakan salah satu bahan sel surya yang memiliki kemampuan untuk menyerap foton, karena memiliki keteraturan susunan atom. Sel surya dapat disusun dalam persambungan  $p-i-n$ , dimana di dalam lapisan- $i$  terjadi proses generasi dan rekombinasi. Semakin banyak proses generasi yang terjadi maka semakin banyak pula rapat arus yang didapatkan. Oleh karena itu, ketebalan lapisan- $i$  dapat diatur untuk mendapatkan proses generasi yang semakin banyak pula sehingga karakteristik rapat arus-tegangan yang didapatkan semakin baik.

Simulasi terkait pengaruh ketebalan lapisan- $i$  terhadap karakteristik rapat arus-tegangan sel surya dengan persambungan  $p-i-n$  menggunakan metode elemen hingga dalam bentuk 1D telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Simulasi tersebut menghasilkan rapat arus dan tegangan masing-masing sebesar 0,0526 mA/cm dan 0,025 volt. Nilai tersebut merupakan nilai yang sangat kecil untuk bahan silikon kristal, impuritas yang diaplikasikan pada persamaan poisson dalam penelitian tersebut tidak sesuai dengan keadaan setiap lapisan. Impuritas yang diinputkan pada ketiga lapisan semua sama. Berdasarkan penelitian tersebut, tidak menunjukkan kesesuaian yang baik maka pada penelitian ini dilakukan simulasi pengaruh ketebalan lapisan- $i$  terhadap karakteristik rapat arus-tegangan sel surya berbasis silikon persambungan  $p-i-n$  dalam bentuk 2D. Variasi ketebalan lapisan- $i$  yang dilakukan yaitu 1  $\mu\text{m}$  sampai 15  $\mu\text{m}$ , sedangkan lapisan- $p$  dan lapisan- $n$  dibuat tetap yaitu 0,4  $\mu\text{m}$ . Tujuan dari penelitian tersebut adalah untuk menghasilkan profil distribusi pembawa muatan dan karakteristik rapat arus-tegangan ( $J-V$ ).

Kegiatan penelitian diawali dengan mengatur geometri dalam bentuk 2D dari sel surya, geometri terdiri dari tiga daerah subdomain yaitu lapisan- $p$ , lapisan- $i$ , dan lapisan- $n$ . Kemudian memasukkan parameter input, parameter yang digunakan sesuai dengan bahan silikon kristal ( $c\text{-Si}$ ). Tahap selanjutnya mendapatkan solusi persamaan poisson dan kontinuitas, sehingga diperoleh hasil

distribusi pembawa muatan baik elektron dan *hole*. Distribusi pembawa muatan yang diperoleh digunakan untuk menggambarkan karakteristik rapat arus-tegangan dari perangkat sel surya.

Hasil simulasi yang diperoleh berupa profil distribusi pembawa muatan dan kurva karakteristik rapat arus-tegangan. Profil distribusi yang diperoleh menunjukkan bahwa konsentrasi elektron tertinggi terletak pada lapisan-n, dengan nilai sekitar  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  dan konsentrasi *hole* tertinggi terletak pada lapisan-p, dengan nilai sekitar  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Hasil tersebut bersesuaian dengan referensi dimana lapisan-p mempunyai *hole* sebagai pembawa muatan mayoritas dan lapisan-n mempunyai elektron sebagai pembawa muatan mayoritas. Kurva karakteristik rapat arus-tegangan (*J-V*) yang diperoleh pada ketebalan lapisan-i sebesar  $15 \mu\text{m}$  memiliki rapat arus yang lebih tinggi dibandingkan dengan variasi ketebalan lapisan-i lainnya. Besar rapat arus dan tegangan pada ketebalan tersebut masing-masing yaitu sebesar  $36,50 \text{ mA/cm}$  dan  $0,45 \text{ volt}$ . Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin tebal lapisan-i sel surya, maka kinerja sel surya semakin baik.



## PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi berjudul “Simulasi 2D Karakteristik  $J$ - $V$  Sel Surya Berbasis Silikon Kristal Persambungan p-i-n Pada Variasi Ketebalan Lapisan-i”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan satu (S1) pada Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, dukungan, bimbingan, serta doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Endhah Purwandari, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama (DPU) dan Ir. Misto, M.Si., selaku Dosen Pembimbing Anggota (DPA), yang telah meluangkan waktu, pikiran, tenaga, serta perhatian dalam membantu dan membimbing penulis dari awal hingga terselesaikannya skripsi ini;
2. Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M.Phill., Ph.D., selaku Dosen Penguji Utama dan Nurul Priyantari, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji Anggota, atas segala masukan, kritik serta saran yang telah diberikan demi kesempurnaan penulisan skripsi ini;
3. Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si. selaku ketua Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember;
4. Almamater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember;
5. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Jember, Januari 2018

Penulis

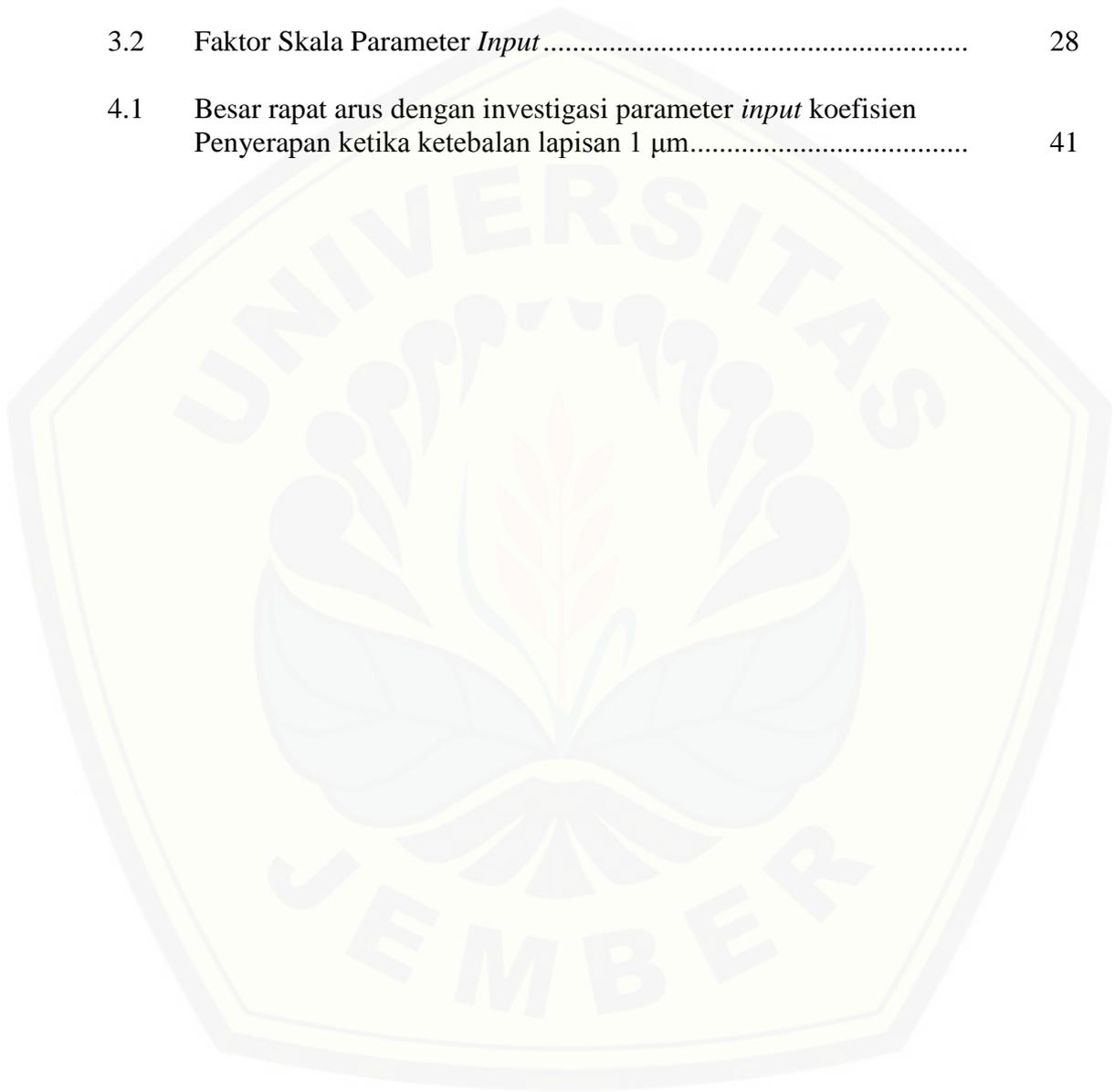
**DAFTAR ISI**

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	ii
<b>HALAMAN MOTTO</b> .....	iii
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	iv
<b>HALAMAN PEMBIMBINGAN</b> .....	v
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	vi
<b>RINGKASAN</b> .....	vii
<b>PRAKATA</b> .....	ix
<b>DAFTAR ISI</b> .....	x
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xv
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	4
<b>1.3 Batasan Masalah</b> .....	4
<b>1.4 Tujuan</b> .....	4
<b>1.5 Manfaat</b> .....	4
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	5
<b>2.1 Radiasi Matahari</b> .....	5
<b>2.2 Sel Surya</b> .....	7
<b>2.3 Kristal Silikon (c-Si)</b> .....	9
<b>2.4 Tipe Persambungan p-i-n dari Sel Surya berbasis c-Si</b> .	10
<b>2.5 Pengaruh Ketebalan Lapisan-i pada Sel Surya</b> .....	11
<b>2.6 Persamaan Dasar Semikonduktor</b> .....	15
2.6.1 Persamaan Poisson .....	15
2.6.2 Persamaan Kontinuitas .....	16
2.6.3 Persamaan Rapat Arus dalam Semikonduktor. ....	17

2.7	Karakteristik Sel Surya .....	19
2.8	Analisis Numerik menggunakan Metode Elemen Hingga.....	20
<b>BAB 3. METODE PENELITIAN.....</b>		<b>22</b>
3.1	Rancangan Kegiatan Penelitian.....	22
3.2	Jenis dan Sumber Data Penelitian.....	23
3.3	Definisi Operasional Variabel dan Skala Pengukuran ..	23
3.4	Kerangka Pemecahan Masalah.....	24
3.4.1	Kajian Pustaka.....	24
3.4.2	Mekanisme Simulasi.....	25
3.4.3	Metode Analisis Data.....	31
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>		<b>33</b>
4.1	Profil Distribusi Pembawa Muatan.....	33
4.1.1	Distribusi Konsentrasi Elektron.....	33
4.1.2	Distribusi Konsentrasi <i>Hole</i> .....	35
4.2	Karakteristik Rapat Arus-Tegangan ( <i>J-V</i> ) Sel Surya Berbasis Silikon Kristal ( <i>c-Si</i> ) Pada Variasi Ketebalan Lapisan- <i>i</i> .....	36
<b>BAB 5. PENUTUP.....</b>		<b>43</b>
5.1	Kesimpulan .....	43
5.2	Saran.....	43
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>		<b>44</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>		<b>47</b>

**DAFTAR TABEL**

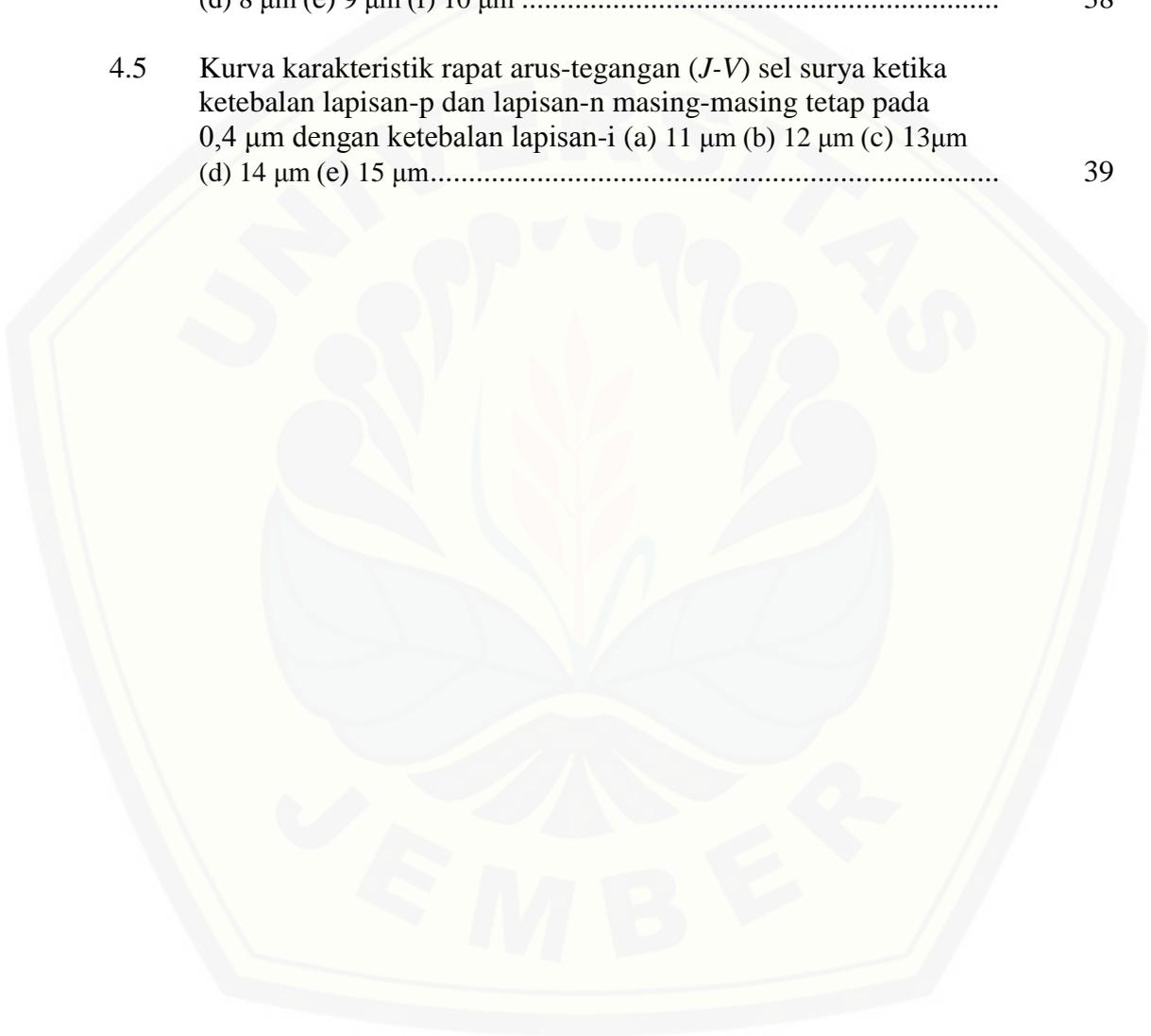
	Halaman
3.1 Parameter <i>Input</i> .....	28
3.2 Faktor Skala Parameter <i>Input</i> .....	28
4.1 Besar rapat arus dengan investigasi parameter <i>input</i> koefisien Penyerapan ketika ketebalan lapisan 1 $\mu\text{m}$ .....	41



