



**SIMULASI KARAKTERISTIK I-V DIODA SEL SURYA  
PADA VARIASI KETEBALAN LAPISAN-P  
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

**SKRIPSI**

Oleh  
**Greta Andika Fatma**  
**NIM 121810201005**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS JEMBER  
2016**



**SIMULASI KARAKTERISTIK I-V DIODA SEL SURYA  
PADA VARIASI KETEBALAN LAPISAN-P  
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

**SKRIPSI**

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

Oleh  
**Greta Andika Fatma**  
**NIM 121810201005**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS JEMBER  
2016**

## PERSEMBAHAN

Skripsi ini Saya persembahkan untuk:

1. Ibunda Tatik Eka Indrayani serta Ayahanda Sutejo terkasih yang tidak pernah kenal lelah selalu memberi nasihat, semangat serta hembusan doanya;
2. guru-guruku sejak taman kanak-kanak hingga perguruan tinggi yang telah mendidik dengan penuh perhatian dan kesabaran;
3. Adikku tersayang Lika Advani Wikanti dan Fajar Afi Witanto serta seluruh keluarga besar yang selalu menjadi penyemangat;
4. Teman-temanku sejak taman kanak-kanak hingga perguruan tinggi (Lorentz2012) yang telah memberikan keceriaan dan semangat dalam proses kehidupanku;
5. Almamater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

**MOTO**

*“Allah tidak hendak menyulitkan kamu, tetapi Dia hendak membersihkan kamu dan menyempurnakan nikmat-Nya bagimu, supaya kamu bersyukur.”*

(terjemahan Surat Al-Maa'idah ayat 6)<sup>\*)</sup>



---

<sup>\*)</sup> Departemen Agama Republik Indonesia. 2002. *Al Qur'an dan Terjemahannya*. Surabaya: Mahkota.

**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

nama : Greta Andika Fatma

NIM : 121810201005

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Simulasi Karakteristik I-V Dioda Sel Surya pada Variasi Ketebalan Lapisan-P Menggunakan Metode Elemen Hingga” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya dan 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 mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, September 2016

Yang menyatakan,

Greta Andika Fatma  
NIM 121810201005

**SKRIPSI**

**SIMULASI KARAKTERISTIK I-V DIODA SEL SURYA  
PADA VARIASI KETEBALAN LAPISAN-P  
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

Oleh  
Greta Andika Fatma  
NIM 121810201005

**Pembimbing**

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

Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Edy Supriyanto, S.Si., M.Si.

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Simulasi Karakteristik I-V Dioda Sel Surya pada Variasi Ketebalan Lapisan-P Menggunakan Metode Elemen Hingga” telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal :

tempat :

Tim Penguji:

Dosen Pembimbing Utama,

Dosen Pembimbing Anggota,

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

Dr. Edy Supriyanto, S.Si., M.Si.  
NIP 196712151998021001

Dosen Penguji I,

Dosen Penguji II,

Drs. Yuda Cahyoargo H, M.Sc., Ph.D.  
NIP 196203111987021001

Supriyadi, S.Si., M.Si.  
NIP 198204242006041003

Mengesahkan,  
Dekan Fakultas MIPA,

Drs. Sujito, Ph.D  
NIP 196102041987111001

## RINGKASAN

**Simulasi Karakteristik I-V Dioda Sel Surya pada Variasi Ketebalan Lapisan-P Menggunakan Metode Elemen Hingga;** Greta Andika Fatma, 121810201005; 2016: 52 halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Tingkat kebutuhan akan ketersediaan listrik yang semakin meningkat, sel surya menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang mengkonversi langsung energi matahari menjadi energi listrik. Pembangkit energi listrik tenaga surya merupakan sumber energi alternatif yang bersih, aman dan mudah digunakan dimanapun. Perkembangan kegiatan penelitian terhadap peningkatan kinerja sel surya terus dilakukan. Peningkatan kinerja sel surya dapat dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa parameter penting, salah satunya ketebalan lapisan. Ketebalan lapisan sel surya dapat mempengaruhi proses konversi fotovoltaiik di dalam divais. Divais dioda sel surya dengan struktur persambungan p-n, apabila ketebalan lapisan-p tebal maka akan mengurangi energi foton yang dibutuhkan oleh lapisan-n untuk proses generasi. Namun demikian, apabila lapisan-p terlalu tipis potensial difusi tidak dapat terbentuk sehingga dapat mengurangi rapat arus listrik yang dihasilkan. Rapat arus listrik yang dihasilkan dapat diketahui pada perubahan kurva karakteristik arus-tegangan (I-V). Berdasarkan kurva karakteristik I-V ini, maka kinerja dari sebuah divais sel surya, yang menjadi parameter kualitas dari sel surya, dapat diidentifikasi. Pada penelitian ini pengaruh variasi ketebalan lapisan-p dioda sel surya khususnya pada material Si jenis persambungan p-n, akan disimulasikan berdasarkan kurva karakteristik I-V menggunakan metode elemen hingga.

Metode elemen hingga merupakan suatu metode yang dilakukan dengan membagi geometri material menjadi elemen-elemen kecil dengan menggunakan pendekatan berupa persamaan diferensial semikonduktor. Semakin kecil elemen yang



didefinisikan, hasil yang diperoleh semakin akurat. Parameter fisis dioda sel surya Silikon merujuk berdasarkan penelitian sebelumnya. Pengolahan parameter fisis dioda sel surya Silikon secara matematis berdasarkan persamaan Poisson dan persamaan kontinuitas. Ketebalan lapisan-p yang diaplikasikan dari 0,7  $\mu\text{m}$  sampai dengan 1,5  $\mu\text{m}$  dengan kelipatan 0,1  $\mu\text{m}$ , sedangkan ketebalan lapisan-n dibuat tetap 3,5  $\mu\text{m}$ .

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh menunjukkan bahwa variasi ketebalan lapisan-p memberikan pengaruh terhadap karakteristik arus-tegangan yang dihasilkan dioda sel surya. Semakin besar ketebalan lapisan-p yang diaplikasikan maka rapat arus dioda sel surya semakin menurun, sebaliknya semakin tipis ketebalan lapisan-p yang diaplikasikan maka rapat arus dioda sel surya semakin meningkat. Peningkatan ketebalan lapisan-p membuat energi yang diterima lapisan-p semakin meningkat, namun mengurangi energi yang diterima lapisan-n. Lapisan-p sebagai lapisan jendela (*window layer*) akan menerima energi dalam porsi lebih besar dibandingkan lapisan-n, oleh karenanya lapisan-p harus lebih tipis agar proses generasi dalam lapisan-n berlangsung secara maksimal. Dengan demikian lapisan-p yang tipis pada dioda sel surya persambungan p-n akan menghasilkan arus lebih besar dibandingkan lapisan-p yang tebal. Kinerja sel surya dapat diketahui dari parameter sel surya yang dihasilkan. Parameter yang lebih mudah digunakan untuk menentukan kinerja sel surya yang optimum dengan menentukan rapat arus yang dihasilkan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada ketebalan lapisan-p sebesar 0,7  $\mu\text{m}$  dan lapisan-n sebesar 3,5  $\mu\text{m}$  memiliki nilai rapat arus yang lebih tinggi dibandingkan variasi ketebalan lapisan-p lainnya. Besar rapat arus hubung singkat paling optimum yang dihasilkan yaitu sebesar  $1,41 \times 10^{-11} \text{ A}/\mu\text{m}$  dan tegangan dengan nilai rapat arus minimum diperoleh sebesar 0,375 volt. Hal tersebut menunjukkan bahwa kinerja atau *performance* dioda sel surya Si yang optimum pada penelitian ini didapatkan ketika ketebalan lapisan-p sebesar 0,7  $\mu\text{m}$ .

## PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat serta nikmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Simulasi Karakteristik I-V Dioda Sel Surya pada Variasi Ketebalan Lapisan-P Metode Elemen Hingga”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan dan arahan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Endhah Purwandari, S.Si., M.Si., dan Dr. Edy Supriyanto, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing yang telah meluangkan waktu, pikiran, serta perhatian demi selesainya penelitian dan penulisan skripsi ini;
2. Drs. Yuda Cahyoargo H, M.Sc., Ph.D., dan Supriyadi, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan masukan, kritikan dan saran demi kesempurnaan skripsi ini;
3. Drs. Sujito, P.hD., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing dan memberikan motivasi;
4. sahabat-sahabat fisika angkatan 2012 (Lorentz2012) yang telah memberikan semangat;
5. semua pihak yang turut membantu demi selesainya skripsi ini.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Penulis berharap tulisan ini dapat bermanfaat bagi disiplin ilmu Fisika serta kepada setiap pembacanya.

Jember, September 2016

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 PEMBIMBING</b> .....	v
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	vi
<b>RINGKASAN</b> .....	vii
<b>PRAKATA</b> .....	ix
<b>DAFTAR ISI</b> .....	x
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xvi
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	3
<b>1.3 Batasan Masalah</b> .....	4
<b>1.4 Tujuan Penelitian</b> .....	4
<b>1.5 Manfaat Penelitian</b> .....	4
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	5
<b>2.1 Sel Surya</b> .....	5
<b>2.2 Bahan Semikonduktor</b> .....	7
2.2.1 Semikonduktor Intrinsik .....	8
2.2.2 Semikonduktor Ekstrinsik .....	10
<b>2.3 Dioda Sel Surya (Persambungan p-n)</b> .....	13
<b>2.4 Pengaruh Ketebalan Lapisan-p pada Dioda Sel Surya</b> .....	17

<b>2.5 Perumusan Persamaan Matematis .....</b>	<b>21</b>
2.5.1 Persamaan Poisson .....	21
2.5.2 Persamaan Kontinuitas Pembawa Muatan.....	22
<b>2.6 Parameter Sel Surya.....</b>	<b>24</b>
2.6.1 Kurva Karakteristik I-V Sel Surya.....	24
2.6.2 Arus Hubung Singkat ( <i>I<sub>sc</sub></i> ) .....	26
2.6.3 Tegangan Hubung Terbuka ( <i>V<sub>oc</sub></i> ) .....	27
2.6.4 Daya Maksimum .....	28
2.6.5 <i>Fill Factor</i> ( <i>FF</i> ) .....	28
<b>2.7 Metode Elemen Hingga .....</b>	<b>28</b>
<b>BAB 3. METODE PENELITIAN.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1 Jenis Penelitian .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2 Tempat dan Waktu Penelitian .....</b>	<b>31</b>
<b>3.3 Prosedur Penelitian .....</b>	<b>31</b>
3.3.1 Tahapan Simulasi .....	32
3.3.2 Parameter Dioda Silikon .....	34
3.3.3 Geometri Dioda Sel Surya.....	35
3.3.4 Pengaturan Kondisi Batas .....	36
3.3.5 Persamaan Poisson dan Kontinuitas Pembawa Muatan .....	37
3.3.6 Pembuatan Grafik Karakteristik I-V .....	38
<b>3.4 Analisis Data.....</b>	<b>39</b>
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1 Pengaruh Variasi Ketebalan Lapisan-p Terhadap Rapat     Arus Hubung Singkat yang Dihasilkan Dioda Sel Surya.....</b>	<b>42</b>
<b>4.2 Pengaruh Variasi Ketebalan Lapisan-p Terhadap Arus     Saturasi Singkat yang Dihasilkan Dioda Sel Surya.....</b>	<b>43</b>

<b>4.3 Pengaruh Variasi Ketebalan Lapisan-p Terhadap Tegangan yang Dihasilkan Dioda Sel Surya.....</b>	<b>44</b>
<b>4.3 Kelemahan dan Kelebihan Berdasarkan Permasalahan Pada Penelitian ini.....</b>	<b>45</b>
<b>BAB 5. PENUTUP .....</b>	<b>47</b>
<b>5.1 Kesimpulan .....</b>	<b>47</b>
<b>3.4 Saran .....</b>	<b>45</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>48</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>53</b>

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Perkembangan pemasaran PV ( <i>photovoltaic</i> ) 2004-2010 .....	5
2.2 Proses pengubahan energi matahari menjadi energi listrik pada sel surya.....	6
2.3 Model keadaan pita energi material semikonduktor, (a) selisih antara pita energi konduksi dengan pita energi valensi ini dinamakan celah pita energi ( <i>energy bandgap</i> ), (b) sejumlah elektron valensi pada kulit terluar yang menempati keadaan pita valensi, (c) elektron sudah terlepas dari ikatan kovalen berada dalam keadaan pita konduksi .....	8
2.4 Struktur kristal Silikon .....	9
2.5 (a) Kristal Silikon dengan atom pengotor Fosfor, (b) Energi gap semikonduktor tipe-n .....	10
2.6 (a) Kristal Silikon dengan atom pengotor Boron, (b) Energi gap semikonduktor tipe-p .....	12
2.7 Aliran difusi dan aliran <i>drift</i> elektron dan <i>hole</i> .....	14
2.8 Proses aliran arus listrik pada dioda sel surya persambungan p-n .....	16
2.9 Aliran pembawamuatan dioda sel surya (persambungan p-n) berdasarkan konsep pita energi .....	18
2.10 Efek pergeseran kurva I-V akibat iluminasi, (a) Kurva karakteristik I-V tanpa iluminasi, yang sama dengan sebuah dioda, (b) Kurva karakteristik I-V mengalami pergeseran ketika cahaya mengenai dioda sel surya .....	25