**DAFTAR GAMBAR**

	Halaman
2.1 Penggunaan energi di Indonesia.....	5
2.2 Spektrum radiasi matahari.....	7
2.3 Proses konversi energi matahari menjadi listrik pada sel surya. ....	8
2.4 Struktur atom silikon.....	9
2.5 Skema struktur c-Si .....	10
2.6 Karakteristik sel surya n-i-p dengan ketebalan lapisan-i yang berbeda .....	12
2.7 Karakteristik <i>J-V</i> sel surya a-Si:H pada variasi ketebalan lapisan-i dengan ketebalan lapisan-p dan lapisan-n 250 amstrong .....	13
2.8 Karakteristik arus-tegangan sel surya c-Si variasi ketebalan lapisan-i.....	14
2.9 Karakteristik <i>J-V</i> Sel Surya .....	19
3.1 Diagram alir rancangan kegiatan penelitian.....	23
3.2 Alur simulasi penentuan karakteristik <i>J-V</i> sel surya berbasis c-Si persambungan p-i-n pada variasi ketebalan lapisan-i	25
3.3 Geometri divais sel surya material silikon kristal (c-Si) stuktur 2D .....	26
3.4 Pembagian geometri divais sel surya material silikon kristal (c-Si) stuktur 2D .....	27
4.1 Hasil simulasi 2D profil distribusi konsentrasi elektron sel surya berbasis silikon kristal (c-Si) persambungan p-i-n dengan ketebalan 0,4 $\mu\text{m}$ / 1 $\mu\text{m}$ / 0,4 $\mu\text{m}$ dan tegangan keluaran 0 volt .....	33
4.2 Hasil simulasi 2D profil distribusi konsentrasi <i>hole</i> sel surya berbasis silikon kristal (c-Si) persambungan p-i-n dengan ketebalan 0,4 $\mu\text{m}$ / 1 $\mu\text{m}$ / 0,4 $\mu\text{m}$ dan tegangan keluaran 0 volt .....	35

4.3	Kurva karakteristik rapat arus-tegangan ( $J-V$ ) sel surya ketika ketebalan lapisan-p dan lapisan-n masing-masing tetap pada $0,4 \mu\text{m}$ dengan ketebalan lapisan-i (a) $1 \mu\text{m}$ (b) $2 \mu\text{m}$ (c) $3 \mu\text{m}$ (d) $4 \mu\text{m}$ .....	37
4.4	Kurva karakteristik rapat arus-tegangan ( $J-V$ ) sel surya ketika ketebalan lapisan-p dan lapisan-n masing-masing tetap pada $0,4 \mu\text{m}$ dengan ketebalan lapisan-i (a) $5 \mu\text{m}$ (b) $6 \mu\text{m}$ (c) $7 \mu\text{m}$ (d) $8 \mu\text{m}$ (e) $9 \mu\text{m}$ (f) $10 \mu\text{m}$ .....	38
4.5	Kurva karakteristik rapat arus-tegangan ( $J-V$ ) sel surya ketika ketebalan lapisan-p dan lapisan-n masing-masing tetap pada $0,4 \mu\text{m}$ dengan ketebalan lapisan-i (a) $11 \mu\text{m}$ (b) $12 \mu\text{m}$ (c) $13 \mu\text{m}$ (d) $14 \mu\text{m}$ (e) $15 \mu\text{m}$ .....	39



DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
4.1 Tabel perhitungan rapat arus total yang dihasilkan sel surya pada ketebalan lapisan-i 1 $\mu\text{m}$ untuk seluruh nilai tegangan <i>ouput</i> .....	47
4.2 Tabel perhitungan rapat arus total yang dihasilkan sel surya pada ketebalan lapisan-i 2 $\mu\text{m}$ untuk seluruh nilai tegangan <i>ouput</i> .....	48
4.3 Tabel perhitungan rapat arus total yang dihasilkan sel surya pada ketebalan lapisan-i 3 $\mu\text{m}$ untuk seluruh nilai tegangan <i>ouput</i> .....	49
4.4 Tabel perhitungan rapat arus total yang dihasilkan sel surya pada ketebalan lapisan-i 4 $\mu\text{m}$ untuk seluruh nilai tegangan <i>ouput</i> .....	50
4.5 Tabel perhitungan rapat arus total yang dihasilkan sel surya pada ketebalan lapisan-i 5 $\mu\text{m}$ untuk seluruh nilai tegangan <i>ouput</i> .....	51
4.6 Tabel perhitungan rapat arus total yang dihasilkan sel surya pada ketebalan lapisan-i 6 $\mu\text{m}$ untuk seluruh nilai tegangan <i>ouput</i> .....	52
4.7 Tabel perhitungan rapat arus total yang dihasilkan sel surya pada ketebalan lapisan-i 7 $\mu\text{m}$ untuk seluruh nilai tegangan <i>ouput</i> .....	53
4.8 Tabel perhitungan rapat arus total yang dihasilkan sel surya pada ketebalan lapisan-i 8 $\mu\text{m}$ untuk seluruh nilai tegangan <i>ouput</i> .....	54
4.9 Tabel perhitungan rapat arus total yang dihasilkan sel surya pada ketebalan lapisan-i 9 $\mu\text{m}$ untuk seluruh nilai tegangan <i>ouput</i> .....	55
4.10 Tabel perhitungan rapat arus total yang dihasilkan sel surya pada ketebalan lapisan-i 10 $\mu\text{m}$ untuk seluruh nilai tegangan <i>ouput</i> .....	56
4.11 Tabel perhitungan rapat arus total yang dihasilkan sel surya pada ketebalan lapisan-i 11 $\mu\text{m}$ untuk seluruh nilai tegangan <i>ouput</i> .....	57
4.12 Tabel perhitungan rapat arus total yang dihasilkan sel surya pada ketebalan lapisan-i 12 $\mu\text{m}$ untuk seluruh nilai tegangan <i>ouput</i> .....	58
4.13 Tabel perhitungan rapat arus total yang dihasilkan sel surya pada ketebalan lapisan-i 13 $\mu\text{m}$ untuk seluruh nilai tegangan <i>ouput</i> .....	59
4.14 Tabel perhitungan rapat arus total yang dihasilkan sel surya pada ketebalan lapisan-i 14 $\mu\text{m}$ untuk seluruh nilai tegangan <i>ouput</i> .....	60

- 4.15 Tabel perhitungan rapat arus total yang dihasilkan sel surya pada ketebalan lapisan-i 15  $\mu\text{m}$  untuk seluruh nilai tegangan *ouput*...... 61



## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi di dunia khususnya di Indonesia pada umumnya terus meningkat dari tahun ke tahun seiring dengan penambahan penduduk, pertumbuhan ekonomi dan pola konsumsi energi itu sendiri. Namun selama ini hampir semua kebutuhan energi masih bergantung pada bahan bakar fosil. Untuk menanggapi masalah yang muncul tentang kebutuhan energi, maka dibutuhkan suatu energi alternatif untuk memasok kebutuhan energi, salah satunya adalah energi yang bersumber dari matahari. Pemanfaatan energi matahari merupakan satu diantara sumber energi yang dapat dimanfaatkan untuk memasok kebutuhan energi sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Selain tersedia secara gratis pemanfaatan energi matahari ini sebagai salah satu upaya untuk mengurangi kebergantungan manusia terhadap bahan bakar fosil yakni batubara, minyak bumi dan gas alam yang masih digunakan untuk sumber energi PLN. Potensi dari energi matahari dapat memberikan sumbangan yang besar, apabila dapat dimanfaatkan secara optimal dengan mendesain suatu divais pengubah energi yang dapat mensuplai kebutuhan energi. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu divais semikonduktor yang dapat mengkonversi langsung cahaya matahari menjadi energi listrik yang disebut sel surya (Fishbane *et al.*, 1996).

Sel surya merupakan salah satu sumber penghasil energi listrik bersumber dari cahaya matahari yang tidak terbatas dan ramah lingkungan. Proses konversi cahaya matahari menjadi energi listrik disebut dengan fotovoltaiik. Matahari yang terdiri dari foton jatuh ke permukaan bahan sel surya sebagian akan diserap, dipantulkan, dan dilewatkan. Foton yang memiliki energi *band gap* lebih besar dapat membebaskan elektron dari ikatan atomnya, sehingga timbul arus listrik. Silikon merupakan bahan dasar pembuatan sel surya yang memiliki energi *gap* sekitar 1,11 eV, sehingga memiliki kemampuan untuk menyerap spektrum matahari lebih banyak dari pada bahan yang lain (Ibrahim, 2011).

Silikon merupakan bahan semikonduktor yang paling sering digunakan karena ketersediaannya yang sangat melimpah di alam. Berdasarkan hasil

eksperimen Sze (2007) efisiensi konversi energi sel surya dengan bahan silikon kristal (c-Si) memiliki efisiensi sebesar 22%. Sel surya dengan bahan silikon kristal mampu menghasilkan konduktivitas yang cukup besar saat proses konversi fotovoltaiik karena memiliki keteraturan susunan atom dan sifat listrik yang cukup baik.

Sel surya dapat disusun dalam bentuk persambungan p-i-n, dimana lapisan-i adalah lapisan aktif yang dapat menciptakan pembawa muatan. Persambungan p-i-n sering diaplikasikan pada bahan silikon amorf. Dalam lapisan-i efisiensi konversi sel surya silikon amorf ditentukan oleh rapat keadaan terlokalisasi yang dapat diatasi dengan mengatur ketebalan lapisan-i. Semakin tebal lapisan-i, foton yang diserap semakin banyak, sehingga lebih efisien untuk penyerapan cahaya. Akan tetapi dampak negatifnya, terlalu tebal lapisan-i dapat memperkecil medan listrik antara lapisan-p dan lapisan-n (Usman, 2006).

Kinerja dari sel surya dapat dilihat berdasarkan kurva karakteristik rapat arus-tegangan yang dihasilkan. Kurva karakteristik sel surya menjadi parameter sel surya, semakin besar rapat arus dan tegangan yang dihasilkan semakin baik kinerja dari sel surya. Hasil eksperimen Stulik dan Singh (1998) mengenai ketebalan lapisan-i pada sel surya silikon amorf, menunjukkan bahwasanya lapisan-i yang lebih tebal dapat lebih efisien dalam penyerapan cahaya, sehingga menghasilkan sel surya dengan karakteristik yang baik. Untuk mengetahui karakteristik rapat arus-tegangan pada sel surya tidak hanya dilakukan dengan kegiatan eksperimen, namun dapat pula dilakukan melalui kajian teori dari hasil simulasi. Oleh karena kegiatan eksperimen membutuhkan biaya yang cukup mahal, maka dilakukan optimalisasi beberapa parameter deposisi bahan dalam upaya mendapatkan bahan dengan karakteristik rapat arus-tegangan yang baik secara simulasi, sehingga meminimalisir biaya yang dibutuhkan.

Simulasi pengaruh ketebalan lapisan-i pada perhitungan karakteristik rapat arus-tegangan sel surya dengan persambungan p-i-n menggunakan metode elemen hingga dalam bentuk 1D telah dilakukan oleh Herawati (2014). Variasi ketebalan lapisan-i yang digunakan dimulai dari 1  $\mu\text{m}$  – 3  $\mu\text{m}$  dengan kelipatan 1  $\mu\text{m}$ . Simulasi tersebut menghasilkan kurva karakteristik rapat arus-tegangan dengan

tegangan hubung terbuka ( $V_{oc}$ ) sebesar 0,025 volt. Besar tegangan hubung terbuka tersebut merupakan nilai yang sangat kecil untuk bahan silikon. Simulasi karakteristik sel surya persambungan p-n dengan bahan silikon kristal telah dilakukan oleh Fitriana (2014) yang menghasilkan nilai tegangan hubung terbuka sebesar 0,4 volt. Dengan bahan yang sama yaitu silikon kristal, hasil tegangan hubung terbuka persambungan p-i-n yang diperoleh seharusnya lebih besar nilainya atau sama dengan persambungan p-n. Impuritas atau fungsi dopan yang diaplikasikan pada persamaan poisson dalam simulasi Herawati (2014) tidak sesuai dengan keadaan setiap lapisan. Impuritas yang diinputkan pada ketiga lapisan semua sama. Seharusnya pembawa muatan pada lapisan-p didominasi oleh *hole*, sedangkan pembawa muatan pada lapisan-n didominasi oleh elektron (Daniellson, 2000).

Berdasarkan latar belakang tersebut pada penelitian ini akan dilakukan simulasi 2D karakteristik rapat arus-tegangan sel surya berbasis silikon kristal persambungan p-i-n pada variasi ketebalan lapisan-i. Variasi ketebalan lapisan-i yang dilakukan lebih dari 3  $\mu\text{m}$  yaitu 1  $\mu\text{m}$  - 15  $\mu\text{m}$  dengan kelipatan 1  $\mu\text{m}$ . Hal tersebut dilakukan karena untuk mengetahui seberapa besar kemampuan lapisan-i untuk meningkatkan rapat arus yang diperoleh. Pemodelan numerik pada simulasi ini menggunakan metode elemen hingga (MEH). Kelebihan dari metode elemen hingga mampu memodelkan material semikonduktor yang memiliki bentuk geometri tidak teratur. Selain itu, mampu mendefinisikan distribusi medan listrik dan pembawa muatan yang tidak linier dalam setiap bagiannya. Parameter yang digunakan pada simulasi ini adalah parameter yang didapatkan dari hasil eksperimen dan simulasi yang telah ada. Parameter tersebut diaplikasikan pada persamaan dasar semikonduktor yaitu persamaan poisson dan persamaan kontinuitas. Hasil dari penelitian ini yaitu profil distribusi pembawa muatan dan kurva karakteristik rapat arus-tegangan. Simulasi perhitungan karakteristik rapat arus-tegangan dihitung berdasarkan profil distribusi pembawa muatan baik elektron maupun *hole*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan, rumusan masalah yang dibahas dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh variasi ketebalan lapisan-i terhadap karakteristik rapat arus-tegangan sel surya berbasis silikon kristal persambungan p-i-n dalam bentuk 2D?

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Geometri sel surya dimodelkan dalam bentuk 2D;
2. Struktur bahan yang disimulasikan adalah silikon kristal (c-Si);
3. Metode yang digunakan adalah metode elemen hingga, karena metode elemen hingga mampu memodelkan material semikonduktor yang memiliki bentuk geometri tidak teratur dan mampu mendefinisikan distribusi medan listrik dan pembawa muatan yang tidak linier dalam setiap bagiannya;
4. Parameter temperatur pada simulasi ini sebesar 300K, karena temperatur tersebut merupakan temperatur operasional dari penggunaan sel surya.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh variasi ketebalan lapisan-i terhadap karakteristik rapat arus-tegangan sel surya berbasis silikon kristal persambungan p-i-n dalam bentuk 2D.

## 1.5 Manfaat Penelitian

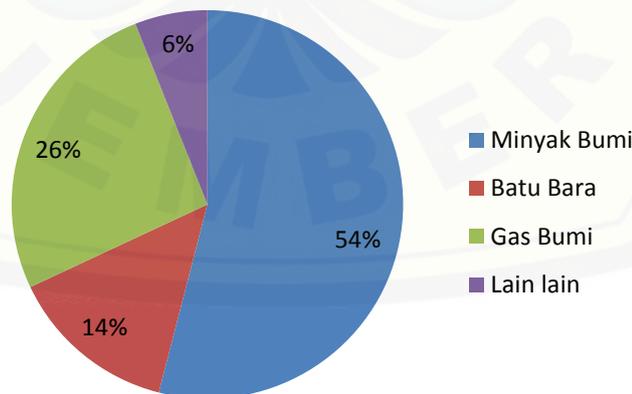
Beberapa manfaat yang diharapkan pada penelitian ini adalah:

1. Memberikan informasi tentang pengaruh variasi ketebalan lapisan-i terhadap karakteristik rapat arus-tegangan pada sel surya berbasis silikon kristal
2. Dapat meminimalisir tahap penelitian yang dilakukan pada tahap fabrikasi sel surya secara eksperimen

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Radiasi Matahari

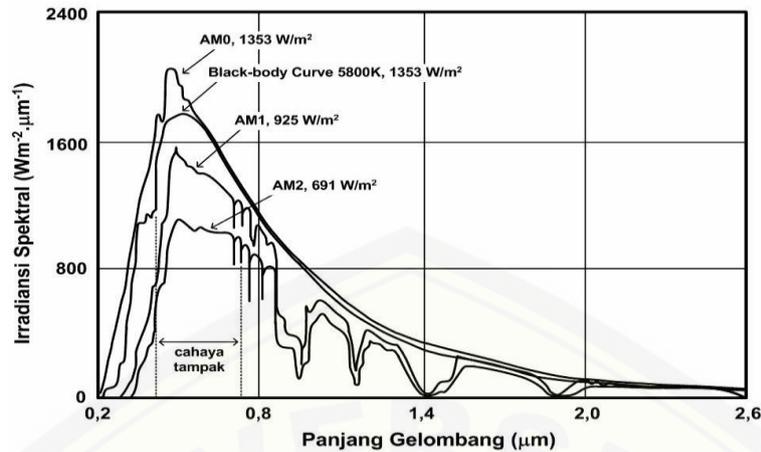
Kehidupan manusia semakin lama semakin bergantung kepada energi, karena energi merupakan unsur penunjang yang sangat penting dalam proses pertumbuhan ekonomi. Namun energi pada masa yang akan datang masih bergantung pada energi fosil yang semakin menipis ketersediaannya. Energi fosil merupakan energi yang tidak dapat diperbaharui, sehingga dibutuhkan waktu jutaan tahun untuk menciptakannya. Diperkirakan pemakaian energi di dunia hingga tahun 2025 akan masih didominasi bahan bakar fosil yakni minyak, gas alam dan batubara. Kecenderungan seperti ini pun juga terjadi di Indonesia. Data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, yang dapat dilihat pada Gambar 2.1 menunjukkan bahwa minyak bumi mendominasi 54 persen penggunaan energi di Indonesia. Sedangkan penggunaan gas bumi sebesar 26,5 persen dan batubara hanya 14 persen dari total penggunaan energi. Kementerian Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral juga menyebutkan bahwa cadangan minyak bumi Indonesia hanya cukup untuk 18 tahun ke depan, sementara cadangan gas bumi masih mencukupi untuk 61 tahun ke depan dan cadangan batu bara habis dalam waktu 147 tahun lagi (Kemen ESDM, 2011).



Gambar 2.1 Penggunaan energi di Indonesia (Sumber: Kemen ESDM, 2011)

Sumber energi terbesar adalah radiasi matahari yang berasal dari reaksi fusi nuklir. Penggunaan sumber energi matahari ini mempunyai beberapa keuntungan antara lain tersedianya sumber energi yang cuma-cuma, ramah lingkungan sehingga bebas polusi, dan tak terbatas. Radiasi matahari adalah energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh matahari ke permukaan bumi. Energi yang ditransmisikan dalam bentuk radiasi elektromagnetik kurang lebih  $4 \times 10^{20} \text{ J/det}$  yang berada pada rentang panjang gelombang 0.2 sampai 3.0 mikrometer (tanpa melewati atmosfer), sedangkan yang melewati atmosfer bumi berkisar antara 0.32 sampai 2.53 mikrometer (Sze, 2007). Setiap spektrum memiliki besar intensitas radiasi yang berbeda, tergantung kondisi spektrum radiasi matahari. Ketika spektrum radiasi matahari yang sampai ke bumi tanpa melewati atmosfer, maka intensitas radiasi besar yaitu  $1353 \text{ W/m}^2$ . Sedangkan spektrum radiasi matahari yang sampai ke bumi melewati atmosfer maka intensitas radiasi menurun yaitu  $925 \text{ W/m}^2$ . Akan tetapi, besarnya intensitas radiasi matahari hanya mencapai  $691 \text{ W/m}^2$  yang mengenai permukaan bumi (Szlufcik *et al.*, 1997).

Menurut Ariswan (2008), sebanyak 7 % energi matahari berupa *ultraviolet* (Air Mass 0), 47 % adalah *visible* (cahaya tampak memiliki panjang gelombang 0.4 mikrometer sampai 0.75 mikrometer), dan 46 % merupakan cahaya *infrared*. Spektrum panjang gelombang cahaya matahari akan menentukan beberapa jenis teknologi konversi yang sesuai. Teknologi yang dimaksud adalah pembuatan piranti-piranti berbasis tenaga surya. Ariswan (2008) juga menyebutkan bahwa konversi energi surya menjadi energi lain dapat dibedakan menjadi tiga proses yaitu proses *heliochemical*, *heliothermal*, dan *helioelectrical*. Proses *heliochemical* terjadi pada proses fotosintesis. Proses ini merupakan sumber dari semua bahan bakar fosil. Proses *heliothermal* adalah penyerapan (absorpsi) radiasi matahari dan secara langsung dikonversi menjadi energi termal. Sedangkan proses *helioelectrical* adalah produksi listrik oleh sel-sel surya dan disebut juga efek fotovoltaiik.



Gambar 2.2 Spektrum radiasi matahari (Sumber: Szlufcik *et al.*, 1997)

## 2.2 Sel Surya

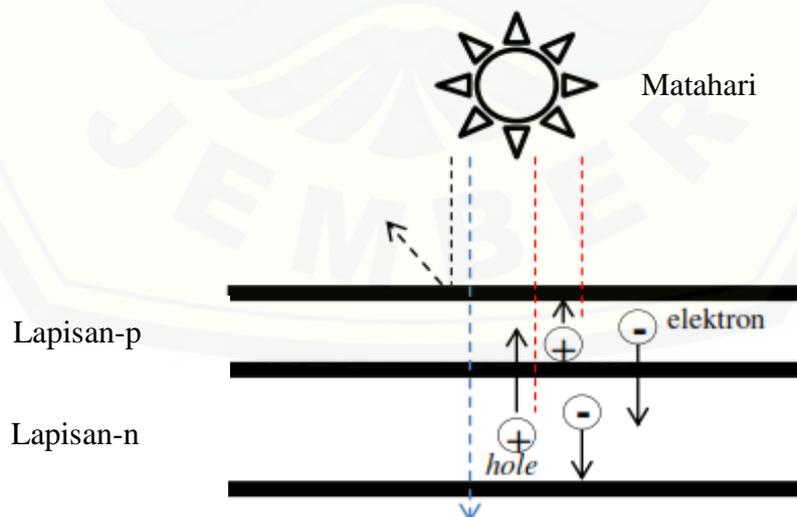
Penelitian sel surya diawali dari penelitian efek fotovoltaiik yang pertama kali dilakukan oleh seorang peneliti Perancis, Alexander Edmond Becquerel pada tahun 1839 yang mendeteksi bahwa ketika sinar matahari mengenai elektroda pada larutan elektrolit terdapat tegangan foton. Kemudian baru tahun 1912 Einstein menjelaskan secara teori, mekanisme fenomena tersebut, namun masih sebatas eksperimen di laboratorium. Selanjutnya dilakukan pengembangan efek fotovoltaiik menjadi sel surya dengan bahan semikonduktor oleh para peneliti dari *Bell Laboratories* pada tahun 1954 (Sze, 1981).

Sebelum energi sampai ke permukaan bumi, energi matahari melakukan proses konversi menjadi energi listrik melalui mekanisme fotovoltaiik pada suatu alat yang disebut sel surya (*Solar Cell*). Keuntungan penggunaan alat sel surya pada konversi melalui mekanisme fotovoltaiik diantaranya (Wolf, 1991):

1. Mengkonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik secara langsung;
2. Ramah lingkungan, tanpa emisi saat dioperasikan, dan tidak memerlukan bahan bakar;
3. Dapat digunakan di mana-mana dan dapat diintegrasikan pada bangunan ataupun kontruksi yang lain;

4. Berbentuk modular sehingga jumlah sel surya yang dipakai dapat disesuaikan dengan kebutuhan.

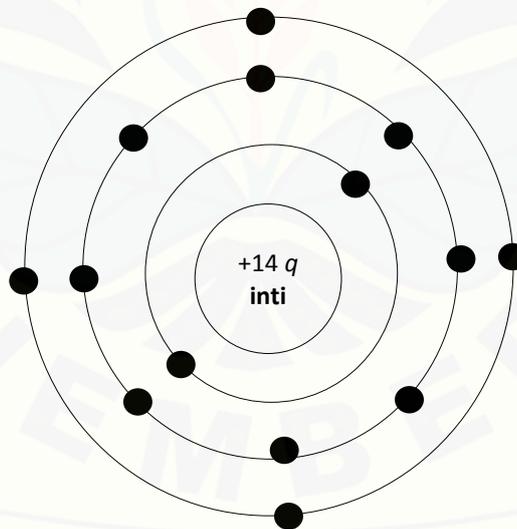
Cahaya matahari terdiri dari partikel-partikel yang disebut sebagai foton. Proses konversi melalui mekanisme fotovoltaik melibatkan energi foton dalam sel surya. Energi foton yang menyinari sel surya akan diserap, dipantulkan atau dilewatkan oleh bahan. Sehingga mengakibatkan elektron-elektron yang berada pada pita valensi akan tereksitasi ke tingkat energi yang lebih tinggi dan tercipta *hole*. Besarnya energi foton tergantung dari panjang gelombang pada *solar spectrum*. Foton dengan panjang gelombang tertentu dapat memecahkan ikatan kovalen, sehingga elektron terlepas menjadi elektron bebas dengan meninggalkan *hole*. Proses pembentukan pasangan pembawa muatan tersebut (elektron-*hole*) lebih dikenal dengan generasi (*Generation*). Pergerakan pembawa-pembawa muatan tersebut selanjutnya akan menghasilkan arus listrik. Elektron yang terlepas akan bergerak bebas di pita konduksi tetapi elektron tidak dapat bertahan lama dan cenderung menempati tingkat energi yang lebih rendah sehingga elektron akan kembali mengisi *hole* yang ditinggalkan, terlepasnya pasangan elektron-*hole* karena elektron menempati *hole* disebut sebagai proses rekombinasi (*Recombination*) (Buwono, 2010). Proses perubahan energi matahari menjadi listrik pada sel surya dapat ditunjukkan pada Gambar 2.3