2.11	Kurva karakteristik I-V sel surya .....	26
2.12	Geometri dioda sel surya Si 1 dimensi dengan <i>mesh</i> .....	29
3.1	Diagram alir penelitian .....	32
3.2	Diagram alir kegiatan simulasi .....	33
3.3	Geometri dioda sel surya yang dalam bentuk 3 dimensi .....	36
3.4	Geometri divais sel surya 1D dengan persambungan p-n (0,7 $\mu\text{m}$ /3,5 $\mu\text{m}$ ) .....	36
4.1	Hasil simulasi kurva karakteristik I-V dioda sel surya untuk variasi ketebalan lapisan-p, dengan ketebalan lapisan-n 3,5 $\mu\text{m}$ .....	41

**DAFTAR LAMPIRAN**

	Halaman
A Kurva Karakteristik I-V Dioda Sel Surya Si Persambungan P-N Pada Variasi Ketebalan Lapisan-P .....	53
B Karakteristik Rapat Arus-Tegangan Dioda Sel Surya Si Persambungan P-N Pada Variasi Ketebalan Lapisan-P.....	58



## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Sel surya menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang mengkonversi langsung energi matahari menjadi energi listrik. Pembangkit listrik tenaga surya merupakan sumber energi alternatif yang aman, bersih dan mudah digunakan dimanapun (Hoppmann *et al*, 2013; Liu *et al*, 2013). Perkembangan kegiatan penelitian terhadap peningkatan kinerja sel surya terus dilakukan sejak awal eksploitasi sel surya. Optimasi desain dalam pembuatan sel surya dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa parameter yang mempengaruhi kinerja sel surya. Pengaruh perubahan ketebalan lapisan sel surya dalam mengoptimalkan kinerja sel surya telah diteliti oleh Li dan Gong (2010); Belfar (2015); Kabir *et al* (2012); Ballmann (2014); dan Beaucarne (2007). Pada penelitian sebelumnya telah diteliti oleh Li dan Gong (2010) tentang pengaruh peran ketebalan lapisan-p terhadap karakteristik I-V pada sel surya berbasis material kristal Silikon (Si) persambungan p-n dengan menggunakan *software* AMPS (*Analysis of Microelectronic and Photonic Structure*).

Persambungan p-n merupakan salah satu aplikasi dari semikonduktor yang dimanfaatkan dalam penciptaan piranti dioda. Dioda semikonduktor dari persambungan p-n terbuat dari bahan semikonduktor tipe-p yang menjadi sisi anoda dan tipe-n menjadi sisi katoda. Persambungan p-n akan mengakibatkan arus difusi berlangsung secara spontan dimana hal ini terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi pembawa muatan. Proses difusi ini menyebabkan penumpukan elektron dan *hole* pada lapisan persambungan, sehingga terbentuklah lapisan deplesi. Pembentukan lapisan deplesi ini akan menghasilkan *barrier potential* (potensial penghalang) yang cukup besar untuk menghalangi aliran difusi dan elektron-elektron

bebas. *Barrier potential* dapat dilalui dengan mengaplikasikan energi foton eksternal. Divais yang demikian yang sering dimanfaatkan sebagai dioda sel surya. Kinerja dioda sel surya dapat ditingkatkan dengan mempertimbangkan parameter penting yakni mencakup ketebalan lapisan sel surya (Kabir *et al*, 2012).

Optimalisasi unjuk kerja sel surya dapat dilakukan dengan cara memvariasikan ketebalan lapisan atau suatu parameter divais tertentu dan mengasumsikan parameter-parameter lainnya konstan. Meskipun demikian, parameter divais ini nilainya masih dipengaruhi oleh struktur dan karakteristik material. Permasalahan pertama yang ditemukan pada sel surya yaitu jika lapisan-p terlalu tebal akan mengakibatkan banyak energi foton yang terserap dalam lapisan-p sehingga akan menyerap energi foton yang dibutuhkan lapisan-n untuk proses generasi, namun apabila lapisan-p terlalu tipis potensial difusi tidak dapat terbentuk (Li dan Gong, 2010; Saga, 2010; Belfar, 2015; Usman, 2006). Perubahan ketebalan lapisan-p dari dioda akan mempengaruhi jumlah pembawa muatan, dengan demikian arus yang dihasilkan juga akan berubah terhadap perubahan ketebalan lapisan-p. Optimalisasi terhadap ketebalan lapisan-p dari dioda sangat dibutuhkan untuk mendapatkan geometri optimal dari divais yang akan dibuat (Karim, 2004).

Hasil penelitian Li dan Gong (2010), menunjukkan bahwasanya karakteristik I-V sel surya akan lebih baik pada ketebalan lapisan-p yang lebih tipis, meskipun demikian ketebalan lapisan-p juga memiliki nilai minimum agar dalam sel surya tetap terbentuk potensial difusi. Selain itu, hasil pemodelan yang telah dilakukan oleh Fandayani (2014) untuk jenis persambungan p-n dengan menggunakan metode elemen hingga (*finite elemen method*), menunjukkan adanya kebergantungan distribusi elektron dan *hole* terhadap variasi ketebalan lapisan-p dalam divais sel surya berbasis material kristal Silikon. Metode elemen hingga merupakan salah satu metode yang penggunaannya lebih fleksibel dibandingkan AMPS. Namun, pada penelitian tersebut belum ada kajian bagaimana pengaruh ketebalan lapisan-p terhadap kinerja sel surya. Adanya perubahan ketebalan lapisan-p akan menyebabkan adanya perubahan kurva karakteristik arus-tegangan (I-V). Kinerja sel surya dapat

diamati berdasar kurva karakteristik arus-tegangan yang dihasilkan. Kurva karakteristik arus-tegangan menjadi parameter kualitas dari sel surya, semakin besar luasan yang dihasilkan di bawah kurva arus-tegangan maka kinerja sel surya tersebut semakin baik.

Permasalahan kedua yang tidak kalah penting dalam kegiatan penelitian untuk mengetahui karakteristik I-V dioda sel surya yang berguna demi meningkatkan atau memberi informasi yang mengindikasikan kinerja yang baik untuk dioda sel surya yaitu biaya. Permasalah biaya dalam kegiatan penelitian dapat diatasi dengan kegiatan penelitian berbasis simulasi. Simulasi pada penelitian ini dilakukan untuk memprediksi pengaruh ketebalan lapisan-p terhadap sifat kelistrikan dioda sel surya yang dihasilkan dengan hasil data pendukung berupa hubungan antara nilai rapat arus dengan tegangan. Berdasarkan karakteristik nilai rapat arus-tegangan yang dihasilkan maka dapat diketahui sifat kelistrikan dioda sel surya yang diaplikasikan tersebut.

Berdasarkan latar belakang tersebut pada penelitian ini akan dilakukan simulasi karakteristik arus-tegangan dioda sel surya Silikon (persambungan p-n) dengan variasi ketebalan lapisan-p. Pemodelan dioda sel surya dilakukan dalam bentuk 1D, sehingga karakteristik arus-tegangan ditinjau sepanjang geometri. Karakteristik arus-tegangan diperoleh dengan menggunakan metode elemen hingga. Metode elemen hingga merupakan metode yang dilakukan dengan membagi geometri material menjadi elemen-elemen kecil dengan penyelesaian menggunakan persamaan differensial divais semikonduktor. Metode elemen hingga memiliki kelebihan selain dapat menyelesaikan persamaan differensial divais semikonduktor, juga mampu menggambarkan geometri dari divais, sehingga hasil simulasi ini lebih mudah untuk dianalisis dibandingkan dengan AMPS seperti yang dilakukan oleh penelitian sebelumnya.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang dibahas dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh variasi ketebalan lapisan-p terhadap sifat kelistrikan dioda sel surya Si persambungan p-n berdasarkan kurva karakteristik I-V dengan menggunakan metode elemen hingga?

## 1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Geometri dioda dimodelkan dalam bentuk 1D;
2. Parameter yang diinputkan merujuk pada Daniellson (2000);
3. Metode yang digunakan adalah metode elemen hingga;
4. Dioda persambungan p-n diaplikasikan sebagai divais sel surya.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh variasi ketebalan lapisan-p terhadap sifat kelistrikan dioda sel surya Si persambungan p-n berdasarkan kurva karakteristik I-V menggunakan metode elemen hingga.

## 1.5 Manfaat Penelitian

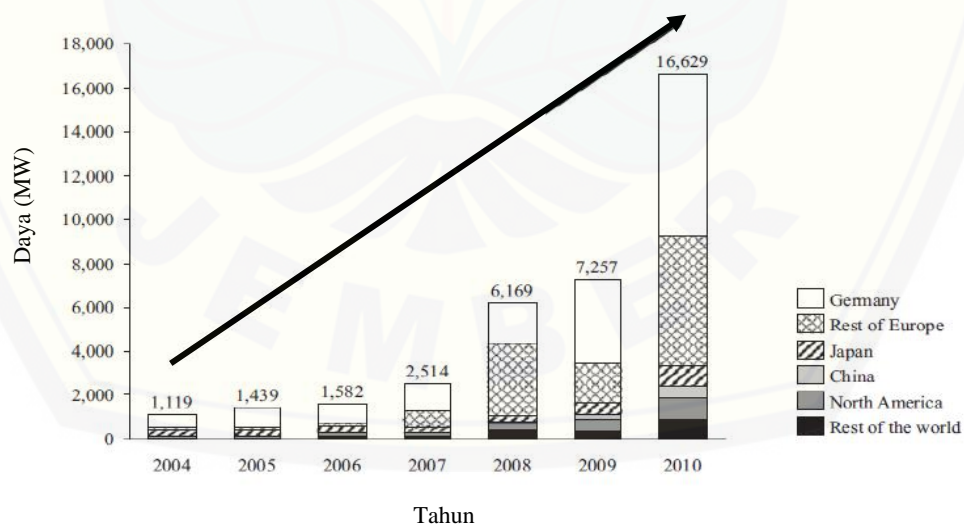
Adapun beberapa manfaat pada penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Memberikan informasi tentang pengaruh variasi ketebalan lapisan-p terhadap karakteristik rapat arus-tegangan pada dioda sel surya Si, yang diselesaikan dengan menggunakan metode elemen hingga;
2. Karakteristik aliran pembawa muatan pada dioda sel surya dapat dianalisis, sehingga menambah pemahaman pembaca;
3. Meningkatkan kegiatan penelitian yang positif, demi mengembangkan pemanfaatan dioda sel surya.

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

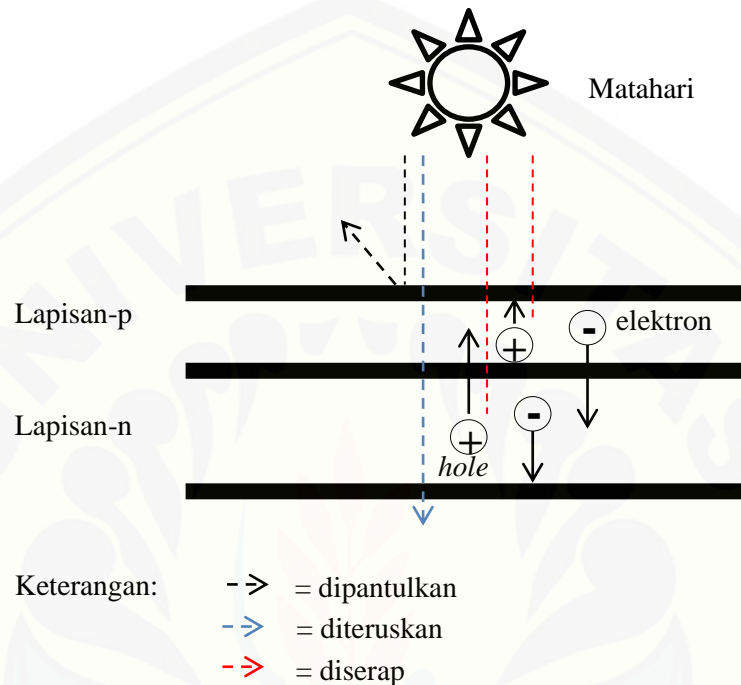
### 2.1 Sel Surya

Sel surya pertama kali dibuat pada tahun 1953 dan terus berkembang hingga sekarang (Saga, 2010; Pearson, 1985; Chapin *et al.*, 1954). Tingkat kebutuhan akan ketersediaan listrik yang semakin meningkat, sel surya menjadi alternatif sebagai pembangkit energi listrik yang bersih dan aman. Sel surya merupakan alat yang dapat mengubah energi matahari menjadi energi listrik. Sedangkan proses konversi cahaya menjadi energi listrik disebut dengan fotovoltaik (*photovoltaic*). Efek fotovoltaik ini ditemukan oleh Becquerel pada tahun 1839, dimana Becquerel mendeteksi adanya tegangan ketika cahaya matahari mengenai elektroda pada larutan elektrolit (Honsberg dan Bowden, 1999). Pemanfaatan energi terbarukan ini memiliki posisi yang sangat penting dalam mengatasi kekurangan energi listrik, sehingga tingginya pemasaran yang ditunjukkan grafik tabel dibawah menjadikan penelitian eksploitasi sel surya terus dilakukan.