Gambar 2.3 Proses konversi energi matahari menjadi listrik pada sel surya (Sumber: Yuwono, 2005)

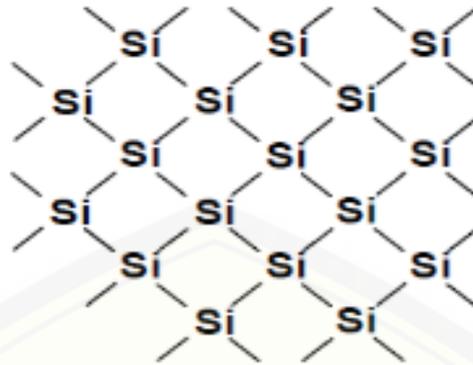
### 2.3 Kristal Silikon (c-Si)

Bahan yang terkenal dalam industri semikonduktor adalah silikon (Si). Germanium (Ge) terkenal sebagai komponen yang mempunyai sifat lebih jelek dari pada komponen dari bahan Si. Dalam sistem periodik unsur Si termasuk golongan IVA yang mempunyai nomor atom empat belas dan empat elektron valensi. Struktur atom Si dapat digambarkan dengan menganggap ke empat belas elektron bergerak mengelilingi inti yang mempunyai muatan listrik  $+14 q$  dapat dilihat pada Gambar 2.4. Si mempunyai orbit-orbit yang dinyatakan oleh tiga bilangan kuantum utama  $n = 1, 2,$  dan  $3$ . Gambar 2.4 menunjukkan bahwa elektron-elektron telah memenuhi kapasitas orbit  $n = 1$  dan  $2$ , sedangkan untuk orbit terluar masih ada empat tempat kosong untuk elektron yang artinya dapat menerima empat buah elektron dari luar. Kekosongan itu menyebabkan saling mengikatnya atom-atom. Elektron-elektron yang diterima dari luar disebut elektron valensi. Maka Si mempunyai empat valensi, yang disebut bahan dengan valensi empat (Rio dan Iida, 1999).



Gambar 2.4 Struktur atom silikon (Sumber: Rio dan Iida, 1999)

Struktur dalam silikon kristal, setiap atom dikelilingi secara teratur oleh empat buah atom dalam jarak dan sudut antar ikatan yang sama. Skema struktur c-Si dapat ditunjukkan pada Gambar 2.5 berikut:



Gambar 2.5 Skema struktur c-Si (Sumber: Subekti, 2003)

#### 2.4 Tipe Persambungan p-i-n dari Sel Surya berbasis c-Si

Sel surya p-i-n tersusun dari semikonduktor tipe p, tipe i, dan tipe n. Semikonduktor tipe p yang disebut dengan lapisan-p adalah lapisan yang mengandung *hole* sebagai pembawa muatan mayoritas dan elektron sebagai pembawa muatan minoritas. Lapisan-p berperan sebagai lapisan jendela (*window layer*), yang menerima langsung energi foton dari matahari. Energi foton kemudian diteruskan dan diserap oleh lapisan-p ini. Energi foton dimanfaatkan untuk proses generasi atau pembentukan pasangan elektron-*hole* pembawa muatan dalam lapisan-i. Energi foton tersebut diharapkan tidak diserap oleh lapisan-p. Apabila lapisan-p terlalu tebal, maka energi foton akan banyak diserap oleh lapisan-p sehingga energi foton yang sampai ke lapisan-i akan berkurang. Sebaliknya, apabila lapisan-p terlalu tipis dapat menyebabkan kontak langsung antara lapisan-i dengan substrat. Elektron bebas bergerak menuju ke level yang lebih tinggi yaitu pita konduksi dan berubah menjadi *hole* pada pita valensi akibat adanya medan listrik internal. Elektron mengalami arus *difusi* meninggalkan atom doping menuju ke lapisan-i (Eliyana, 2008).

Lapisan-i mempunyai jumlah elektron dan *hole* yang sama. Energi foton dalam lapisan-i dimanfaatkan untuk proses eksitasi elektron. Lapisan-i berperan sebagai lapisan aktif yang menentukan dalam proses generasi pembawa muatan oleh energi foton. Pada lapisan ini, proses pembangkitan (generasi) pasangan

pembawa muatan elektron-*hole* dan proses penggabungan kembali (rekombinasi) elektron-*hole* terjadi. Keduanya (generasi dan rekombinasi), sangat dipengaruhi oleh ketebalan lapisan-i ini. Lapisan-i yang terlalu tebal dapat lebih efisien untuk penyerapan cahaya, akan tetapi dapat memperbesar peluang terjadinya proses rekombinasi elektron-*hole* dan pembawa muatan yang terperangkap pada keadaan-keadaan terlokalisasi. selain itu, lapisan-i yang terlalu tebal akan memperkecil medan listrik antara lapisan p dan lapisan n. Oleh karena itu, lapisan-i harus dibuat sedemikian rupa sehingga tidak terlalu tebal dan tidak terlalu tipis (Eliyana, 2008).

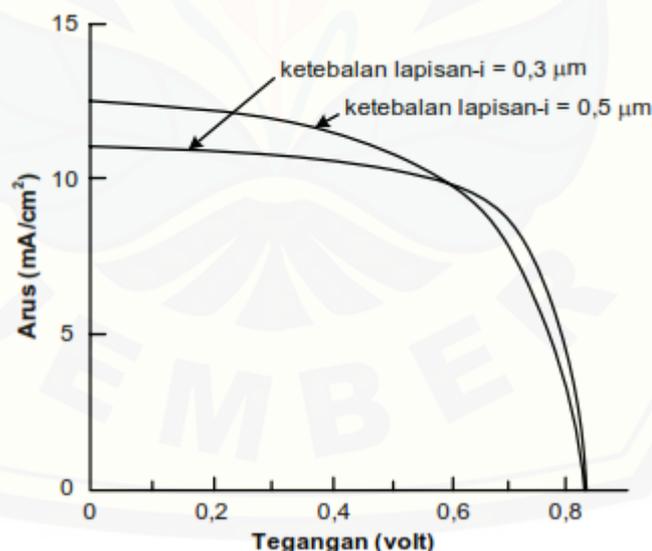
Lapisan-n berkebalikan dengan lapisan-p. Lapisan ini mengandung *hole* sebagai pembawa muatan minoritas dan elektron sebagai pembawa muatan mayoritas. Lapisan-n menerima arus *difusi hole* yang menumpuk dari lapisan-i, diakibatkan medan listrik internal di dalamnya. Selain terjadi arus *difusi hole* dalam lapisan ini juga terjadi arus *difusi* elektron. Arus *difusi* elektron dan *hole* akan terjadi terus-menerus hingga keadaan stabil yang ditandai dengan terbentuknya *built in potential* (Olthof *et.al.*, 2010).

## 2.5 Pengaruh Ketebalan Lapisan-i pada Sel Surya

Efisiensi konversi sel surya silikon amorf ditentukan oleh rapat keadaan terlokalisasi (*localized state density*) dalam lapisan-i. Rapat keadaan terlokalisasi dapat berperilaku sebagai perangkap muatan sehingga akan memperbesar kerugian arus rekombinasi. Semakin kecil rapat keadaan terlokalisasi dalam lapisan-i efisiensi konversi sel surya p-i-n akan semakin baik. Rapat keadaan terlokalisasi pada dasarnya dapat diatasi dengan mengatur ketebalan lapisan-i (Usman, 2006). Lapisan-i yang lebih tebal dapat lebih efisien untuk penyerapan cahaya, akan tetapi akan mengurangi medan listrik dan memperbesar hambatan seri sel surya sehingga mengurangi pembawa muatan yang tereksitasi ke lapisan-n. Sebaliknya, lapisan-i yang lebih tipis dapat meningkatkan nilai faktor pengisi *fill factor* akibat tingginya medan listrik yang dihasilkan dan akan mengurangi

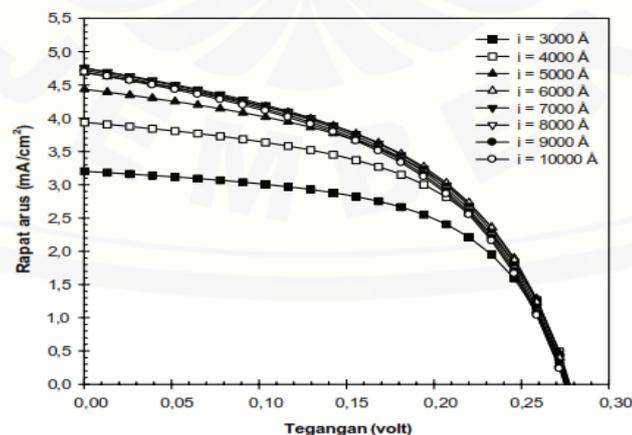
nilai arus hubung singkat (*short-circuit current*) akibat penyerapan cahaya yang kecil (Stulik dan Singh, 1998).

Karakteristik sel surya memiliki kebergantungan yang sangat tinggi pada ketebalan lapisan-i, dimana mekanisme generasi pembawa muatan dimulai dalam lapisan tersebut. Takahashi dan Konagai (1986) telah melakukan eksperimen pengaruh ketebalan lapisan-i pada persambungan sel surya n-i-p dengan menggunakan bahan a-Si:H. Dalam eksperimen tersebut variasi ketebalan lapisan-i yang digunakan adalah 0.3 dan 0.5 mikrometer yang dapat ditunjukkan pada Gambar 2.6. Dapat dilihat dari gambar tersebut arus yang dihasilkan berubah, namun tegangannya konstan. Arus yang dihasilkan kecil ketika ketebalan lapisan-i 0.3 mikrometer dan arus pada ketebalan 0.5 mikrometer meningkat. Hal itu sebagai akibat dari peningkatan absorpsi foton untuk generasi pembawa muatan. Namun demikian, efisiensi konversi akan menurun jika lapisan-i terlalu tebal. Hal ini selain diakibatkan oleh bertambahnya hambatan seri sel surya, juga akibat rendahnya medan listrik dalam lapisan-i yang terlalu tebal.



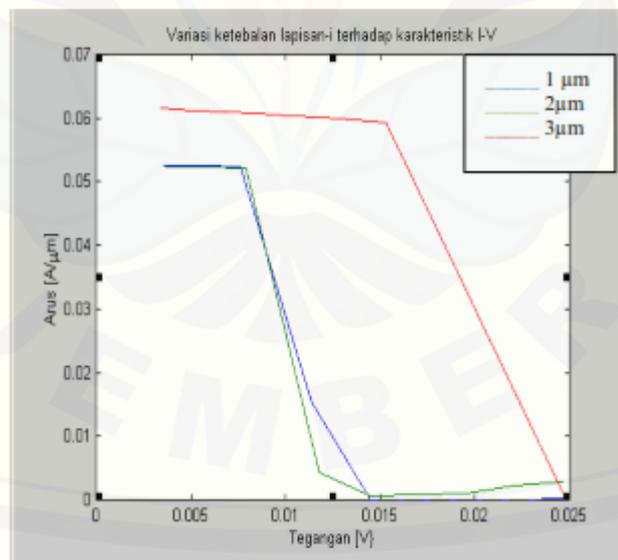
Gambar 2.6 Karakteristik sel surya n-i-p dengan ketebalan lapisan-i yang berbeda (Sumber: Takahashi dan Konagai, 1986)

Usman (2006) melakukan simulasi ketebalan lapisan-i hingga diperoleh ketebalan optimum yang dapat memberikan sel surya dengan karakteristik terbaik. Simulasi yang dilakukan yaitu persambungan p-i-n sel surya dengan menggunakan bahan a-Si:H. Variasi ketebalan lapisan-i yang diperoleh hanya berpengaruh pada perubahan nilai konsentrasi elektron ataupun *hole* dalam lapisan-i dimana lapisan-i yang lebih tebal memiliki konsentrasi elektron dan *hole* yang lebih tinggi dibandingkan lapisan-i yang lebih tipis. Hal ini diakibatkan oleh pengaruh penurunan laju generasi pasangan pembawa muatan pada lapisan-i yang semakin tebal sehingga proses rekombinasi menurun. Karakteristik rapat arus-tegangan yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 2.7. Gambar tersebut menunjukkan bahwa semakin tebal lapisan-i semakin besar pula rapat arus yang dihasilkan hingga mencapai rapat arus tertinggi yaitu pada ketebalan 7000 Å dimana pada ketebalan tersebut memberikan nilai rapat arus yang optimum. Sedangkan tegangan yang dihasilkan bernilai konstan. Rapat Arus yang mengalami peningkatan dengan penambahan ketebalan lapisan-i akibat peningkatan kemampuan sel surya dalam menyerap energi foton untuk lapisan-i yang semakin tebal. Namun demikian, peningkatan ketebalan lapisan-i dapat mereduksi medan listrik yang terbentuk dalam sel surya serta meningkatkan hambatan serinya. Sebagai akibatnya, nilai faktor pengisi *fill factor* mengalami penurunan.