Gambar 2.1 Perkembangan pemasaran PV (*photovoltaic*) 2004-2010 (Sumber: EPIA, 2011)

Pada dasarnya sel surya terbuat dari bahan semikonduktor yang bekerja dengan proses fotovoltaiik. Proses pengubahan energi matahari menjadi energi listrik ditunjukkan dalam Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Proses pengubahan energi matahari menjadi energi listrik pada sel surya (Sumber: Yuwono, 2005)

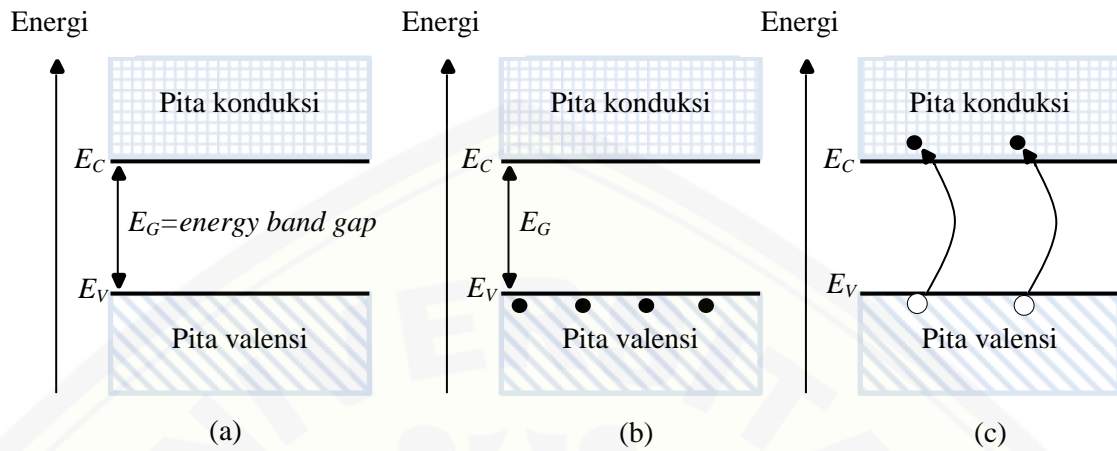
Ketika energi matahari yang terdiri dari foton jatuh pada permukaan bahan sel surya, sebagian akan diserap, dipantulkan, atau dilewatkan. Hanya foton yang memiliki energi lebih besar dari tingkat *energy band gap* bahan yang dapat membebaskan elektron dari ikatan atomnya, sehingga timbullah arus listrik. Bahan semikonduktor Silikon digunakan sebagai bahan dasar pembuatan sel surya karena memiliki energi *gap* sekitar 1,11 eV pada temperatur ruang sehingga memiliki kemampuan untuk menyerap spektrum matahari lebih banyak (Ibrahim, 2011). Keunggulan Silikon sebagai bahan dasar sel surya antara lain; ketersediaannya berlimpah di alam, tahan terhadap kelembaban, tahan lama (sampai 20 tahun), tahan terhadap radiasi matahari, dan dapat beroperasi pada rentang temperatur yang lebar (dari  $-40^{\circ}\text{C}$  sampai  $150^{\circ}\text{C}$ )

(Dowcorning, 2009). Pembuatan sel surya didesain dengan mempertimbangkan pengaruh dari parameter-parameter lain untuk mengoptimalkan kinerja dari sel surya. Oleh karenanya pembuatan sel surya masih bergantung pada parameter-parameter penting lainnya, seperti ketebalan lapisan, konsentrasi pengotor, temperatur operasional, serta parameter-parameter devais lainnya (Karim *et al*, 2004).

## 2.2 Bahan Semikonduktor

Bahan semikonduktor merupakan bahan yang memiliki nilai konduktivitas sekitar  $(10^4 - 10^{-8}) \Omega^{-1}cm^{-1}$  dan berada diantara bahan konduktor dan bahan isolator. Pembawa muatan semikonduktor terdiri dari elektron dan *hole*. Elektron merupakan pembawa muatan negatif yang nilai muatannya  $(1,6 \times 10^{-19})$  C, sedangkan tempat yang ditinggalkan oleh elektron disebut *hole*, bermuatan positif karena kehilangan elektron (Sze dan kwok, 2007). Material semikonduktor mempunyai *energy gap* lebih kecil dari 6 eV. Misalnya material Silikon pada temperatur ruang memiliki *energy gap* sebesar 1,11 eV (Purri dan Babbar, 2001). Bahan semikonduktor yang paling sering digunakan yaitu bahan semikonduktor Silikon (Si) dan Germanium (Ge). Adapun bahan (Si) merupakan bahan semikonduktor yang ketersediannya sangat berlimpah di alam.

Konsep pita energi yang dimiliki semikonduktor terdapat dua jenis yaitu pita konduksi dan pita valensi. Pita konduksi merupakan pita energi yang diisi oleh pembawa muatan negatif (elektron) sedangkan pita valensi merupakan pita energi yang diisi oleh pembawa muatan positif (*hole*). Selisih antara pita energi konduksi dengan pita energi valensi ini dinamakan celah pita energi (*energy band gap*). Pemberian energi dapat memacu elektron pada pita valensi untuk tereksitasi menuju ke pita konduksi, sehingga akan muncul *hole* pada pita valensi dan elektron pada pita konduksi seperti yang terlihat pada Gambar 2.3.



Keterangan:

elektron= ● hole= ○

Gambar 2.3 Model keadaan pita energi material semikonduktor, (a) selisih antara pita energi konduksi dengan pita energi valensi ini dinamakan celah pita energi (*energy bandgap*), (b) sejumlah elektron valensi pada kulit terluar yang menempati keadaan pita valensi, (c) elektron sudah terlepas dari ikatan kovalen berada dalam keadaan pita konduksi (Sumber: Singh, 2003)

Berdasarkan tingkat kemurnian atom penyusunnya, bahan semikonduktor dapat dibedakan menjadi bahan semikonduktor intrinsik dan semikonduktor ekstrinsik. Semikonduktor intrinsik merupakan bahan semikonduktor yang belum mengalami penyisipan oleh atom unsur lain dengan kata lain semikonduktor intrinsik ialah atom yang masih dipertahankan tingkat kemurniannya, sedangkan semikonduktor ekstrinsik ialah semikonduktor yang telah mengalami penyisipan oleh atom unsur lain yang berasal dari golongan III-A ataupun golongan V-A.

### 2.2.1 Semikonduktor Intrinsik

Menurut Purri dan Babbar (2001), konsentrasi elektron pada semikonduktor intrinsik sama dengan konsentrasi *hole*. Secara matematis konsentrasi *hole* sama dengan konsentrasi elektron dapat dituliskan:



$$p = n = n_i \quad (2.1)$$

Keterangan:

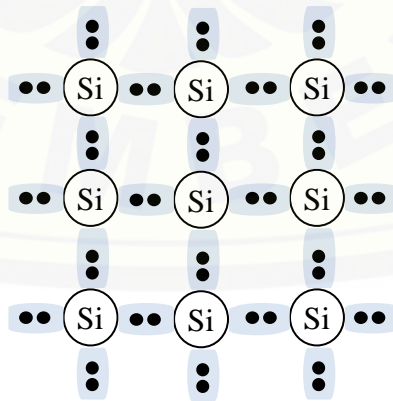
$n_i$  = konsentrasi intrinsik ( $\text{cm}^{-1}$ )

$p$  = konsentrasi *hole* ( $\text{cm}^{-1}$ )

$n$  = konsentrasi elektron ( $\text{cm}^{-1}$ )

Susunan ini memberikan keadaan pita valensi terisi penuh elektron dan keadaan pita konduksi kosong, sehingga pada bahan semikonduktor tidak terjadi aliran arus listrik. Bahan semikonduktor intrinsik memiliki nilai konduktivitas yang relatif kecil sehingga mobilitas pembawa muatan menjadi kecil (Gareso, 2012).

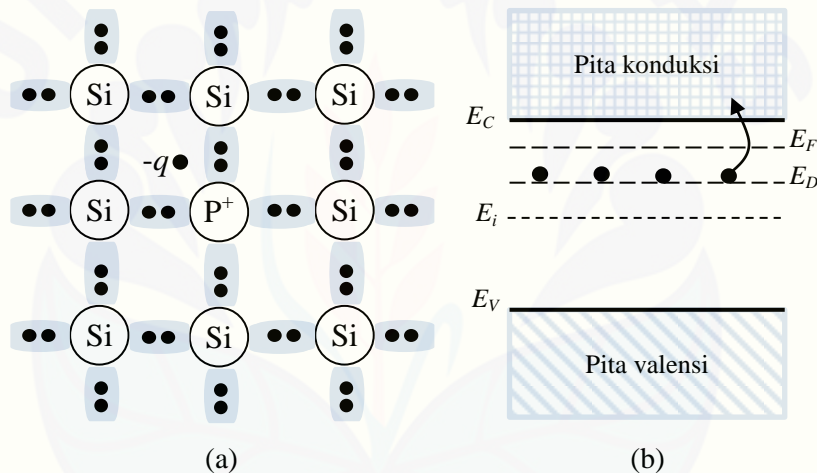
Semikonduktor intrinsik merupakan bahan semikonduktor murni yang berasal dari golongan IV-A pada tabel periodik, misalnya Silikon (Si) atau Germanium (Ge) saja. Pada semikonduktor Silikon (Si), satu atom memiliki 4 elektron valensi yang berikatan dengan 4 atom Silikon (Si) lainnya. Karakteristik utama dari kristal Silikon adalah susunan atom-atom Silikonnya teratur. Pada kristal Silikon, atom Silikon yang satu dengan atom Silikon lainnya akan diikat dengan dua elektron dan ikatannya disebut dengan ikatan kovalen. Ikatan kovalen ini terjadi karena atom Silikon memakai secara bersama-sama empat elektron valensi yang dimilikinya dengan atom Silikon lainnya (Fukuda, 1999).



Gambar 2.4 Struktur kristal Silikon (Sumber: Fukuda, 1999)

### 2.2.2 Semikonduktor Ekstrinsik

Adapun material semikonduktor ekstrinsik merupakan material semikonduktor yang telah disisipi atom lain yang berasal dari golongan III-A (atom bervalensi tiga) ataupun golongan V-A (atom bervalensi lima). Semikonduktor ekstrinsik dengan pembawa muatan mayoritas elektron dan pembawa muatan minoritasnya *hole* disebut semikonduktor tipe-n. Semikonduktor tipe-n dapat dibuat dengan pemberian atom pengotor yang bervalensi lima pada atom yang bervalensi empat. Atom-atom pengotor yang sering dipakai berasal dari golongan V-A misalnya Fosfor (P) atau Arsen (As) dalam konsentrasi tertentu (Kittel, 2005).



Gambar 2.5 (a) Kristal Silikon dengan atom pengotor Fosfor, (b) Energi gap semikonduktor tipe-n (Sumber: Purri dan Babbar, 2001)

Gambar 2.5 menunjukkan kristal Silikon dengan atom pengotor bervalensi lima berupa atom Fosfor (P). Ketika atom Si yang mempunyai empat elektron valensi didoping dengan atom P yang mempunyai lima elektron valensi, maka ada satu elektron bebas yang disebut sebagai atom donor. Dengan demikian maka Silikon menjadi semikonduktor tipe-n. Konsentrasi atom donor secara matematis sebagai berikut (Purri dan Babbar, 2001):

$$N_D^+ = N_D e^{\left[-\left(\frac{E_F - E_D}{kT}\right)\right]} \quad (2.2)$$

$$E_F = \frac{E_D + E_C}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left( \frac{N_D}{N_C} \right) \quad (2.3)$$

Pada temperatur 0 K sehingga diperoleh persamaan berikut,

$$E_F = \frac{E_D + E_C}{2} \quad (2.4)$$

Keterangan:

$N_D^+$  = konsentrasi atom donor ( $\text{cm}^{-3}$ )

$N_D$  = konsentrasi total donor ( $\text{cm}^{-3}$ )

$N_C$  = konsentrasi pita konduksi ( $\text{cm}^{-3}$ )

$E_F$  = energi fermi (Joule)

$E_D$  = energi donor (Joule)

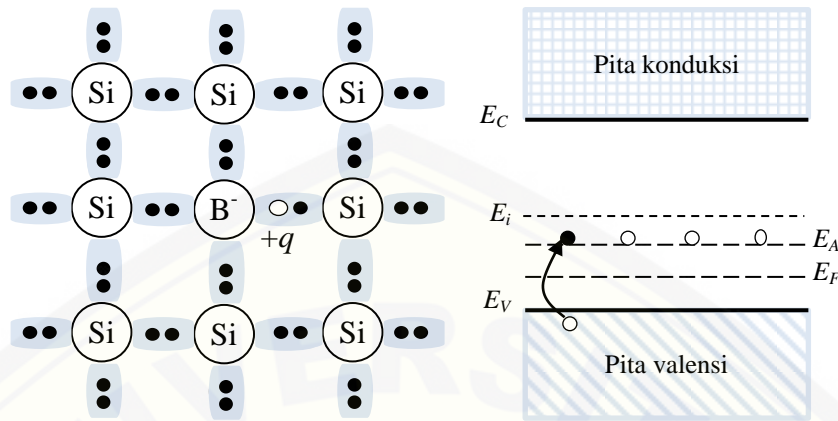
$E_C$  = energi pita konduksi (Joule)

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

$T$  = temperatur (K)

Tingkat energi fermi yang dimiliki atom Si bergeser mendekati pita konduksi oleh karena kehadiran tingkat energi donor ( $E_D$ ) dari atom P. Sebelum atom-atom donor terionisasi, tingkat energi donor terisi elektron yang merupakan elektron kelima dari setiap atom donor. Bila atom donor terionisasi ( $P^+$ ), elektron bertransisi dari tingkat donor ke pita konduksi (Purri dan Babbar, 2001).

Semikonduktor ekstrinsik dengan pembawa muatan mayoritas *hole* dan pembawa muatan minoritas elektron disebut semikonduktor tipe-p. Semikonduktor tipe-p dapat dibuat dengan pemberian atom pengotor yang bervalensi tiga pada semikonduktor intrinsik. Atom-atom pengotor yang sering dipakai berasal dari golongan III-A contohnya Boron (B) atau Galium (Ga). Gambar 2.6 merupakan contoh dari semikonduktor tipe-p adalah atom Si yang di doping dengan Boron yang mempunyai tiga elektron valensi, maka terdapat satu elektron dari atom Si yang tidak berpasangan, sehingga menghasilkan *hole*. Dengan demikian maka Silikon menjadi semikonduktor tipe-p dan Boron sebagai akseptor (Kittel, 2005).



Gambar 2.6 (a) Kristal Silikon dengan atom pengotor Boron, (b) Energi gap semikonduktor tipe-p (Sumber: Purri dan Babbar, 2001)

Menurut Purri dan Babbar (2001), tingkat energi fermi yang dimiliki atom Si bergeser mendekati pita valensi oleh karena kehadiran tingkat energi akseptor ( $E_A$ ) dari atom B. Tingkat ini muncul oleh karena adanya kekurangan elektron pada atom pengotor. Bila atom pengotor terionisasi, atom ini akan mendapatkan elektron dari elektron-elektron terikat pada pita valensi. Oleh karena itu atom pengotor disebut atom akseptor (atom penerima elektron). Konsentrasi atom akseptor secara matematis sebagai berikut:

$$N_A^- = \frac{N_A}{1 + e^{\left(\frac{E_A - E_F}{kT}\right)}} \quad (2.5)$$

$$E_F = \frac{E_A + E_V}{2} - \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_A}{N_V}\right) \quad (2.6)$$

Pada temperatur 0 K, diperoleh persamaan berikut,

$$E_F = \frac{E_A + E_V}{2} \quad (2.7)$$

dimana  $N_A^-$ ,  $N_A$ ,  $N_V$ ,  $E_A$ ,  $E_V$  secara berurutan didefinisikan sebagai konsentrasi akseptor, konsentrasi total akseptor, konsentrasi pita valensi, energi akseptor, dan energi pita valensi. Elektron yang bertransisi ke tingkat akseptor meninggalkan *hole* pada pita valensi. Mekanisme ini menghasilkan elektron bebas pada pita konduksi dalam jumlah yang jauh lebih kecil dari pada jumlah *hole* pada pita valensi.

### 2.3 Dioda Sel Surya (Persambungan p-n)

Sistem persambungan p-n dalam bahan semikonduktor merupakan sambungan antara semikonduktor tipe-p dengan semikonduktor tipe-n. Persambungan semikonduktor tipe-p dan semikonduktor tipe-n akan menghasilkan aliran arus difusi akibat perbedaan konsentrasi masing-masing dari keduanya (Sconza *et al.*, 1994). Rapat arus difusi untuk *hole* dan elektron dapat dituliskan dalam bentuk persamaan berikut (Gray, 2003):

$$J_p = -qD_p \nabla p \quad (2.8)$$

$$J_n = qD_n \nabla n \quad (2.9)$$

Keterangan:

$J_p$  = rapat arus *hole* (A/cm)

$J_n$  = rapat arus elektron (A/cm)

$n$  = konsentrasi elektron ( $\text{cm}^{-3}$ )

$p$  = konsentrasi *hole* ( $\text{cm}^{-3}$ )

$D_n$  = konstanta difusi elektron (cm/s)

$D_p$  = konstanta difusi *hole* (cm/s)

$q$  =  $1,602 \times 10^{-19}$  (C)

Proses difusi ini tidak berlangsung selamanya, proses difusi berakhir saat tidak ada lagi elektron yang memiliki cukup energi untuk mengalir. Akibat proses difusi elektron dan *hole*, tepat pada sambungan p-n terbentuk suatu daerah tanpa muatan bebas yang dikenal dengan daerah pengosongan atau daerah deplesi.

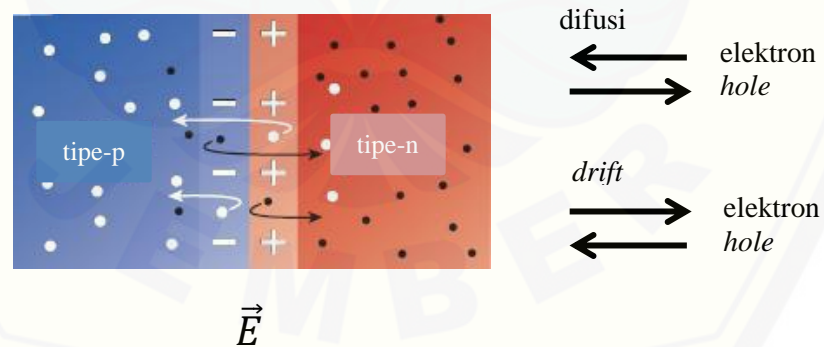
Daerah deplesi terbentuk akibat proses difusi yang terjadi, menyebabkan penumpukan elektron dan *hole* pada masing-masing ujung daerah lapisan semikonduktor tipe-p dan semikonduktor tipe-n. Dikarenakan muatan negatif terpisah dengan muatan positif maka di dalam daerah deplesi terbentuk medan listrik. Adanya medan listrik ini juga menghasilkan perbedaan potensial antara lapisan-p dan

lapisan-n yang disebut sebagai potensial penghalang (*barrier potensial*). Potensial penghalang memberi kesempatan terbentuknya arus *drift*. Arus *drift* merupakan aliran *hole* dan elektron yang disebabkan karena adanya medan listrik. Rapat arus *drift* untuk *hole* dan elektron dapat ditentukan dengan persamaan berikut (Purri dan Babbar, 2001):

$$J_p = qp\mu_p\vec{E} \quad (2.10)$$

$$J_n = -qn\mu_n\vec{E} \quad (2.11)$$

Dimana  $\mu_n$ ,  $\mu_p$ ,  $\vec{E}$  masing-masing secara berurutan adalah mobilitas elektron, mobilitas *hole* dan medan listrik. Pada daerah deplesi terjadi penumpukan muatan pada masing-masing sisi, sedangkan daerah lainnya dalam keadaan netral. Potensial penghalang yang terbentuk akan menahan terjadinya difusi pembawa muatan mayoritas dan memberi kesempatan terjadinya arus *drift* melalui sambungan seperti telah dijelaskan diatas. Besarnya potensial penghalang untuk Si sebesar 0,7 V pada suhu kamar (Malvino, 1979; Purri dan Babbar, 2001).



Gambar 2.7 Aliran difusi dan aliran *drift* elektron dan *hole* (Sumber: Sproul, 2003)

Gambar 2.7 menunjukkan rapat arus pada persambungan p-n yang memiliki dua jenis aliran arus di dalamnya, yaitu arus *drift* dan arus difusi (Colinge, 2002). Aliran arus keduanya memiliki arah yang berlawanan. Pergerakan *hole* dan elektron pada proses

difusi dari daerah dengan konsentrasi tinggi ke daerah yang memiliki konsentrasi lebih rendah (Boylestad, 2009). Aliran difusi elektron terbentuk dari semikonduktor tipe-n menuju semikonduktor tipe-p, berbeda halnya dengan aliran difusi *hole* yang terbentuk dari semikonduktor tipe-p menuju semikonduktor tipe-n (Kittel, 2005). Sedangkan arah pergerakan *hole* pada arus *drift* searah dengan arah medan listrik (Sproul, 2003). Persamaan untuk menentukan rapat arus pada bahan semikonduktor yang terdiri atas rapat arus *drift* dan arus difusi untuk masing-masing elektron dan *hole* sebagai berikut (Purri dan Babbar, 2001):

$$J_n = qn\mu_n E + qD_n \nabla n \quad (2.12)$$

$$J_p = qn\mu_p E - qD_p \nabla p \quad (2.13)$$

Rapat arus total pada persambungan p-n yang merupakan penjumlahan dari rapat arus elektron dan rapat arus *hole* adalah (Purri dan Babbar, 2001):

$$J_T = J_n + J_p \quad (2.14)$$

Keterangan:

$J_T$  = rapat arus total (A/cm)

$J_p$  = rapat arus *hole* (A/cm)

$\vec{J}_n$  = rapat arus elektron (A/cm)

$D_p$  = konstanta difusi *hole* (cm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>)

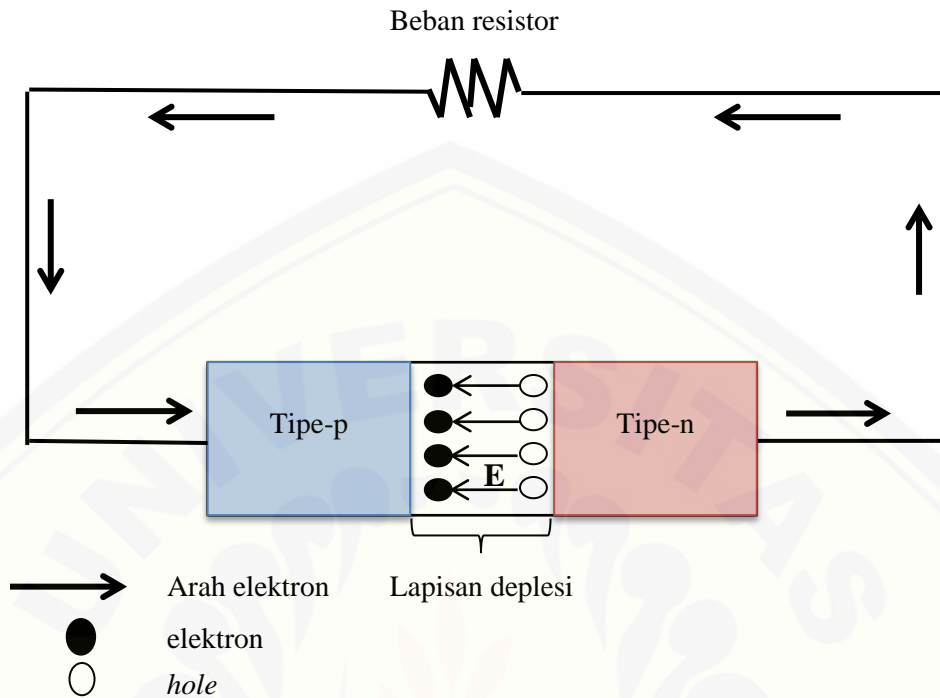
$D_n$  = konstanta difusi elektron (cm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>)

$\mu_p$  = mobilitas *hole* (cm<sup>2</sup>/Vs)

$\mu_n$  = mobilitas elektron (cm<sup>2</sup>/Vs)

$q$  = muatan elektron (1,602 x 10<sup>-19</sup> C)

$\vec{E}$  = medan listrik (V/cm)



Gambar 2.8 Proses aliran arus listrik pada dioda sel surya persambungan p-n (Sumber: Sproul, 2003)

Berdasarkan Gambar 2.8 adanya medan listrik  $E$ , akan mencegah seluruh elektron dan *hole* berpindah dari daerah persambungan, sehingga terbentuk juga potensial penghalang dan daerah ini disebut sebagai lapisan deplesi. Lapisan deplesi ini dapat dilalui pembawa muatan pada dioda sel surya dengan cara pemberian cahaya. Pemberian cahaya pada dioda sel surya, akan mengakibatkan proses generasi terbentuk. Generasi merupakan peristiwa timbulnya pasangan elektron dan *hole*, akibat elektron yang tereksitasi. Elektron eksitasi yang dihasilkan oleh lapisan-p akan tertarik menuju ke lapisan-n dikarenakan energi *band gap* yang terbentuk antara energi akseptor dengan energi konduksi memberi peluang elektron menuju pita konduksi, selain itu pergerakan *hole* berpindah dari lapisan-n menuju ke lapisan-p. Hal ini menyebabkan tegangan bagian n menjadi lebih negatif dan bagian p menjadi lebih positif. Perbedaan potensial antara p dan n inilah yang dapat dimanfaatkan energi yang terbentuk, dengan cara menghubungkan dengan resistor.