Gambar 2.7 Karakteristik  $J$ - $V$  sel surya a-Si:H pada variasi ketebalan lapisan-i dengan ketebalan lapisan-p dan lapisan-n 250 amstrong (Sumber: Usman, 2006)

Simulasi pengaruh ketebalan lapisan-i pada karakteristik arus-tegangan sel surya persambungan p-i-n menggunakan metode elemen hingga juga dilakukan oleh Herawati (2014). Simulasi tersebut menggunakan pemodelan 1D dengan bahan silikon kristal (c-Si). Variasi ketebalan lapisan yang digunakan mulai dari 1  $\mu\text{m}$  sampai 3  $\mu\text{m}$  dengan kelipatan 1  $\mu\text{m}$ . Karakteristik rapat arus tegangan yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 2.8 menunjukkan bahwa tegangan keluaran yang dihasilkan terlalu kecil dan arus menurun ketika lapisan-i ditingkatkan dari 1  $\mu\text{m}$  ke 2  $\mu\text{m}$ . Sedangkan arus meningkat ketika lapisan-i ditingkatkan dari 2  $\mu\text{m}$  ke 3  $\mu\text{m}$ . Hal tersebut bisa terjadi karena fungsi dopan atau impuritas yang diaplikasikan pada persamaan poisson ketika simulasi tidak sesuai dengan keadaan setiap lapisan. Impuritas baik elektron maupun *hole* yang diinputkan pada ketiga lapisan semua sama. Seharusnya impuritas pada lapisan-p mayoritas *hole* dan minoritas elektron, sedangkan impuritas pada lapisan-n mayoritas elektron dan minoritas *hole* (Daniellsson, 2000). Jumlah impuritas pada lapisan-i sama antara elektron dan *hole* (Usman, 2006)



Gambar 2.8 Karakteristik arus-tegangan sel surya c-Si variasi ketebalan lapisan-i (Sumber : Herawati, 2014)

Hasil simulasi Herawati (2014) karakteristik arus-tegangan sel surya c-Si variasi ketebalan lapisan-i tersebut menunjukkan bahwa tegangan yang dihasilkan

jauh dari hasil eksperimen, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh ketebalan lapisan-i pada karakteristik arus-tegangan sel surya persambungan p-i-n dengan menginputkan fungsi dopan atau impuritas yang diaplikasikan pada persamaan poisson dengan keadaan yang berbeda.

## 2.6 Persamaan Dasar Semikonduktor

### 2.6.1 Persamaan Poisson

Persamaan Poisson secara umum menjelaskan fenomena perubahan medan listrik ( $\vec{E}$ ) dalam perangkat akibat perbedaan konsentrasi pembawa muatannya ( $\rho$ ) (Hack dan Shur, 1985). Perubahan medan listrik tersebut sebanding dengan nilai pembawa muatannya. Jika dihubungkan dengan permivitas bahan ( $\epsilon$ ), semakin kecil permivitas bahan maka semakin besar medan listrik yang dihasilkan (Goetzberger *et al.*, 1998). Hubungan antara pembawa muatan, medan listrik dan permivitas bahan dapat dituliskan secara matematis melalui persamaan Poisson berikut :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \vec{\nabla} \cdot (-\nabla\psi) = -\nabla^2\psi = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (2.1)$$

Persamaan Poisson ini menunjukkan bahwa bahan memiliki beda potensial ( $\psi$ ) yang dipengaruhi oleh pembawa muatan dari bahan tersebut. Pembawa muatan bahan terdiri dari pembawa muatan elektron dan *hole*, dimana pembawa muatan didefinisikan sebagai :

$$\rho = q(p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad (2.2)$$

sehingga persamaan Poisson menjadi :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{q(p - n + N_D^+ - N_A^-)}{\epsilon} \quad (2.3)$$

variabel  $q$  adalah muatan listrik,  $p$  dan  $n$  adalah pembawa muatan positif dan negatif,  $N_D^+$  dan  $N_A^-$  adalah konsentrasi donor dan aseptor dalam keadaan

terionisasi. Nilai konsentrasi donor dan aseptor dalam keadaan normal (Hack dan Shur, 1985) dapat dituliskan sebagai berikut :

$$N_D^+ \approx N_D \quad (2.4)$$

$$N_A^- \approx N_A \quad (2.5)$$

### 2.6.2 Persamaan Kontinuitas

Persamaan Kontinuitas pada material semikonduktor dikenal dengan istilah proses generasi dan rekombinasi. Proses generasi adalah proses terbentuknya pasangan elektron-*hole* per detik per meter kubik. Sedangkan proses rekombinasi adalah proses terlepasnya pasangan elektron-*hole* per detik per meter kubik. Dari kedua proses tersebut, dapat diketahui nilai rapat arus pembawa muatan yang didefinisikan dalam persamaan kontinuitas (Rio dan Iida, 1999) sebagai berikut:

$$\frac{1}{q} \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_n = R - G \quad (2.6)$$

$$\frac{1}{q} \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_p = G - R \quad (2.7)$$

$\vec{J}_n$  dan  $\vec{J}_p$  masing-masing adalah rapat arus elektron dan *hole*. Laju generasi ( $G$ ) disebut juga dengan laju pembangkitan elektron-*hole* yang dapat dituliskan dengan persamaan berikut:

$$G = \frac{F\alpha}{1-P} (e^{-\alpha x} + P e^{\alpha x}) \quad (2.8)$$

$F$  adalah rapat fluk foton pada gelombang datang,  $\alpha$  adalah koefisien absorpsi untuk bahan,  $P$  adalah faktor transmisi cahaya dalam bahan dan  $x$  adalah posisi sel surya yang dihitung dari tepi atas lapisan p. Laju rekombinasi ( $R$ ) bergantung pada jumlah muatan pada bahan semikonduktor. Pada bahan sel surya yang terbuat dari semikonduktor dengan transisi tidak langsung (*indirect transition*) seperti silikon, laju rekombinasinya dapat ditentukan dengan rekombinasi

*Shockly-Ready-Hall* ( $R_{SRH}$ ). Rekombinasi tersebut merupakan rekombinasi elektron dan *hole* dengan menggunakan perangkat berupa tingkat ketidakmurnian pada celah pita energi semikonduktor (Danielsson, 2000). Rekombinasi *Shockly-Ready-Hall* pada bahan c-Si dapat dituliskan sebagai berikut:

$$R_{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} \quad (2.9)$$

$n_i$  adalah konsentrasi pembawa muatan intrinsik,  $\tau_p$  adalah waktu hidup (*lifetime*) rekombinasi *hole*,  $\tau_n$  adalah waktu hidup (*lifetime*) rekombinasi elektron,  $n_1$  adalah parameter konsentrasi elektron dan  $p_1$  adalah parameter konsentrasi *hole*. Sehingga persamaan (2.6) dan (2.7) secara berturut-turut menjadi:

$$\frac{1}{q} \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_n = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} - \frac{F\alpha}{1 - P} (e^{-\alpha x} + P e^{\alpha x}) \quad (2.10)$$

$$\frac{1}{q} \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_p = \frac{F\alpha}{1 - P} (e^{-\alpha x} + P e^{\alpha x}) - \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} \quad (2.11)$$

### 2.6.3 Persamaan Rapat Arus dalam Semikonduktor

Arus pada bahan semikonduktor disebabkan adanya aliran *hole* dan elektron. Proses pergerakan pembawa muatan ini disebut dengan mekanisme transport. Mekanisme transport dalam bahan semikonduktor terdiri dari dua yaitu arus *drift* dan *difusi* (Rio dan Iida, 1999). Arus *drift* merupakan aliran arus yang disebabkan oleh pergerakan partikel bermuatan karena adanya medan listrik. Persamaan rapat arus *drift* dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\vec{J}_n = (-q)nv \quad (2.12)$$

$$\vec{J}_p = (+q)nv \quad (2.13)$$

kecepatan sebuah elektron yang bermuatan  $-q$  dan *hole* yang bermuatan  $+q$  dapat dituliskan sebagai berikut:

$$v_n = -\mu_n \vec{E} \quad (2.14)$$

$$v_p = +\mu_p \vec{E} \quad (2.15)$$

$v_n$  dan  $v_p$  adalah laju *drift* pada elektron dan *hole*,  $\mu_n$  dan  $\mu_p$  adalah mobilitas dari elektron dan *hole*. Sehingga persamaan rapat arus *drift* menjadi:

$$\vec{J}_n = qn\mu_n \vec{E} \quad (2.16)$$

$$\vec{J}_p = qp\mu_p \vec{E} \quad (2.17)$$

Adanya perbedaan konsentrasi elektron dan *hole* menyebabkan proses *difusi*. Arus *difusi* akan mengalir dari daerah dengan konsentrasi tinggi ke daerah dengan konsentrasi rendah. Arus *difusi* sebanding dengan gradien konsentrasi (Gray, 2003) yang dinyatakan sebagai berikut:

$$\vec{J}_n^{difusi} = +qD_n \frac{\partial n}{\partial x} = qD_n (\nabla n) \quad (2.18)$$

$$\vec{J}_p^{difusi} = -qD_p \frac{\partial p}{\partial x} = qD_p (-\nabla p) \quad (2.19)$$

Dimana  $\vec{J}_n^{difusi}$  dan  $\vec{J}_p^{difusi}$  masing-masing adalah rapat arus *difusi* elektron dan *hole*,  $D_n$  dan  $D_p$  masing-masing adalah konstanta difusivitas elektron dan *hole*, dan  $q$  adalah muatan listrik. Kerapatan arus total merupakan penjumlahan komponen arus *drift* dan *difusi*. Berdasarkan hasil penjumlahan rapat arus *drift* elektron (persamaan 2.16) dengan arus *difusi* elektron (persamaan 2.18) dan rapat arus *drift hole* (persamaan 2.17) dengan arus *difusi hole* (persamaan 2.19) dapat diperoleh

$$\vec{J}_n = qn\mu_n \vec{E} + qD_n (\nabla n) \quad (2.20)$$

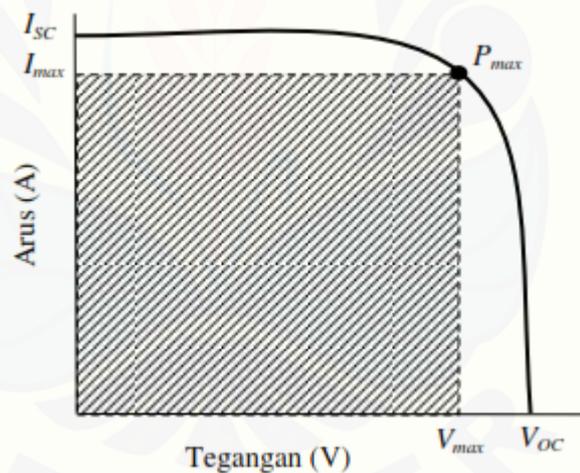
$$\vec{J}_p = qp\mu_p \vec{E} + qD_p (-\nabla p) \quad (2.21)$$

Rapat arus total merupakan penjumlahan dari rapat arus elektron dan rapat arus *hole*, sesuai dengan persamaan:

$$\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p \quad (2.22)$$

## 2.7 Karakteristik Sel Surya

Parameter yang mempengaruhi karakteristik rapat arus-tegangan sel surya terdiri dari parameter internal dan parameter umum. Parameter internal terdiri dari arus hubung singkat dan tegangan terbuka. Sedangkan parameter umum terdiri dari daya maksimum dan efisiensi. Karakteristik sel surya dapat ditunjukkan dalam bentuk kurva antara tegangan terbuka ( $V_{oc}$ ) terhadap arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ) yang dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.9 Karakteristik  $I$ - $V$  Sel Surya (Sumber: Ibrahim, 2011)

Kurva Karakteristik  $I$ - $V$  sel surya pada Gambar 2.9 menunjukkan arus yang relatif konstan kemudian mengalami penurunan secara drastis hingga mencapai pada tegangan tertinggi dengan arus nilainya nol (minimum). Arus hubung singkat, yang disebut juga dengan arus pendek, adalah arus yang dihasilkan sel surya ketika tegangan bernilai nol. Arus hubung singkat terukur saat kurva  $I$ - $V$  memotong sumbu  $y$ . Arus merupakan parameter fotovoltaik yang

menggambarkan kemampuan sel surya dalam menangkap foton sehingga dapat mengeksitasi pembawa muatan bebas (Sanchez, 2001).

Tegangan terbuka adalah tegangan yang dihasilkan sel surya ketika arus bernilai nol. Kebalikan dari arus hubung singkat, tegangan terukur saat kurva  $I-V$  memotong sumbu x. Tegangan terbuka merupakan kapasitas tegangan maksimum yang dapat dicapai saat tidak ada arus yang mengalir (Suriadi dan Syukri, 2010). Daya maksimum merupakan titik maksimum suatu daya yang dihasilkan sel surya. Daya maksimum dapat dihasilkan dari hasil *product* tegangan dan arus yang bernilai maksimum. Pada Gambar 2.7 tegangan dan arus yang disebutkan di atas ditunjukkan oleh parameter  $V_{max}$  dan  $I_{max}$ . Titik daya maksimum dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut (Suriadi dan Syukri, 2010):

$$P_{max} = V_{max}I_{max} \quad (2.23)$$

## 2.8 Analisis Numerik menggunakan Metode Elemen Hingga

Menurut Kabir *et al.* (2012) simulasi numerik merupakan pendekatan terbaik bagi penelitian sel surya. Dengan menggunakan pemodelan numerik, sejumlah parameter penumbuhan yang tidak dapat diamati karakteristiknya dalam skala eksperimen, dapat diinvestigasi secara bertahap. Kabir *et al.* (2012) juga menyebutkan bahwasanya pemodelan numerik dapat menggambarkan struktur geometri beberapa perangkat elektronika dan pemodelan tegangan hasil eksperimen. Pemodelan numerik ini sangat diperlukan untuk merancang sebuah sel surya dengan efisiensi konversi energi yang tinggi, sehingga dapat mengoptimalkan kinerja sel surya fotovoltaik.

Salah satu pemodelan numerik yang dapat digunakan untuk menggambarkan karakteristik kelistrikan dalam bahan adalah metode elemen hingga. Metode elemen hingga (*FEM*) merupakan suatu metode yang dilakukan dengan membagi geometri material menjadi elemen-elemen kecil dengan menggunakan pendekatan berupa persamaan differensial semikonduktor (Polycarpou, 2006). Banyaknya elemen yang digunakan menentukan keakuratan perhitungan. Semakin kecil elemen yang didefinisikan, hasil yang diperoleh

semakin akurat. Namun, pembagian elemen tersebut harus disesuaikan dengan kemampuan komputer yang digunakan karena jumlah elemen yang semakin banyak membutuhkan tahapan iterasi semakin banyak pula. Bentuk pembagian geometri material tersebut dengan mengubah seluruh bagian material menjadi bentuk segitiga atau segiempat. Bentuk pembagian ini disebut dengan *mesh* dan bergantung terhadap tingkat kerumitan dari material yang dimodelkan. Struktur geometri yang rumit biasanya menggunakan elemen segitiga (Usman, 2006).

Kelebihan dari metode elemen hingga mampu memodelkan material semikonduktor yang memiliki bentuk geometri tidak teratur. Selain itu, mampu mendefinisikan distribusi medan listrik dan pembawa muatan yang tidak linier dalam setiap bagiannya. Variabel yang digunakan dalam simulasi sel surya dengan metode elemen hingga adalah  $p$ ,  $n$ , dan  $\psi$ . Solusi umum masing-masing variabel tersebut jika diselesaikan dengan menggunakan metode elemen hingga:

$$\psi = \sum_{j=1}^a \psi_j \quad (2.24)$$

$$n = \sum_{j=1}^a n_j \quad (2.25)$$

$$p = \sum_{j=1}^a p_j \quad (2.26)$$

dimana  $a$  adalah jumlah elemen segitiga di dalam geometri (Usman, 2006). Variabel  $p$ ,  $n$ , dan  $\psi$  berturut-turut adalah konsentrasi *hole*, konsentrasi elektron, dan potensial elektrostatik. Variabel-variabel tersebut berhubungan dengan tingkat quasi-Fermi pembawa muatan dalam semikonduktor dengan persamaan (Danielsson, 2000)

$$n = n_i e^{\psi u} \quad (2.27)$$

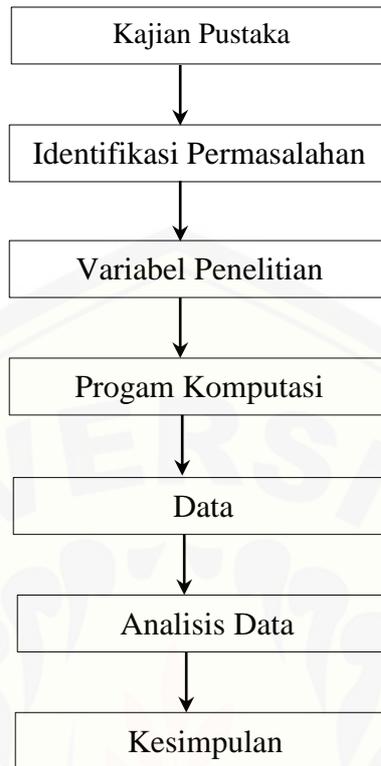
$$p = n_i e^{\psi v} \quad (2.28)$$

## BAB 3. METODE PENELITIAN

### 3.1 Rancangan Kegiatan Penelitian

Penelitian yang dilakukan berupa kegiatan simulasi untuk mengetahui pengaruh ketebalan lapisan  $i$  terhadap karakteristik  $J$ - $V$  sel surya menggunakan material silikon kristal (c-Si) pada persambungan p-i-n dengan metode elemen hingga. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Fisika Komputasi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember. Kegiatan penelitian dilaksanakan mulai dari September 2017 sampai dengan selesai. Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain seperangkat *Personal Computer* (PC) laptop. Spesifikasi PC laptop yang digunakan processor *intel* (R) *celeron* (R), sistem operasi 32-bit dan RAM 2.00 GB. *Software* yang digunakan dalam penelitian ini adalah MATLAB dan FEMLAB.

Kegiatan penelitian diawali dengan melakukan kajian pustaka dari berbagai sumber yang ada yaitu buku. Sumber yang diperoleh kemudian digunakan sebagai acuan dan pembanding dalam pelaksanaan penelitian. Setelah melakukan kajian pustaka, mengidentifikasi permasalahan yang akan diselesaikan yaitu bagaimana pengaruh ketebalan lapisan- $i$  terhadap karakteristik rapat arus-tegangan  $J$ - $V$  sel surya menggunakan material silikon kristal (c-Si) pada persambungan p-i-n dengan metode elemen hingga. Tahap selanjutnya yaitu mencari dan mengidentifikasi beberapa variabel penelitian yang akan menjadi parameter *input* dalam penyelesaian permasalahan. Adapun penyelesaian permasalahan dilakukan melalui simulasi berdasarkan program komputasi. Kemudian melakukan kegiatan simulasi untuk menghasilkan data berupa profil distribusi pembawa muatan dan grafik karakteristik rapat arus-tegangan  $J$ - $V$ , pada berbagai variasi ketebalan lapisan- $i$ . Data simulasi yang diperoleh kemudian dianalisis guna mendapatkan kesimpulan akhir. Alur kegiatan penelitian yang akan dilakukan dapat ditampilkan dalam bentuk diagram alir pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir rancangan kegiatan penelitian

### 3.2 Jenis dan Sumber Data

Jenis data dalam penelitian ini adalah data kuantitatif karena hasil simulasi, yang berupa karakteristik rapat arus-tegangan  $J$ - $V$ , diperoleh dari perhitungan secara numerik. Sumber data yang digunakan adalah data sekunder untuk menghasilkan karakteristik rapat arus-tegangan  $J$ - $V$  pada persambungan p-i-n dengan menggunakan material silikon kristal (c-Si). Data yang digunakan diperoleh dari data hasil eksperimen dan simulasi yang telah ada. Tabel 3.1 menunjukkan beberapa sumber data yang digunakan dalam kegiatan simulasi ini.

### 3.3 Definisi Operasional Variabel dan Skala Pengukuran

Variabel operasional penelitian ini adalah parameter dalam fisika yang berpengaruh dan nilainya dapat diubah. Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah variabel bebas dan variabel terikat. Variabel bebas merupakan

parameter *input* yang dapat divariasikan untuk mengetahui karakteristik kelistrikan dari perangkat. Variabel terikat merupakan parameter yang menunjukkan karakteristik kelistrikan dari perangkat. Dalam penelitian ini, yang menjadi variabel bebas adalah tegangan yang diperoleh dari kegiatan simulasi dan ketebalan pada lapisan-i. Sedangkan, nilai rapat arus yang menjadi variabel terikat.

Skala perhitungan yang digunakan dalam penelitian ini adalah skala pengukuran ordinal, dimana hasil data yang diperoleh melalui kegiatan simulasi diklasifikasikan dengan cara mengurutkan data dari yang paling rendah ke data yang paling tinggi. Hasil data yang diperoleh adalah profil distribusi pembawa muatan dan karakteristik rapat arus-tegangan dengan variasi ketebalan pada lapisan-i mulai dari 1  $\mu\text{m}$  - 15  $\mu\text{m}$  dengan kelipatan 1  $\mu\text{m}$ . Hasil tersebut kemudian akan diurutkan nilai rapat arus berdasarkan nilai yang paling kecil ke nilai yang paling besar.

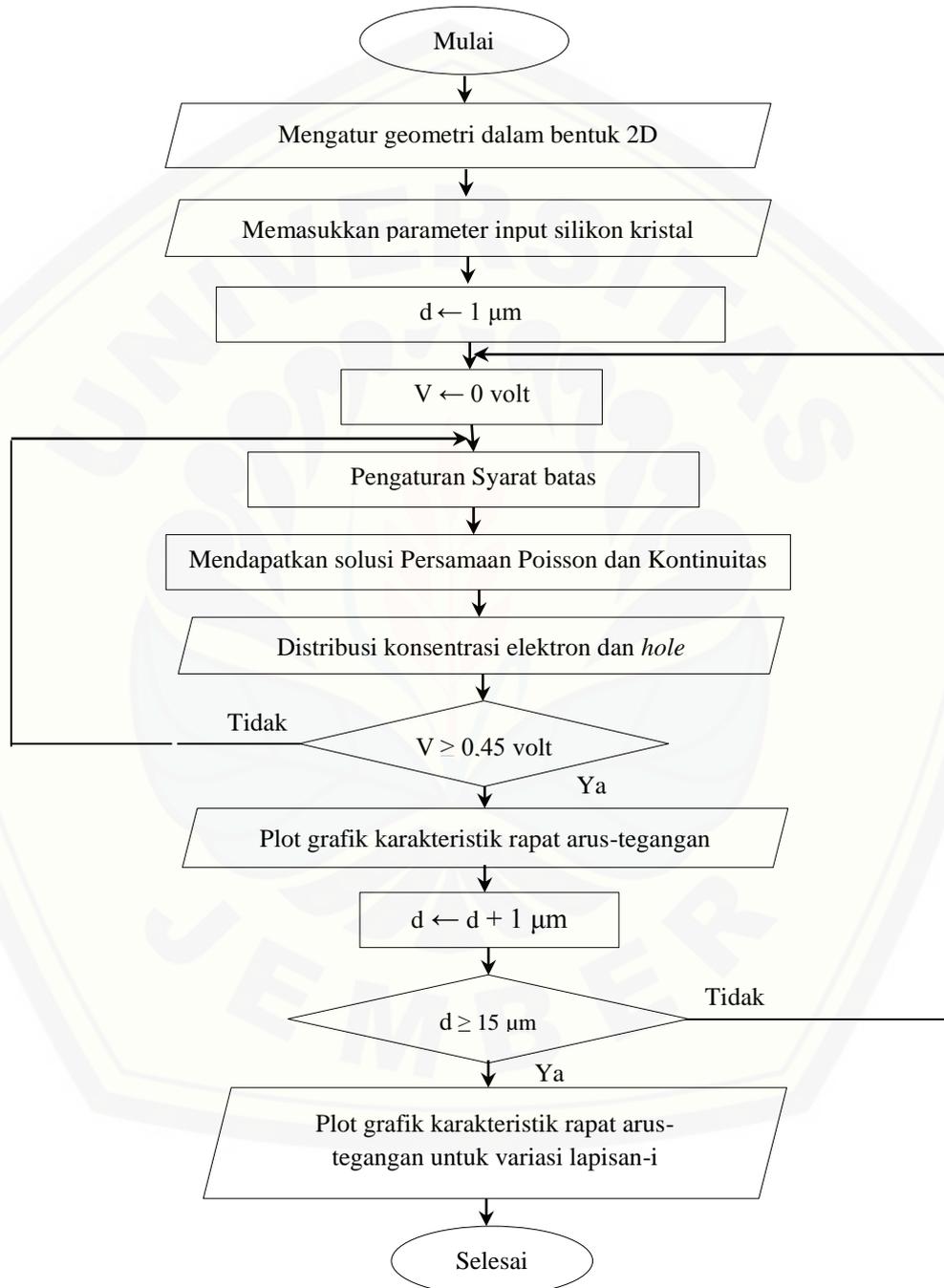
### **3.4 Kerangka Pemecahan Masalah**

#### **3.4.1 Kajian Pustaka**

Bagian awal dari penelitian adalah studi pustaka yang dilakukan dengan mencari literatur mengenai semua informasi yang berhubungan dengan sel surya. Salah satu informasi tersebut diantaranya ketebalan yang diaplikasikan pada sel surya secara eksperimen maupun simulasi yang telah dilakukan sebelumnya. Kemudian, hasil dari literatur yang diperoleh digunakan sebagai acuan dan pembandingan dalam pelaksanaan penelitian. Silikon kristal (c-Si) adalah bahan yang menjadi pilihan untuk diteliti dalam kegiatan simulasi dengan persambungan p-i-n. Kegiatan penelitian mengacu pada penelitian simulasi sebelumnya yang dilakukan oleh Herawati (2014), dengan mengembangkan kajian terhadap karakteristik rapat arus-tegangan  $J-V$  yang disimulasikan dalam struktur dua dimensi.

### 3.4.2 Mekanisme Simulasi

Prosedur kegiatan simulasi yang dilakukan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.2.

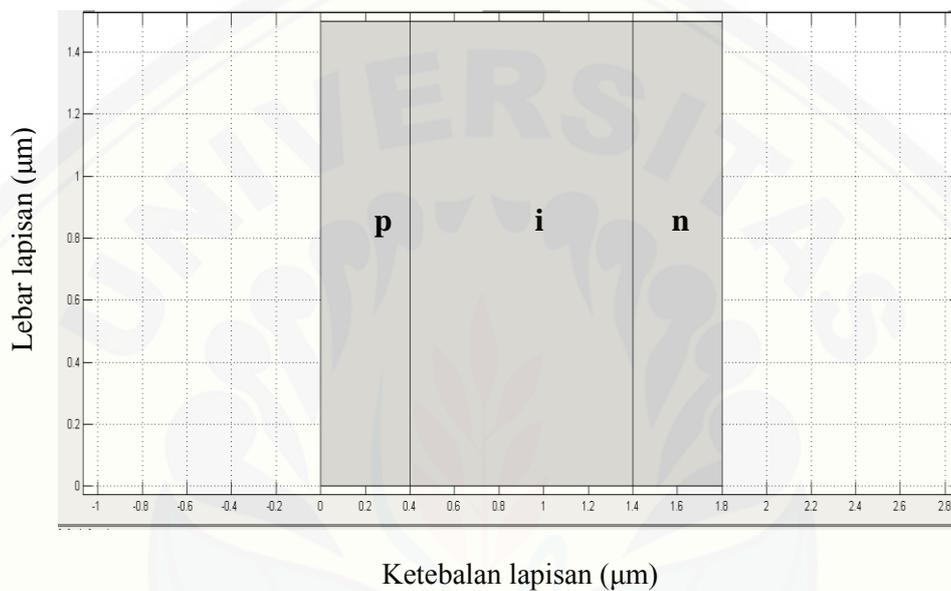


Keterangan :  $d$  = Ketebalan lapisan-i

Gambar 3.2 Alur simulasi penentuan karakteristik  $J$ - $V$  sel surya berbasis c-Si persambungan p-i-n pada variasi ketebalan lapisan-i

#### a. Geometri Silikon Kristal dalam 2D

Simulasi sel surya pada penelitian ini dibuat dalam bentuk dua dimensi. Penggambaran geometri dari kegiatan simulasi merupakan tahap awal untuk mendapatkan gambaran visual perangkat sel surya. Geometri tersebut terdiri dari tiga daerah subdomain yaitu subdomain berupa lapisan-p, lapisan-i, dan lapisan-n. Geometri dalam penelitian ini dapat ditunjukkan pada Gambar 3.3.