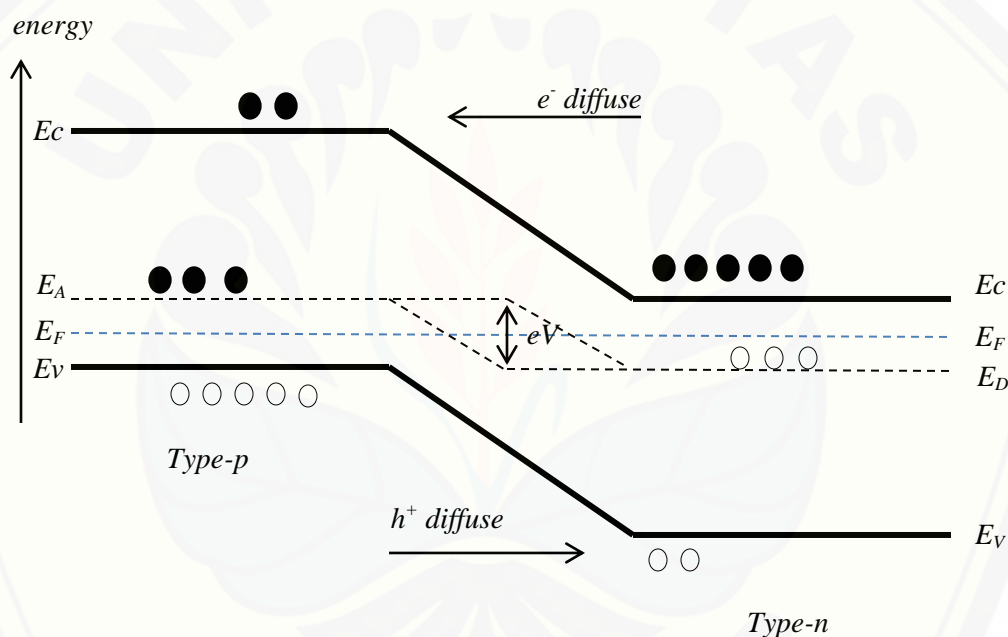


#### 2.4 Pengaruh Ketebalan Lapisan-p pada Dioda Sel Surya

Pada persambungan p-n, lapisan-p terbuat dari bahan semikonduktor tipe-p yang memiliki ketebalan lapisan tertentu. Lapisan-p disebut sebagai lapisan jendela (*window layer*) dikarenakan cahaya masuk melalui lapisan ini. Lapisan-p sebagai lapisan jendela diharapkan memiliki konduktivitas yang baik dan tidak menyerap energi foton yang diperlukan oleh lapisan-n, energi foton diperlukan untuk proses generasi pembawa muatan dalam lapisan-n. Peningkatan nilai konduktivitas pada lapisan-p dapat dilakukan dengan cara meningkatkan konsentrasi pembawa muatan dalam lapisan-p (Usman, 2006; Chattopadhyay, 1998). Peningkatan konsentrasi pembawa muatan dipengaruhi dari besar ketebalan lapisan-p. Semakin besar ketebalan lapisan-p semakin meningkat konsentrasi pembawa muatan di dalam lapisan-p. Perubahan ketebalan lapisan-p akan mempengaruhi distribusi elektron dan *hole*. Konsentrasi elektron dan *hole* meningkat seiring dengan penambahan ketebalan lapisan-p (Fandayani, 2014). Namun, apabila lapisan-p terlalu tebal akan mengakibatkan banyak energi foton yang terserap di dalam lapisan-p, sehingga mengurangi energi foton yang dibutuhkan oleh lapisan-n untuk proses generasi. Salah satu parameter penting material yang mudah diaplikasikan guna memperbaiki atau meningkatkan sifat fisis dari lapisan-p adalah ketebalan lapisan.

Kebergantungan karakteristik sel surya terhadap pengaruh ketebalan lapisan telah dinyatakan oleh Li dan Gong (2010); Ashry dan Fares (2012); Tool *et al* (2001); Belfar (2015); Kabir *et al* (2012); Usman (2006); Ballmann (2014); dan Beaucarne (2007). Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan pengembangan kegiatan penelitian untuk mengetahui pengaruh variasi ketebalan lapisan-p berdasarkan kurva karakteristik arus-tegangan dari sebuah divais sel surya Silikon dengan persambungan p-n. Karakteristik dari dioda sel surya sendiri beragam, hal tersebut nampak ketika dioda sel surya diberi cahaya, maka secara tidak langsung dioda sel surya akan mengalami proses fotovoltaiik. Proses fotovoltaiik seperti yang telah dijelaskan sebelumnya merupakan proses konversi cahaya menjadi energi listrik. Proses konversi cahaya menjadi energi listrik ini menghasilkan variasi arus dan

tegangan. Berdasarkan variasi arus dan tegangan yang dihasilkan dioda sel surya, parameter tersebut dapat disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara arus dan tegangan yang dikenal sebagai kurva karakteristik I-V. Kurva karakteristik I-V menggambarkan peristiwa aliran arus dan parameter tegangan yang terbentuk atau yang bekerja pada dioda sel surya ketika mengalami iluminasi (pencahayaan). Beberapa peristiwa yang nampak dalam bentuk kurva karakteristik tersebut, terlebih khusus pengaruh ketebalan lapisan-p pada dioda sel surya persambungan p-n, dapat dipahami melalui konsep pita energi berikut.



Gambar 2.9 Aliran pembawa muatan dioda sel surya (persambungan p-n) berdasarkan konsep pita energi (Sumber: Jia-Ming Liu, 2005)

Konsep pita energi di atas menjelaskan beberapa karakteristik aliran pembawa muatan pada dioda sel surya persambungan p-n. Karakteristik aliran pembawa muatan dioda sel surya dapat diketahui berdasarkan beberapa parameter yang dimiliki oleh dioda sel surya. Beberapa parameter yang dimiliki oleh dioda sel surya diantaranya; rapat arus hubung singkat, arus saturasi, serta tegangan hubung terbuka.

Berdasarkan konsep pita energi yang ditunjukkan Gambar 2.9 di atas, rapat arus hubung singkat terjadi ketika tegangan pada dioda sel surya sama dengan nol, dengan kata lain rapat arus hubung singkat ini merupakan peristiwa dimana *barrier potensial* yang terbentuk pada daerah persambungan memiliki nilai energi yang lebih rendah dibandingkan energi pembawa muatan yang melewatinya. Rapat arus hubung singkat dioda sel surya dapat mengalami perubahan ketika ketebalan lapisan-p divariasikan. Semakin tebal lapisan-p yang diaplikasikan, maka semakin menurun rapat arus hubung singkat yang terbentuk. Sebaliknya apabila semakin tipis lapisan-p yang diaplikasikan, maka semakin meningkat rapat arus hubung singkatnya.

Meningkatnya nilai rapat arus hubung singkat dikarenakan, energi foton yang jatuh pada lapisan-p ini mengakibatkan elektron dapat tereksitasi dari pita valensi menuju pita konduksi. Pada pita konduksi terdapat elektron namun tidak sebanyak jumlah elektron pada pita akseptor, hal tersebutlah yang membuat energi elektron pada lapisan-p lebih rendah dibandingkan lapisan-n yang memiliki jumlah elektron lebih banyak pada pita konduksi. Berdasarkan alasan tersebut, maka lapisan-p harus lebih tipis dibandingkan lapisan-n, dikarenakan lapisan-n membutuhkan energi foton yang lebih rendah dibandingkan lapisan-p untuk proses eksitasi elektron menuju pita konduksi, sehingga apabila lapisan-p yang sebagai lapisan jendela terlalu tebal maka energi foton yang diterima akan banyak terserap dalam lapisan-p.

Ketika banyak energi foton yang terserap pada lapisan-p, maka proses generasi pada lapisan-n tidak berlangsung secara maksimal, sehingga mengurangi jumlah elektron yang tereksitasi. Jumlah elektron eksitasi yang berkurang mengakibatkan jumlah rapat arus hubung singkat yang dihasilkan berkurang juga, sehingga apabila jumlah elektron yang tereksitasi meningkat maka rapat arus hubung singkat yang dihasilkan akan meningkat pula. Kesimpulan yang diperoleh, ketika lapisan-p yang diaplikasikan semakin tebal, maka rapat arus hubung singkat akan semakin menurun, dan sebaliknya apabila lapisan-p tipis, maka rapat arus hubung singkat akan meningkat. Rapat arus hubung singkat yang dihasilkan mempengaruhi rapat arus total yang dihasilkan sel surya pada setiap variasi tegangannya, sehingga rapat

arus total yang dihasilkan memiliki nilai yang linear. Ketika nilai rapat arus hubung singkat yang dihasilkan semakin meningkat, maka nilai rapat arus total yang dihasilkan akan meningkat pula, dan sebaliknya ketika nilai rapat arus hubung singkat semakin menurun, maka nilai rapat arus total akan semakin menurun.

Arus saturasi yang terbentuk pada dioda sel surya dapat dijelaskan berdasarkan konsep pita energi pada Gambar 2.9. Arus saturasi merupakan fenomena pergerakan elektron pada dioda sel surya ketika *barrier potensial* yang terbentuk pada daerah persambungan tidak dapat membendung pergerakan elektron, sehingga arus yang dihasilkan mengalami kejenuhan atau memiliki besar arus yang tetap. Namun arus yang tetap yang disebut sebagai arus saturasi ini tidak dapat berlangsung lama, ketika *barrier potensial* yang terbentuk semakin besar maka pergerakan elektron akan semakin menurun, sehingga arus yang dihasilkan akan ikut menurun sampai mendekati nol. Pada saat tidak ada arus yang mengalir atau arusnya sama dengan nol kondisi ini disebut sebagai tegangan hubung terbuka ( $V_{oc}$ ).

Tegangan hubung terbuka ( $V_{oc}$ ) pada dioda sel surya dapat berubah berdasarkan perubahan ketebalan lapisan-p. Apabila ketebalan lapisan-p semakin tebal, maka tegangan hubung terbuka yang dihasilkan akan semakin menurun dan sebaliknya apabila ketebalan lapisan-p semakin tipis, maka tegangan hubung terbuka akan semakin meningkat. Tegangan hubung terbuka yang semakin meningkat diakibatkan *barrier potensial* yang terbentuk belum cukup untuk menghambat pergerakan pembawa muatan pada dioda sel surya. Pergerakan pembawa muatan pada dioda sel surya dapat dipengaruhi dengan merubah ketebalan lapisan-p dari dioda sel surya persambungan p-n.

## 2.5 Perumusan Persamaan Matematis

Persamaan transport pembawa muatan yang digunakan dalam pemodelan devais sel surya Silikon adalah persamaan Poisson dan persamaan kontinuitas pembawa muatan. Kedua persamaan tersebut digunakan untuk memahami mekanisme fisis yang mungkin terjadi dalam divais sel surya.

### 2.5.1 Persamaan Poisson

Persamaan Poisson merupakan persamaan yang menunjukkan besar medan listrik ( $E$ ) yang dipengaruhi adanya rapat muatan ( $\rho$ ) sehingga dapat menimbulkan medan listrik. Hubungan antara rapat muatan dengan medan listrik dapat dituliskan secara matematis melalui persamaan Poisson berikut (Singh, 2003):

$$E = \frac{\rho}{\varepsilon} = -\nabla\Psi \quad (2.15)$$

Persamaan Poisson ini menunjukkan bahwa bahan memiliki beda potensial ( $\Psi$ ) yang dipengaruhi oleh rapat muatan dari bahan tersebut. Pembawa muatan bahan terdiri dari pembawa muatan elektron dan *hole*, sehingga persamaan Poisson pada dioda (persambungan p-n) dapat dituliskan sebagai berikut (Griffiths, 1999):

$$\nabla\Psi = -\frac{\rho}{\varepsilon} = -\frac{q}{\varepsilon}(p - n + N) \quad (2.16)$$

Keterangan:

$q$  = muatan elektron ( $1,602 \times 10^{-19}$  C)

$\varepsilon$  = permitivitas bahan (F/cm)

$p$  = konsentrasi *hole* ( $\text{cm}^{-1}$ )

$n$  = konsentrasi elektron ( $\text{cm}^{-1}$ )

$N$  = konsentrasi atom ( $\text{cm}^{-1}$ )

maka dapat disimpulkan persamaan Poisson di atas menyatakan bahwa divergensi dari medan listrik sebanding dengan total muatan dibagi dengan permitivitas bahan.