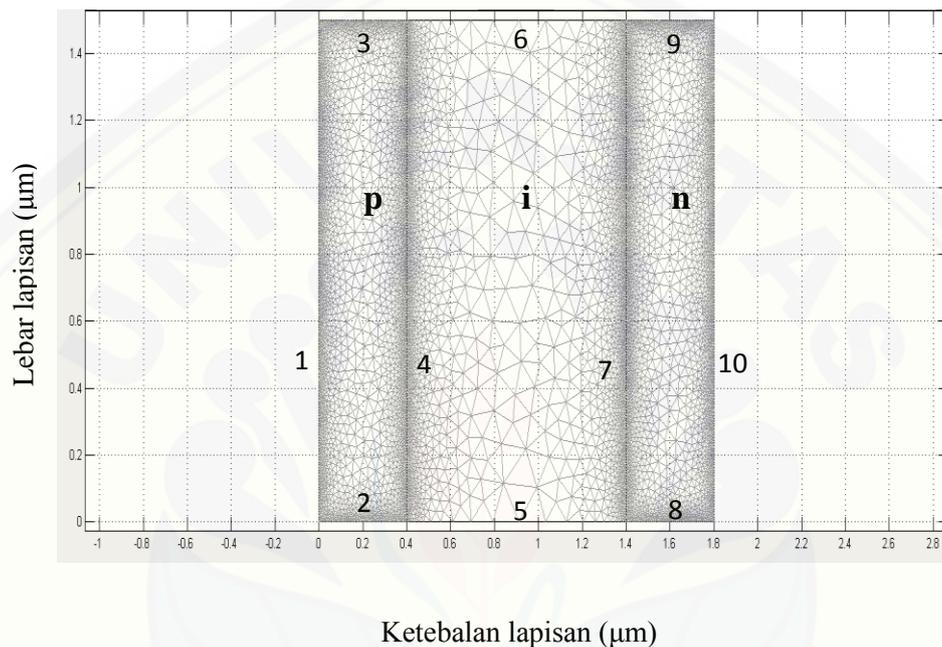


Gambar 3.3 Geometri divais sel surya material silikon kristal (c-Si) stuktur 2D

Pada gambar di atas dapat dilihat bahwa persambungan p-i-n mempunyai ketebalan yang sama antara lapisan p dan n yaitu 0.4 µm. Sedangkan pada ketebalan lapisan-i mempunyai tebal yang lebih besar yaitu 1 µm. Ketebalan lapisan-i ini divariasikan mulai dari 1 µm sampai 15 µm dengan kelipatan 1 µm. Ketebalan lapisan yang digunakan mengacu pada penelitian sebelumnya yaitu Herawati (2014) dengan mengembangkan variasi yang lebih tebal. Hal tersebut dilakukan karena untuk mengetahui seberapa tebal lapisan-i untuk meningkatkan rapat arus yang diperoleh.

Tahap selanjutnya setelah penggambaran geometri sel surya yaitu pembagian geometri sel surya. Geometri sel surya persambungan p-i-n dalam bentuk 2 dimensi terdiri dari 10 batas. Batas 1 (anoda) dan 10 (katoda), sedangkan batas 4 merupakan daerah persambungan lapisan-p dengan lapisan-i dan batas 7

merupakan daerah persambungan lapisan-i dengan lapisan-n. Pembagian geometri sel surya menjadi elemen-elemen kecil (*mesh*) yang berbentuk segitiga, hal ini dikarenakan metode yang digunakan adalah metode elemen hingga. Daerah batas persambungan lapisan p-i, lapisan i-n (4 dan 7), batas anoda (1), batas katoda (10), batas (2, 3, 8, dan 9) dibuat lebih kecil (lebih rapat) ukuran *mesh*-nya agar hasil yang didapatkan lebih akurat yang dapat ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Pembagian geometri divais sel surya material silikon kristal (c-Si) stuktur 2D

#### b. Parameter Silikon Kristal (c-Si)

Parameter fisis yang digunakan pada kegiatan simulasi ini disesuaikan dengan bahan silikon kristal (c-Si). Parameter *input* diperoleh berdasarkan studi pustaka yang dilakukan. Beberapa parameter fisis yang digunakan dalam pemodelan dua dimensi bahan silikon kristal dapat ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Parameter yang digunakan dalam kegiatan simulasi dengan metode elemen hingga tidak menggunakan satuan. Oleh karena itu, digunakan faktor skala agar nilai dari parameter tersebut menjadi setara (ekivalen). Parameter *input* tersebut antara lain jarak ( $x, y, z$ ), potensial listrik ( $\psi$ ), konsentrasi pembawa muatan ( $n, p, N$ ), konstanta *difusi* dari pembawa muatan ( $D_n, D_p$ ), mobilitas pembawa muatan ( $\mu_n, \mu_p$ ), dan densitas pembawa muatan ( $\rho$ ) yang ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.1 Parameter *Input*

Parameter	Nilai
Muatan Listrik ( $q$ )	$1,602 \times 10^{-19}$ C
Permivitas dalam vakum ( $\epsilon_0$ )	$8,85 \times 10^{-14}$ F/cm
Temperatur ( $T$ )	300 K
Konstanta Boltzman ( $k$ )	$1,38 \times 10^{-23}$ J/K
Pembawa muatan intrinsik ( $n_i$ )	$1,46 \times 10^{10}$ cm <sup>-2</sup>
Permivitas bahan ( $\epsilon_r$ )	11,8 F/cm
Fluks Foton ( $F$ ) <sup>*</sup>	$10^{-17}$ cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
Faktor Transmisi ( $P$ ) <sup>**</sup>	0,023
Koefisien absorpsi cahaya ( $\alpha$ )	$10^4$
Mobilitas elektron ( $\mu_n$ )	800 cm <sup>2</sup> /Vs
Mobilitas <i>hole</i> ( $\mu_p$ )	200 cm <sup>2</sup> /Vs
Difusi elektron ( $D_n$ )	20,7 cm <sup>2</sup> /s
Difusi <i>hole</i> ( $D_p$ )	5,17 cm <sup>2</sup> /s
Waktu hidup elektron ( $\tau_n$ ) <sup>***</sup>	$2,5 \times 10^{-12}$ s
Waktu hidup <i>hole</i> ( $\tau_p$ ) <sup>***</sup>	$1 \times 10^{-11}$ s
Mesh	0,005

(Sumber : Daniellson, 2000, <sup>\*</sup> Purwandari, 2011, <sup>\*\*</sup> Jasruddin *et al*, 2009, <sup>\*\*\*</sup> Sanchez, 2001)

Tabel 3.2 Faktor Skala Parameter *Input*

Parameter	Faktor Skala	Parameter Ekuivalen
Jarak ( $x, y, z$ )	$x_0 = ( x ,  y ,  z )_{max}$	$xx_0, yy_0, zz_0$
Potensial listrik ( $\psi$ )	$\psi_0 = \frac{kT}{q}$	$\frac{\psi}{\psi_0}$
Konsentrasi pembawa muatan ( $n, p, N$ )	$C_0 = ( N )_{max}$	$\frac{n}{C_0}, \frac{p}{C_0}, \frac{N}{C_0}$
Difusi pembawa muatan ( $D_n, D_p$ )	$D_0 = ( D_n ,  D_p )_{max}$	$\frac{D_n}{D_0}, \frac{D_p}{D_0}$
Mobilitas pembawa muatan ( $\mu_n, \mu_p$ )	$\frac{D_0}{\psi_0}$	$\frac{\mu_n \psi_0}{D_0}, \frac{\mu_p \psi_0}{D_0}$
Densitas pembawa muatan ( $\rho$ )	$\varphi^2 = \frac{\psi_0 \epsilon}{q_0 C_0 x_0^2}$	$\frac{\rho}{\varphi^2}$

(Sumber : Danielsson, 2000)

### c. Pengaturan Kondisi Batas

Pengaturan kondisi batas material dapat ditentukan dengan menggunakan kondisi batas Dirichlet dan kondisi batas Neumann. Kondisi batas Dirichlet digunakan untuk menentukan besarnya potensial dan konsentrasi pembawa muatan yang akan melewati persambungan p-i-n dalam sel surya. Kondisi batas ini berhubungan dengan konsentrasi dopan ( $N$ ) dengan asumsi tingkat energi fermi dalam perangkat akan sama dengan tegangan kontak. Sehingga didapatkan potensial elektrostatik yang besarnya sama dengan tegangan eksternal ( $V_A$ ) ditambah dengan perubahan energi untuk tingkat fermi yang memiliki hubungan logaritmik dengan konsentrasi pembawa muatan (Danielsson, 2000).

$$\psi = V_A + \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{\frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2}}{n_i} \right) \quad (3.1)$$

$$n = \frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2} \quad (3.2)$$

$$p = -\frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2} \quad (3.3)$$

$\psi$  adalah potensial elektrostatik,  $V_A$  adalah tegangan eksternal,  $q$  adalah muatan listrik,  $T$  adalah temperatur,  $k$  adalah konstanta Boltzman,  $N$  adalah konsentrasi dopan, dan  $n_i$  adalah pembawa muatan instrinsik. Kondisi batas Neumann merupakan kontak batas yang jauh dari daerah aktif, dimana pengaruh medan listrik ( $\vec{E}$ ) dan rapat arus elektron-hole ( $\vec{J}_n$  dan  $\vec{J}_p$ ) memiliki komponen normal bernilai nol, dapat ditunjukkan dengan persamaan berikut (Danielsson, 2000):

$$\hat{n} \cdot \vec{E} = 0 \quad (3.4)$$

$$\hat{n} \cdot \vec{J}_n = 0 \quad (3.5)$$

$$\hat{n} \cdot \vec{J}_p = 0 \quad (3.6)$$

#### d. Penyelesaian Persamaan Poisson dan Persamaan Kontinuitas

Persamaan dasar semikonduktor yang digunakan pada simulasi ini adalah persamaan Poisson dan persamaan Kontinuitas. Jika  $N$  konsentrasi dopan, maka persamaan poisson yaitu:

$$\nabla^2\psi = \frac{q(n - p - N)}{\epsilon} \quad (3.7)$$

Pembawa muatan elektron dan *hole* dalam semikonduktor yang ditunjukkan pada persamaan 2.27 dan persamaan 2.28 yaitu:

$$n = n_i e^{\psi u} \quad (3.8)$$

$$p = n_i e^{-\psi v} \quad (3.9)$$

Sehingga persamaan poisson menjadi:

$$\nabla^2\psi = \frac{q}{\epsilon} (n_i e^{\psi u} - n_i e^{-\psi v} - N) \quad (3.10)$$

Dalam simulasi persamaan (3.10) dikalikan dengan faktor skala  $\lambda^2$  sehingga persamaan tersebut menjadi:

$$\lambda^2 \nabla^2\psi = n_i (e^{\psi u} - e^{-\psi v}) - N \quad (3.11)$$

Secara matematis  $\nabla^2$  sama dengan  $\Delta$ , maka

$$\lambda^2 \Delta\psi = n_i (e^{\psi u} - e^{-\psi v}) - N \quad (3.12)$$

dimana  $N$  adalah impuritas atau konsentrasi dopan. Setiap lapisan mempunyai impuritas masing-masing, yang mendefinisikan bahwasanya pada lapisan-p mayoritas konsentrasi *hole*, sedangkan pada lapisan-n mayoritas konsentrasi elektron. Adapun impuritas untuk elektron dan *hole* masing-masing adalah (Danielsson, 2000):

$$N = \left( ND_n + ND_{nmax} e^{-\left(\frac{x_1-x}{ch}\right)^2} \right) \quad (3.13)$$

$$N = \left( NA_{pmax} e^{-\left(\frac{x}{ch}\right)^2} \right) \quad (3.14)$$

Impuritas pada lapisan-i mempunyai keadaan yang berbeda, pada lapisan-i impuritas yang diinputkan melibatkan impuritas lapisan-p dan lapisan-n, yang dapat dilihat pada persamaan berikut :

$$N = \left( ND_n + ND_{nmax} e^{-\left(\frac{x1-x}{ch}\right)^2} - NA_{pmax} e^{-\left(\frac{x}{ch}\right)^2} \right) \quad (3.15)$$

dimana :

$$ch = \frac{ju}{\sqrt{\log(NA_{pmax}/ND_n)}} \quad (3.16)$$

$ND_n$  adalah konsentrasi donor pada daerah tipe-n,  $ND_{nmax}$  adalah konsentrasi donor tertinggi pada daerah tipe-n,  $NA_{pmax}$  adalah konsentrasi akseptor tertinggi pada daerah tipe-p,  $ju$  adalah panjang lapisan awal ( $0,4 \mu\text{m}$ )  $x1$  adalah ketebalan lapisan geometri sel surya ( $1,8 \mu\text{m}$ ) (Purwandari, 2011). Proses generasi dan rekombinasi yang terjadi pada sel surya secara matematis dituliskan pada persamaan kontinuitas. Persamaan kontinuitas untuk elektron dan persamaan kontinuitas untuk *hole* masing-masing dapat ditunjukkan pada persamaan 2.10 dan 2.11. Kedua persamaan tersebut digunakan dengan mensubstitusikan persamaan 3.8 dan 3.9 terlebih dahulu, sehingga diperoleh:

$$\frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_n = \frac{n_i(uv - 1)}{\tau_p(ue^\psi + 1) + \tau_n(ve^\psi + 1)} - \frac{F\alpha}{1 - P} (e^{-\alpha x} + Pe^{\alpha x}) \quad (3.17)$$

$$\frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_p = \frac{F\alpha}{1 - P} (e^{-\alpha x} + Pe^{\alpha x}) - \frac{n_i(uv - 1)}{\tau_p(ue^\psi + 1) + \tau_n(ve^\psi + 1)} \quad (3.18)$$

persamaan kontinuitas di atas siap diinputkan pada saat simulasi.

### 3.4.3 Metode Analisis Data

Pada penelitian ini akan menghasilkan profil distribusi pembawa muatan elektron-*hole* dan kurva karakteristik rapat arus-tegangan  $J$ - $V$  sel surya berbasis c-

Si, dengan variasi ketebalan lapisan-i. Adapun analisis yang akan dilakukan terhadap data yang diperoleh:

1. Profil distribusi pembawa muatan

Pada penelitian ini profil distribusi pembawa muatan yang diamati adalah besar distribusi konsentrasi pembawa muatan baik itu elektron maupun *hole*. Distribusi konsentrasi pada pembawa muatan elektron tertinggi terletak pada lapisan-n, sedangkan distribusi konsentrasi pada pembawa muatan *hole* tertinggi terletak pada lapisan-p.

2. Kurva karakteristik rapat arus-tegangan ( $J$ - $V$ ) pada variasi ketebalan lapisan-i

Parameter yang diamati pada hasil kurva karakteristik rapat arus-tegangan  $J$ - $V$  adalah besar tegangan hubung terbuka ( $V_{OC}$ ) dan rapat arus hubung singkat ( $J_{SC}$ ). Rapat arus yang diperoleh merupakan rapat arus total yaitu penjumlahan dari rapat arus yang disebabkan oleh pergerakan elektron dan rapat arus yang disebabkan oleh pergerakan *hole*. Nilai rapat arus diseluruh rangkaian sama, oleh karena itu pada simulasi ini hanya melakukan pengamatan rapat arus di batas 1 (Milmann, 1971).

Analisa data dilakukan pada setiap kurva karakteristik rapat arus-tegangan  $J$ - $V$  yang diperoleh dengan variasi ketebalan lapisan-i mulai dari 1  $\mu\text{m}$  sampai 15  $\mu\text{m}$  dengan kelipatan 1  $\mu\text{m}$ . Jika kurva rapat arus-tegangan  $J$ - $V$  yang dihasilkan untuk setiap variasi ketebalan lapisan-i terdapat perbedaan, maka ketebalan lapisan-i berpengaruh pada karakteristik rapat arus-tegangan sel surya. Perbedaan yang dimaksud adalah hasil rapat arus hubung singkat ( $J_{SC}$ ) yang diperoleh, semakin besar nilai rapat arus hubung singkat yang dihasilkan pada kurva karakteristik  $J$ - $V$  maka kinerja sel surya tersebut semakin baik (Tool *et al.*, 2001). Kemudian dari hasil simulasi tersebut, kurva karakteristik rapat arus-tegangan sel surya yang diperoleh akan dibandingkan dengan hasil simulasi sebelumnya berupa pengaruh ketebalan lapisan-i pada perhitungan karakteristik rapat arus-tegangan sel surya tipe p-i-n menggunakan metode elemen hingga dalam bentuk 1D yang telah dilakukan oleh Herawati (2014). Parameter yang dibandingkan yaitu besar tegangan hubung singkat ( $V_{OC}$ ) dan rapat arus hubung singkat ( $J_{SC}$ ).

## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan pembahasan yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan bahwa variasi ketebalan lapisan-i dari 1  $\mu\text{m}$  sampai 15  $\mu\text{m}$  dengan ketebalan lapisan-n dan lapisan-p dibuat konstan 0,4  $\mu\text{m}$  memberikan pengaruh terhadap karakteristik rapat arus yang dihasilkan sel surya. Semakin tebal lapisan-i yang diaplikasikan maka rapat arus yang dihasilkan sel surya semakin meningkat. Sebaliknya, semakin tipis lapisan-i yang diaplikasikan maka rapat arus yang dihasilkan sel surya semakin menurun. Rapat arus tertinggi diperoleh pada saat ketebalan lapisan-i dibuat 15  $\mu\text{m}$ , sedangkan nilai terendah didapatkan pada ketebalan 1  $\mu\text{m}$ . Variasi ketebalan lapisan-i tersebut tidak mempengaruhi tegangan hubung terbuka ( $V_{OC}$ ) yang dihasilkan sel surya. Hal ini terlihat dari kurva karakteristik rapat arus-tegangan dengan nilai  $V_{OC}$  yang dihasilkan selalu konstan yaitu 0,45 volt meskipun ketebalan lapisan-i divariasi.

### 5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan dari penelitian ini adalah:

1. Pada penelitian ini, belum dihasilkan pengaruh variasi ketebalan lapisan-i terhadap efisiensi yang dihasilkan sel surya sehingga dapat dilanjutkan untuk peneliti selanjutnya menyempurnakan penelitian ini dengan mengkaji pengaruh variasi ketebalan lapisan-i terhadap efisiensi yang dihasilkan sel surya.
2. Penelitian ini hanya menampilkan profil distribusi pembawa muatan dalam bentuk 2D saja, sehingga penelitian ini dapat dikembangkan dalam bentuk 3D. Oleh karena penggambaran geometri dalam bentuk 3D lebih mendekati bentuk sel surya secara *real*.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Ariswan. 2008. Prospek Penelitian dan Aplikasinya Fotovoltaik Sebagai Sumber Energi Alternatif di Indonesia. *Skripsi*. Yogyakarta: FMIPA universitas Yogyakarta.
- Buwono. M. C. 2010. Rancang Bangun Sistem Pengendali Pengisian Arus Sel Surya dengan Rekonfigurasi Seri-Paralel. *Skripsi*. Depok: Universitas Indonesia.
- Danielsson, E. 2000. *FEMLAB Model Library For Semiconductor Device Model*. Stockholom: The Royal Insitute Of Insitute.
- Eliyana, A. 2008. Pengembangan Sistem Pengukur Karakteristik Arus Tegangan (I-V) Sel Surya dalam Keadaan Penyinaran dan Tanpa Penyinaran. *Skripsi*. Jakarta: Universitas Pendidikan Indonesia.
- Fitriana. 2014. Simulasi Pengaruh Panjang Gelombang Foton Datang Terhadap Karakteristik I-V Dioda Sel Surya Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Skripsi*. Jember : Universitas Jember.
- Fishbane, P. M., S. Gasirowicz, dan S. T. Thornton. 1996. *Physics For Scientists and engineers*, 2<sup>nd</sup> edition. New Jersey: Prentice-hall.
- Goetzberger, A. 1998. *Crystalline Silicon Solar Cell*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd.
- Gray, J.L. 2003. *The Physics of the Solar Cell*. USA: Purdue University.
- Hack, M. dan Shur. 1985. Physics of Amorphous Silicon Alloy p-i-n Solar Cells. *Journal of Applied Physics*. 58(2), 997-1020.
- Herawati, Y. 2014. Pengaruh Ketebalan Lapisan I pada Perhitungan Karakteristik Arus-Tegangan Sel Surya Tipe PIN Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Skripsi*. Jember: FMIPA Universitas Jember.
- Ibrahim, A. 2011. Analysis of Electrical Characteristics of Photovoltaic Single Crystal Silicon Solar Cells at Outdoor Measurements. *Smart Grid and Renewable Energy*. Vol. 2: 169-175.

- Kabir, M.I., S. A. Shahahmadi, V. Lim, S. Zaidi, K. Sopian, dan N. Amin. 2012. Amorphous Silicon Single-Junction Thin-Film Solar Cell Exceeding 10% Efficiency by Design Optimization. *International Journal of Photoenergy*: Article ID 460919,7.
- Kemen ESDM. 2011. Data Statistik Energi Terbarukan. Kementerian ESDM.
- Millman, J. dan Halkias, C. C. 1971. *Integrated Electronics: Analog and Digital Circuits and Systems*. New York: McGraw-Hills, Inc.
- Olthof, Kleeman, Lussen, dan Leo. 2010. Built-in Potential of a Pentacene p-i-n Homojunction Studied by Ultraviolet Photoemission Spectroscopy. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, 1270-(2)09-49.
- Polycarpou, A. C. 2006. *Introduction to the Finite Element Method in Electromagnetics*. USA: Morgan & Claypool Publishers.
- Purwandari, E. 2011. The Study of Deposition Parameter Optimization On The Simulation Of A-Si:H Solar Cell Efficiency By Investigating The Effect Of Optical Bandgap. Tidak diterbitkan. *Tesis*. Bandung: Progam Pascasarjana ITB.
- Rio, S. R. dan Iida, M. 1999. *Fisika dan Teknologi Semikonduktor*. Cetakan Ketiga. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Sanchez, C.V. 2001. *Thin Film Nanocrystalline Silicon Solar Cell By Hot-Wire CVD*. Barcelona: Department De Fisica Aplicada I Optica.
- Stulik, P. dan Singh, J. 1998. Calculation of Collection Efficiency for Amorphous Silicon Solar Cells, *J. non-Cryst. Solids*, 242, 115-121.
- Subekti, A. 2003. *Semikonduktor*. Jember: Fakultas MIPA Universitas Jember.
- Suriadi, dan Syukri, M. 2010. Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terpadu Menggunakan Software PVSYST Pada Komplek Perumahan di Banda Aceh. *Jurnal Rekayasa ElektriKa*. Vol.9 No.2:77-80.
- Sze, S. M. 1981. *Physics Of Semiconductor Devices*. New York: John Willey & Son.

Sze, S. M. 2007. *Physics Of Semiconductor Devices*. New Jersey: John Willey & Son.

Szlufcik, J., S. Sivoththaman, J. F. Nijs, R. P. Mertens, dan R. V. Overstraeten. 1997. Low-cost industrial technologies of crystalline silicon solar cell. *Journal Of Applied Physics*. 85(5): 709-730.

Takahashi, K. dan M. Konagai. 1986. *Amorphous Silicon Solar Cells*. North Oxford Academic Pub. Ltd: London.

Tool, C. J. J., A. R. Burgers, A. M. Manshanden, dan Weeber. 2001. *Effect Of Wafer Thickness On The Performance Of mc-Si Solar Cells*. 17<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference.

Usman, I. 2006. Penumbuhan Lapisan Tipis Silicon Amorf Terhidrogenisasi dengan Teknik HWC-VHF-PECVD dan Aplikasinya pada Sel surya. Tidak dipublikasikan. *Disertasi*. Bandung: ITB.

Wolf. 1991. *Properties of Semiconductor Physics*. London: Artech House.

Yuwono. 2005. Optimalisasi Panel Sel Surya dengan Menggunakan Sistem Pelacak Berbasis Mikrokontroler AT89C51. Tidak dipublikasikan. *Skripsi*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret Surakarta. Tidak dipublikasikan.

## LAMPIRAN

4.1 Tabel perhitungan rapat arus total yang dihasilkan sel surya pada ketebalan lapisan-i 1  $\mu\text{m}$  untuk seluruh nilai tegangan *output*

V (volt)	Rapat Arus pada Batas 1 (mA/cm)		
	$J_n$	$J_p$	$J_{T1}$
0,000	-0,000	4,216	4,216
0,025	-0,000	4,215	4,215
0,050	-0,000	4,215	4,215
0,750	-0,000	4,215	4,215
0,100	-0,000	4,214	4,214
0,125	-0,000	4,214	4,214
0,150	-0,000	4,213	4,213
0,175	-0,000	4,213	4,213
0,200	-0,000	4,212	4,212
0,225	-0,000	4,212	4,212
0,250	-0,000	4,211	4,211
0,275	-0,000	4,211	4,211
0,300	-0,000	4,210	4,210
0,325	-0,000	4,210	4,210
0,350	-0,000	4,209	4,209
0,375	-0,000	4,209	4,209
0,400	-0,000	4,208	4,208
0,425	-0,001	4,207	4,206
0,450	-0,002	4,206	4,204

4.2 Tabel perhitungan rapat arus total yang dihasilkan sel surya pada ketebalan lapisan-i 2  $\mu\text{m}$  untuk seluruh nilai tegangan *output*

V (volt)	Rapat Arus pada Batas 1 (mA/cm)		
	$J_n$	$J_p$	$J_{T1}$
0,000	-0,000	7,669	7,669
0,025	-0,000	7,668	7,668
0,050	-0,000	7,667	7,667
0,750	-0,000	7,667	7,667
0,100	-0,000	7,666	7,666
0,125	-0,000	7,665	7,665
0,150	-0,000	7,665	7,665
0,175	-0,000	7,664	7,664
0,200	-0,000	7,663	7,663
0,225	-0,000	7,662	7,662
0,250	-0,000	7,662	7,662
0,275	-0,000	7,661	7,661
0,300	-0,000	7,660	7,660
0,325	-0,000	7,659	7,659
0,350	-0,000	7,658	7,658
0,375	-0,000	7,657	7,657
0,400	-0,000	7,656	7,656
0,425	-0,001	7,655	7,654
0,450	-0,002	7,653	7,651