### 2.5.2 Persamaan Kontinuitas Pembawa Muatan

Persamaan kontinuitas pada material semikonduktor merupakan hubungan antara proses generasi, rekombinasi, dan rapat arus listrik akibat aliran *hole* dan elektron. Persamaan kontinuitas secara berturut-turut untuk aliran elektron dan *hole* diformulasikan sebagai berikut (Danielsson, 2000).

$$\frac{1}{q} \nabla J_n = R - G \quad (2.17)$$

$$\frac{1}{q} \nabla J_p = G - R \quad (2.18)$$

Keterangan:

$J_p$  = rapat arus *hole* (A/cm)

$J_n$  = rapat arus elektron (A/cm)

$G$  = laju generasi ( $\text{cm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )

$R$  = laju rekombinasi ( $\text{cm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )

Generasi merupakan proses transisi elektron bebas yang menyebabkan terbentuknya *hole* sehingga tercipta pasangan elektron-*hole* dalam dioda sel surya. Proses tersebut terjadi ketika dioda sel surya mendapat energi dari sinar matahari yang mengenai permukaan dioda sel surya. Laju pembangkitan elektron-*hole* ini disebut dengan laju generasi yang dapat ditentukan dengan persamaan berikut (Usman, 2006):

$$G = \frac{F\alpha}{1-P} (e^{-\alpha y} + P e^{\alpha y}) \quad (2.19)$$

Keterangan:

$G$  = laju generasi ( $\text{cm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )

$F$  = rapat fluks foton ( $\text{cm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )

$P$  = koefisien transmisi cahaya

$\alpha$  = koefisien absorpsi ( $\text{cm}^{-1}$ )

$y$  = posisi sel surya yang ditentukan dari tepi atas lapisan-p

Pada diagram energi, peristiwa generasi sebuah elektron bebas diilustrasikan dengan terjadinya transisi elektron dari pita valensi menuju pita konduksi. Menurut Puri dan Babbar (2001), rekombinasi merupakan suatu proses pergerakan elektron dari pita konduksi menuju pita valensi dengan melepas sejumlah energi yang nilainya sebesar celah pita energi dari material semikonduktor. Pelepasan energi ini dalam bentuk radiasi gelombang elektromagnetik. Proses penghilangan pasangan elektron-hole terjadi karena elektron pada pita konduksi bergerak ke pita valensi sehingga menghilangkan *hole* pada pita valensi dan elektron pada pita konduksi.

Laju rekombinasi ( $R$ ) bergantung pada jumlah pembawa muatan pada bahan semikonduktor. Pada bahan sel surya yang terbuat dari semikonduktor dengan transisi tidak langsung (*indirect transition*) seperti: Silikon (Si) dan Germanium (Ge), laju rekombinasinya dapat ditentukan dengan *Shockley Read Hall Recombination* ( $R$ ) berikut (Seet, 1998):

$$R = \frac{pn - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} \quad (2.20)$$

Keterangan:

$R$  = laju rekombinasi ( $\text{cm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )

$p$  = konsentrasi *hole* ( $\text{cm}^{-3}$ )

$n$  = konsentrasi elektron ( $\text{cm}^{-3}$ )

$n_i$  = konsentrasi intrinsik ( $\text{cm}^{-3}$ )

$\tau_p$  = waktu hidup rekombinasi *hole* ( $\mu\text{s}$ )

$\tau_n$  = waktu hidup rekombinasi elektron ( $\mu\text{s}$ )

$p_1$  = konsentrasi *hole* yang bergantung pada lokasi tingkat *trap* pada celah pita energi ( $\text{cm}^{-3}$ )

$n_1$  = konsentrasi elektron yang bergantung pada lokasi tingkat *trap* pada celah pita energi ( $\text{cm}^{-3}$ )

Sehingga dari persamaan pembawa muatan elektron dan *hole* di atas, maka persamaan (2.17) dan (2.18) menjadi:

$$\frac{1}{q} \nabla J_n = \frac{pn - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} - \frac{F\alpha}{1 - P} (e^{-\alpha y} + P e^{\alpha y}) \quad (2.21)$$

$$\frac{1}{q} \nabla J_p = \frac{F\alpha}{1 - P} (e^{-\alpha y} + P e^{\alpha y}) - \frac{pn - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} \quad (2.22)$$

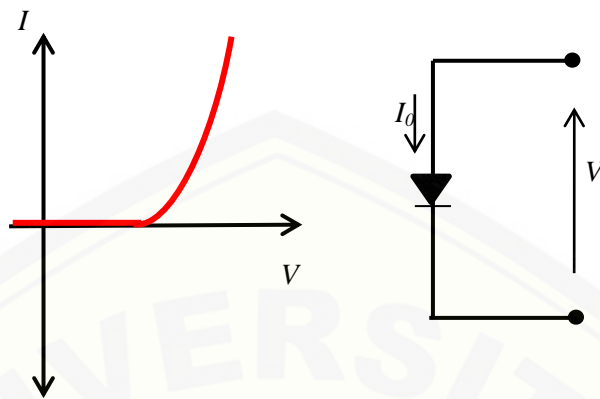
## 2.6 Parameter Sel Surya

Sifat kelistrikan dari dioda sel surya dapat diamati melalui beberapa parameter yang dimiliki sel surya. Sel surya memiliki parameter yang terdiri atas arus hubung singkat (*I<sub>sc</sub>*), tegangan hubung terbuka (*V<sub>oc</sub>*), daya maksimum (*P<sub>max</sub>*) serta *fill factor* (FF). *I<sub>sc</sub>* merupakan arus keluaran maksimum dari sel surya pada kondisi tidak ada hambatan sehingga arus ini mengalir pada saat tegangan sel surya sama dengan nol. *I<sub>sc</sub>* dapat juga dinyatakan dengan rapat arus hubung singkat *J<sub>sc</sub>*. *V<sub>oc</sub>* adalah tegangan maksimum yang dapat dicapai oleh sel surya. Tegangan ini terjadi pada saat arus pada sel surya sama dengan nol. Daya maksimum merupakan daya terbesar yang dapat dihasilkan oleh suatu sel surya, sedangkan *fill factor* merupakan perbandingan antara daya maksimum yang dihasilkan sel surya dengan perkalian antara *I<sub>sc</sub>* dan *V<sub>oc</sub>*. (Purwandari dan Winata, 2013; Spertino dan Akilimali, 2009; Bikaneria *et al* 2013; Lyakas *et al*, 1995; Ibrahim, 2011).

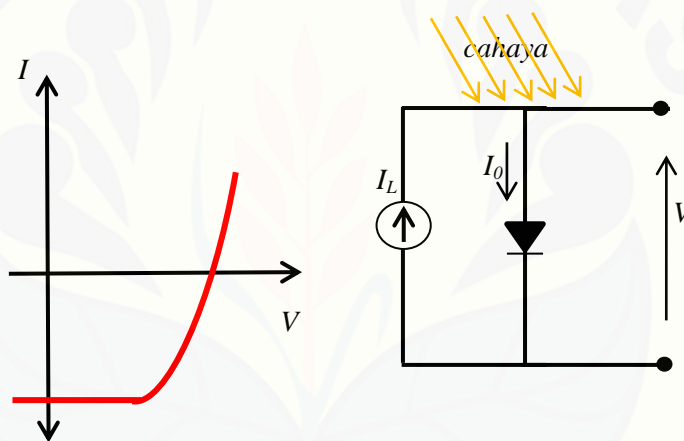
### 2.6.1 Kurva Karakteristik I-V Sel Surya

Kurva I-V merupakan kurva karakteristik arus-tegangan yang menggambarkan unjuk kerja dari sel surya. Iluminasi cahaya yang diterima dioda sel surya mengakibatkan pergeseran kurva I-V. Cahaya mengakibatkan kurva I-V dioda turun dari kuadran pertama ke kuadran empat seperti yang ditunjukkan Gambar 2.10.





(a)



(b)

Gambar 2.10 Efek pergeseran kurva I-V akibat iluminasi, (a) Kurva karakteristik I-V tanpa iluminasi, yang sama dengan sebuah dioda, (b) Kurva karakteristik I-V mengalami pergeseran ketika cahaya mengenai dioda sel surya (Honsberg dan Bowden, 1999)

Berdasarkan Gambar 2.10 dapat disimpulkan bahwa persamaan sel surya dapat diambil dari persamaan berikut:

$$I = I_0 \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - I_L \quad (2.23)$$

Keterangan:

$I$  = arus terminal sel surya (A)

$I_0$  = arus saturasi (A)

$I_L$  = arus akibat iluminasi (A)

$q$  = muatan elektron

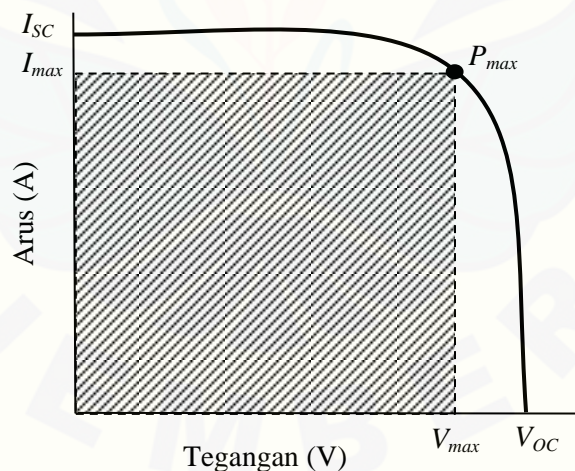
$V$  = tegangan terminal sel surya (V)

$k$  = konstanta Boltzmann (J/K)

$T$  = temperatur (K)

### 2.6.2 Arus Hubung Singkat ( $I_{sc}$ )

Arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ) ialah arus yang mengalir pada saat tegangan sel surya sama dengan nol. Dengan demikian nilai  $I_{sc}$  sebanding dengan  $I_L$ , yaitu arus yang disebabkan oleh proses generasi yang dihasilkan dari iluminasi cahaya matahari (Buwono, 2010).



Gambar 2.11 Kurva karakteristik I-V sel surya (Sumber: Ibrahim, 2011)

Proses generasi yang mempengaruhi besar arus hubung singkat secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut (Honsberg dan Bowden, 2008):

$$I_{sc} = qG(L_n + L_p) \quad (2.24)$$

Keterangan:

$I_{sc}$  = arus hubung singkat (A)

$q$  = muatan elektron ( $1,602 \times 10^{-19}$  C)

$G$  = laju generasi ( $\text{cm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )

$L_n$  = panjang arus difusi elektron (A)

$L_p$  = panjang arus difusi *hole* (A)

Rapat arus hubung singkat ( $J_{sc}$ ) merupakan perbandingan antara arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ) terhadap panjang penampang sel surya.

### 2.6.3 Tegangan Hubung Terbuka ( $V_{oc}$ )

Tegangan hubung terbuka ini terjadi ketika arus yang mengalir pada sel surya sama dengan nol, seperti terlihat pada Gambar 2.11. Persamaan  $V_{oc}$  secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut (Tool *et al*, 2001):

$$I = 0 = I_0 \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - I_L$$

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (2.25)$$

Keterangan:

$V_{oc}$  = tegangan hubung terbuka (V)

$q$  = muatan elektron

$k$  = konstanta Boltzmann (J/K)

$T$  = temperatur (K)

$I_0$  = arus saturasi (A)

$I_L$  = arus akibat iluminasi (A)

#### 2.6.4 Daya Maksimum ( $P_{max}$ )

Daya maksimum merupakan daya terbesar yang dapat dihasilkan oleh sel surya seperti nampak pada Gambar 2.11. Daya maksimum dihasilkan dari perkalian antara arus maksimum ( $I_{max}$ ) dan tegangan maksimum ( $V_{max}$ ). Arus dan tegangan maksimum terjadi pada saat sel surya menghasilkan daya maksimum.

#### 2.6.5 Fill Factor ( $FF$ )

Faktor pengisian (*fill factor*) merupakan parameter yang berfungsi untuk menentukan daya maksimum. Daerah yang diarsir pada Gambar 2.11 menunjukkan besarnya *fill factor* pada kurva yang memperlihatkan arus dan tegangan maksimum dalam kaitannya dengan  $I_{sc}$  dan  $V_{oc}$ , dimana secara matematis *fill factor* dapat dituliskan sebagai berikut (Purwandari dan Winata, 2013):

$$FF = \frac{I_{max} \times V_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (2.26)$$

Keterangan:

$I_{sc}$  = arus hubung singkat (A)

$V_{oc}$  = tegangan hubung terbuka (V)

$I_{max}$  = arus maksimum (A)

$V_{max}$  = tegangan maksimum (V)

Pada Gambar 2.11 terlihat bahwa daerah yang dibentuk oleh  $I_{max}$  dan  $V_{max}$  lebih kecil daripada daerah yang dibentuk oleh  $I_{sc}$  dan  $V_{oc}$ . Perbandingan inilah yang disebut dengan *fill factor*. *Fill factor* dikatakan baik apabila memiliki nilai mendekati 1.

### 2.7 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 diferensial semikonduktor (Polycarpou, 2006). Semakin kecil elemen yang didefinisikan, hasil yang diperoleh semakin akurat

(Usman, 2006). Dasar pendekatan persamaan diferensial semikonduktor tersebut dengan mengasumsikan bahwa setiap bagian memiliki solusi berupa fungsi sederhana tertentu. Selanjutnya, solusi umum dari material yaitu dengan menggabungkan solusi-solusi dari setiap bagian geometri material tersebut. Metode elemen hingga membagi geometri menjadi elemen-elemen kecil yang saling berikatan (*mesh*) dengan sejumlah titik simpul (*node*) sebagai irisan dari *mesh*.



Gambar 2.12 Geometri dioda sel surya Si 1 dimensi dengan *mesh* (Daniellson, 2000)

Metode elemen hingga memiliki kelebihan dalam memodelkan material semikonduktor yang memiliki struktur geometri tidak rata maupun distribusi medan listrik dan pembawa muatan yang tidak linier dalam setiap bagiannya (Usman, 2006). Penggunaan yang tidak terbatas sehingga tidak hanya untuk divais elektronik, menjadikan metode elemen hingga semakin meluas dalam penggunaannya. Seperti beberapa penelitian yang menggunakan metode elemen hingga dalam simulasi micro-chip (Roumanie *et al*, 2005; Tuomikoski *et al*, 2006), reaktor (Braescu *et al*, 2006; Curcio *et al*, 2006), teknik kimia (Guvelioglu dan Stenger, 2005; Pribil *et al*, 2006), perpipaan dalam teknik perminyakan (Jamiolahmady *et al*, 2006), ataupun industri pengolahan makanan (Romano *et al*, 2006). Demikian halnya dengan persoalan kompleksitas mekanisme konversi fotovoltaik pada sel surya (Usman, 2006).

Simulasi dari divais sel surya berikut dengan menggunakan pendekatan metode elemen hingga (*FEM*). Variabel yang digunakan pada simulasi divais semikonduktor adalah  $\psi$ ,  $p$ , dan  $n$ . Solusi umum masing-masing variabel tersebut jika diselesaikan dengan menggunakan metode elemen hingga adalah sebagai berikut:

$$\psi = \sum_{j=1}^a \psi_j \quad (2.27)$$

$$n = \sum_{j=1}^a n_j \quad (2.28)$$

$$p = \sum_{j=1}^a p_j \quad (2.29)$$

Ketiga variabel tersebut berhubungan dengan tingkat quasi-Fermi pembawa muatan dalam semikonduktor dengan persamaan (Danielsson, 2000):

$$n = n_i e^{\psi u} \quad (2.30)$$

$$p = p_i e^{-\psi v} \quad (2.31)$$

Keterangan:

$\psi$  = potensial elektrostatik (volt)

$n$  = konsentrasi elektron ( $\text{cm}^{-3}$ )

$p$  = konsentrasi *hole* ( $\text{cm}^{-3}$ )

$a$  = jumlah elemen

$j$  = elemen batas

$n_i$  = konsentrasi intrinsik elektron ( $\text{cm}^{-3}$ )

$p_i$  = konsentrasi intrinsik *hole* ( $\text{cm}^{-3}$ )

$u$  = variabel bebas elektron

$v$  = variabel bebas *hole*

## BAB 3. METODE PENELITIAN

### 3.1 Jenis Penelitian

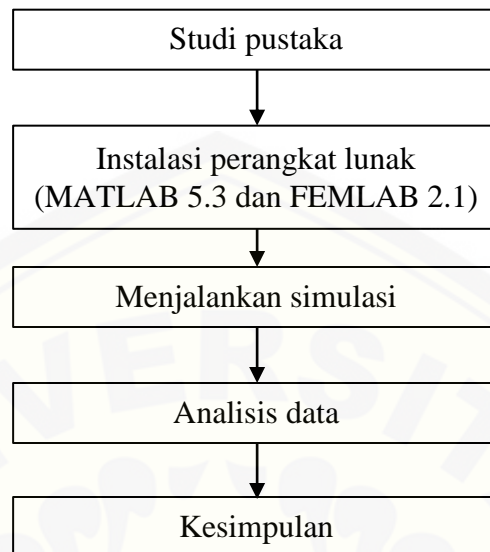
Penelitian yang dilakukan berupa kegiatan simulasi untuk mengetahui pengaruh ketebalan lapisan-p terhadap karakteristik I-V dioda sel surya Silikon. Karakteristik I-V dioda sel surya Silikon tersebut diperoleh melalui pengolahan parameter fisis yang telah diketahui. Jenis dari penelitian ini adalah penelitian kuantitatif karena karakteristik I-V diperoleh melalui perhitungan secara numerik.

### 3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Fisika Komputasi, Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember. Pelaksanaan kegiatan penelitian ini dimulai dari Februari 2016 sampai dengan September 2016.

### 3.3 Prosedur Penelitian

Proses kegiatan penelitian ditampilkan dalam bentuk diagram alir yang nampak pada Gambar 3.1. Kegiatan penelitian diawali dengan melakukan studi pustaka melalui berbagai sumber yang ada. Tahap selanjutnya melakukan penginstalan perangkat lunak yang akan digunakan MATLAB 5.3 dan FEMLAB 2.1. Metode elemen hingga (*finite element method*) sebagai metode penelitian yang akan digunakan. Adapun spesifikasi *hardware* komputer yang akan digunakan dalam proses simulasi dengan prosesor Intel (R) Core (TM) i3-2328M CPU 2.20GHz. Setelah melakukan penginstalan dilanjut tahap ketiga, menjalankan simulasi untuk menghasilkan profil distribusi pembawa muatan, dan grafik karakteristik I-V untuk variasi ketebalan lapisan-p. Hasil simulasi kemudian dianalisis untuk menentukan kesimpulan dari penelitian yang dilaksanakan.

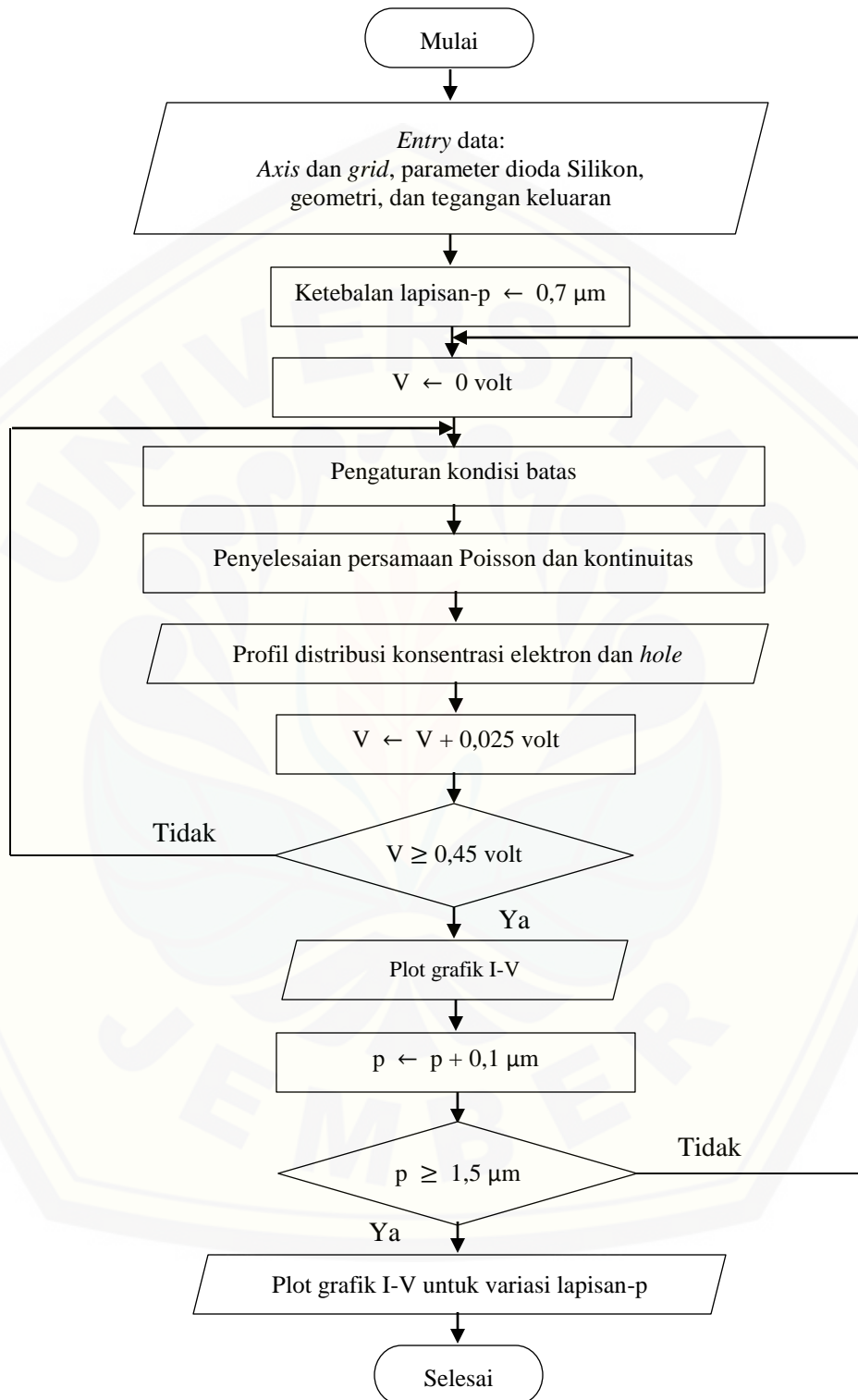


Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

### 3.3.1 Tahapan Simulasi

Proses kegiatan simulasi yang akan digunakan untuk menghasilkan kurva karakteristik I-V dioda sel surya Silikon di bawah variasi ketebalan lapisan-p dapat ditunjukkan pada Gambar 3.2. Simulasi dioda sel surya dibuat dalam bentuk 1D. Kegiatan simulasi diawali dengan memasukkan parameter-parameter yang digunakan, parameter dioda Silikon, dan geometri dioda dengan ketebalan lapisan-p awal  $0,7 \mu\text{m}$  dengan tegangan keluaran 0 volt. Selanjutnya dilakukan pengaturan kondisi batas yang kemudian dilanjutkan dengan penyelesaian persamaan Poisson dan kontinuitas sehingga didapatkan profil distribusi konsentrasi pembawa muatan dalam bentuk 1D, kemudian dilakukan pemvariasian tegangan keluaran dari 0 volt sampai 0,45 volt dengan kelipatan 0,025 volt sehingga didapatkan grafik kurva karakteristik I-V. Setelah grafik kurva karakteristik I-V diperoleh tahap selanjutnya adalah memvariasikan ketebalan lapisan-p dari  $0,7 \mu\text{m}$ ,  $0,8 \mu\text{m}$ ,  $0,9 \mu\text{m}$ ,  $1 \mu\text{m}$ ,  $1,1 \mu\text{m}$ ,  $1,2 \mu\text{m}$ ,  $1,3 \mu\text{m}$ ,  $1,4 \mu\text{m}$  sampai  $1,5 \mu\text{m}$ , sedangkan ketebalan lapisan-n dibuat tetap  $3,5 \mu\text{m}$ . Proses ini akan menghasilkan grafik karakteristik I-V dioda sel surya untuk ketebalan lapisan-p yang berbeda-beda.





Gambar 3.2 Diagram alir kegiatan simulasi

### 3.3.2 Parameter Dioda Silikon

Parameter fisis yang digunakan dalam kegiatan simulasi disesuaikan dengan bahan Silikon (Si). Parameter konstanta input kristal semikonduktor Si yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter input

Parameter	Keterangan	Nilai
q	muatan elektron	$1,602 \cdot 10^{-19}$
epsilon	permitivitas vakum	$8.854 \cdot 10^{-14}$
T	temperatur	300
k	konstanta Boltzmann	$1.38 \cdot 10^{-23}$
epsilon <sub>r</sub>	permitivitas material	11.8
x <sub>1</sub>	panjang geometri material	4.2
x <sub>0</sub>	faktor skala	$1 \cdot 10^{-3}$
Phi <sub>0</sub>	faktor skala	$k \cdot T / q$
C <sub>0</sub>	faktor skala	$\max(\text{abs}(A(0,1)), \text{abs}(A(-x_1,1)))$
D <sub>0</sub>	faktor skala	$\max(k \cdot T / q \cdot 800, k \cdot T / q \cdot 200)$
n <sub>i</sub>	konsentrasi intrinsik	$1.45e10 / C_0$
μ <sub>n</sub>	mobilitas elektron	$801 \cdot \text{Phi}_0 / D_0$
μ <sub>p</sub>	mobilitas <i>hole</i>	$331 \cdot \text{Phi}_0 / D_0$
D <sub>n</sub>	koefisien difusi elektron	$k \cdot T / q \cdot 801 / D_0$
D <sub>p</sub>	koefisien difusi <i>hole</i>	$k \cdot T / q \cdot 331 / D_0$
τ <sub>n</sub>	<i>lifetime</i> elektron	$350e-6 \cdot D_0 / x_0^2$
τ <sub>p</sub>	<i>lifetime hole</i>	$1e-6 \cdot D_0 / x_0^2$
λ <sub>2</sub>	konstanta skala semikonduktor	$\text{Phi}_0 \cdot \text{epsilon} \cdot \text{epsilon}_r / (x_0^2 \cdot q \cdot C_0)$
n <sub>s</sub>	skala kondisi batas	$(A(0, C_0)) / 2 + \sqrt{((A(0, C_0))^2 / 4 + n_i^2)}$
n <sub>s</sub>	skala kondisi batas	$(A(-x_1, C_0)) / 2 + \sqrt{((A(-x_1, C_0))^2 / 4 + n_i^2)}$
V <sub>a</sub>	tegangan keluaran	0
P	koefisien transmisi cahaya	0.023
λ	panjang gelombang	0.5
α	koefisien absorpsi	$1.1 \cdot 10^4 \cdot x_0$
C	Faktor skala	1
F	Rapat fluks foton	$C \cdot (-2.5 \cdot \lambda + 5.7) \cdot 10^{15} \cdot x_0^2 / (D_0 \cdot C_0)$

Sumber: Danielsson (2000).

Parameter input digunakan dalam bentuk tanpa satuan. Oleh karena itu, digunakan faktor skala yang menyebabkan beberapa ekspresi dari parameter tersebut menjadi setara (ekivalen). Parameter tersebut meliputi jarak ( $x$ ,  $y$ ,  $\lambda$ ), potensial listrik ( $\psi$ ,  $V_a$ ), 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

( $\rho$ ) . Tabel 3.2 menunjukkan bentuk faktor skala beserta parameter setelah penyeteraan dari keenam parameter di atas.

Tabel 3.2 Faktor skala untuk parameter input

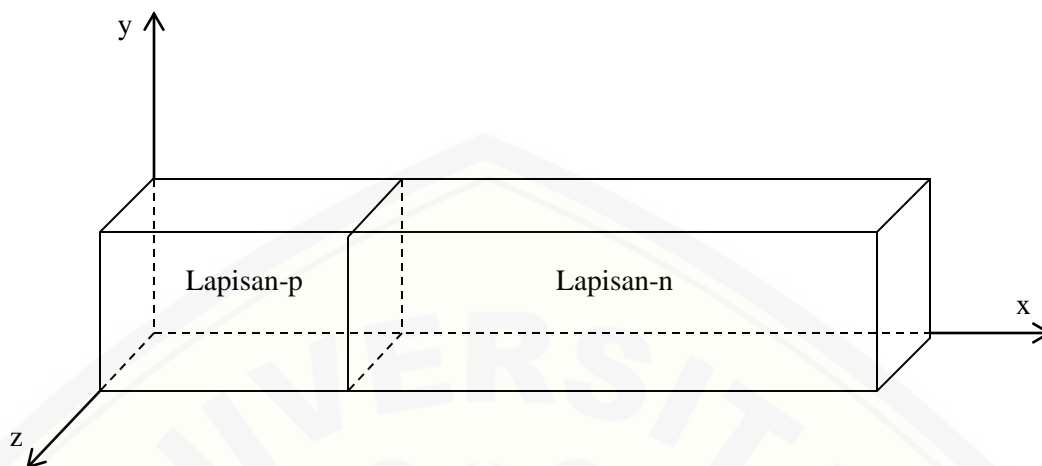
Parameter	Faktor skala	Parameter ekuivalen
Jarak ( $x, y, z$ )	$x_0 = ( x ,  y ,  z )_{max}$	$xx_0, yy_0, zz_0$
Potensial ( $\Psi$ )	$\Psi_0 = kT/q$	$\frac{\Psi}{\Psi_0}$
Konsentrasi pembawa muatan ( $n, p, N$ )	$C_0 = ( x )_{max}$ $= 1,01 \times 10^{17} cm^{-3}$	$\frac{n}{C_0}, \frac{p}{C_0}, \frac{N}{C_0}$
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 ( $\mu_n, \mu_p$ )	$\frac{D_0}{\Psi_0}$	$\frac{\mu_n \Psi_0}{D_0}, \frac{\mu_p \Psi_0}{D_0}$

Sumber: Danielsson (2000).

### 3.3.3 Geometri Dioda Sel Surya

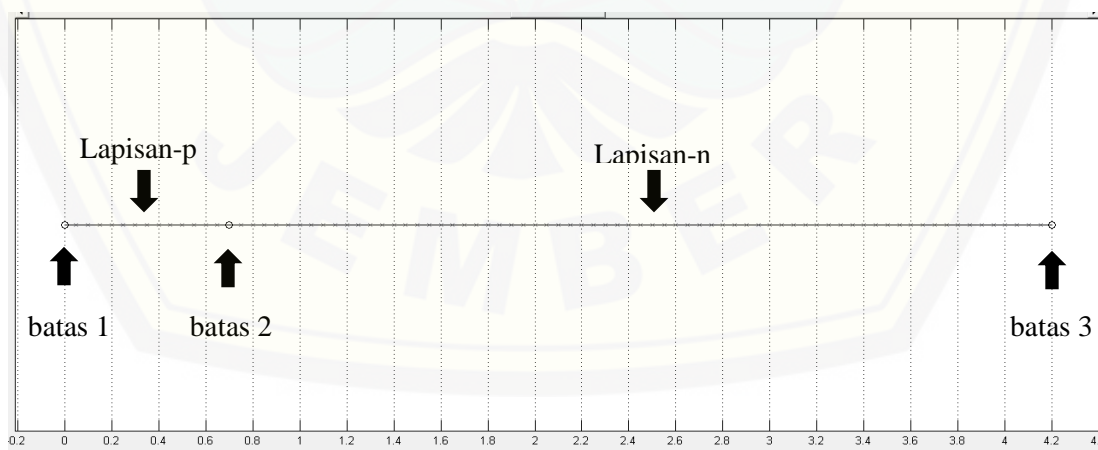
Lapisan-p pada sel surya merupakan bagian lapisan yang berfungsi sebagai sumber pembawa muatan positif (*hole*). Lapisan-p memiliki *hole* sebagai pembawa muatan mayoritas dan elektron sebagai pembawa muatan minoritas. Oleh karena itu, lapisan-p menjadi kutub positif bagi sel surya tersebut. Sifat penting yang dimiliki lapisan-p yang dapat mempengaruhi karakteristik sel surya adalah konduktivitas, ketebalan, dan celah pita optik (Usman, 2006). Simulasi pada penelitian ini dilakukan untuk mengamati pengaruh ketebalan lapisan-p terhadap karakteristik sel surya.

Ketebalan lapisan-p dan lapisan-n merujuk pada hasil penelitian Fandayani (2014). Ketebalan lapisan-p divariasikan mulai 0,7  $\mu m$  sampai 1,5  $\mu m$  dengan kelipatan 0,1  $\mu m$  sedangkan lapisan-n dibuat konstan dengan ketebalan 3,5  $\mu m$  untuk masing-masing variasi lapisan-p. Pengaplikasian ketebalan lapisan tersebut, akan disimulasikan dalam bentuk penampang 1 dimensi. Simulasi dalam bentuk 1 dimensi ini dilakukan dengan menganggap tidak ada perubahan yang terjadi pada sumbu y dan sumbu z, sedangkan perubahan karakteristik I-V hanya diaplikasikan sepanjang sumbu x seperti gambar yang ditunjukkan dibawah ini.



Gambar 3.3 Geometri dioda sel surya yang dalam bentuk 3 dimensi

Geometri dioda sel surya dibuat dalam bentuk 1 dimensi yang terdiri dari 3 batas. Batas 1 dan 3 merupakan batas kontak dioda dengan logam, sedangkan batas 2 merupakan daerah persambungan dioda sel surya antara lapisan-p dan lapisan-n. Geometri dioda sel surya kemudian dibagi-bagi menjadi daerah-daerah yang lebih kecil (*mesh*), dikarenakan metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode elemen hingga seperti yang ditunjukkan gambar dibawah ini.



Gambar 3.4 Geometri divais sel surya 1D dengan persambungan p-n ( $0,7 \mu\text{m}/3,5 \mu\text{m}$ )

### 3.3.4 Pengaturan Kondisi Batas

Pengaturan kondisi batas bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu kondisi batas Dirichlet dan kondisi batas Neumann. Kondisi batas Dirichlet merupakan kondisi batas yang digunakan untuk batas kontak dengan konduktor atau logam sedangkan kondisi batas Neumann merupakan kondisi batas yang digunakan untuk batas kontak yang tidak berhubungan dengan konduktor (batas 2). Berdasarkan gambar geometri dioda sel surya, daerah batas lapisan p dan n (batas 1 dan 3) merupakan daerah batas dioda dengan konduktor atau logam sehingga kondisi batas yang digunakan adalah kondisi batas Dirichlet. Secara matematis kondisi batas Dirichlet dapat dituliskan dalam persamaan berikut (Daniellson, 2000):

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

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

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

Sedangkan daerah persambungan p-n (batas 2) diatur sebagai kondisi batas Neumann dimana medan listrik dan rapat arus pembawa muatannya bernilai nol, dimana secara matematis dituliskan sebagai berikut (Daniellson, 2000):

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

$$\hat{n} \cdot J_n = 0 \quad (3.5)$$

$$\hat{n} \cdot J_p = 0 \quad (3.6)$$

### 3.3.5 Persamaan Poisson dan Kontinuitas

Penyelesaian persamaan differensial bahan semikonduktor dapat diselesaikan dengan persamaan Poisson dan persamaan kontinuitas. Pembawa muatan elektron dan *hole* dapat dituliskan sebagai berikut (Daniellson, 2000):

$$n = n_i e^{\psi u} \quad (3.7)$$

$$p = n_i e^{-\psi v} \quad (3.8)$$

Mengingat kembali persamaan Poisson dinyatakan sebagai berikut:

$$\Delta \Psi = \frac{q}{\varepsilon} (n - p - N_D^+ + N_A^-) \quad (3.9)$$

Persamaan (3.4) dan (3.5) disubstitusi ke dalam persamaan (3.6), sehingga persamaan Poisson di atas menjadi (Daniellson, 2000):

$$\Delta \Psi = \frac{q}{\varepsilon} (n_i (e^{\psi u} - e^{-\psi v}) - N_D^+ + N_A^-) \quad (3.10)$$

Persamaan Poisson digunakan sebagai dasar pendekatan karakteristik aliran pembawa muatan dalam dioda sel surya persambungan p-n dengan menggunakan parameter konsentrasi pembawa muatan yang dihubungkan dengan beda potensial yang terbentuk, yang mana secara matematis dituliskan seperti persamaan 3.7.

Proses generasi dan rekombinasi yang terjadi dalam divais dioda sel surya secara matematis dituliskan dalam bentuk persamaan kontinuitas. Persamaan kontinuitas untuk elektron dan persamaan kontinuitas untuk *hole* masing-masingnya ditunjukkan berdasarkan persamaan 2.21 dan persamaan 2.22. Kedua persamaan tersebut digunakan dengan mensubstitusikan terlebih dahulu persamaan 3.7 dan 3.8 kedalam persamaan tersebut, sehingga akan diperoleh persamaan kontinuitas yang termodifikasi dan siap digunakan sebagai input persamaan saat simulasi berjalan. Persamaan kontinuitas menunjukkan ketika pembawa muatan diberi foton eksternal maka arus yang dicipakan oleh pembawa muatan akan berubah. Besar arus

yangberubahini akan menghasilkan besar rapat arus yang berbeda pula. Oleh karenanya, kedua persamaan tersebut dipilih sebagai pengaplikasian dioda sel surya. Peristiwa fisis pada dioda sel surya nampak dari penjelasan persamaan Poisson dan persamaan kontinuitas, dimana kedua persamaan tersebut saling berhubungan.

### 3.3.6 Pembuatan Grafik Karakteristik I-V

Pembuatan grafik karakteristik I-V dioda Si dilakukan dengan melakukan variasi tegangan pada ketebalan lapisan-p tertentu. Pada simulasi ini tegangan yang digunakan dari 0 sampai 0,45 volt dengan kelipatan tegangan sebesar 0,025 volt. Data arus dan tegangan yang didapatkan sebanyak 19 titik pada kurva I-V. Persamaan yang akan digunakan untuk menentukan rapat arus elektron dan arus *hole* secara berurutan adalah sebagai berikut:

$$J_n = qD_n n_i e^{\psi} \nabla u \quad (3.10)$$

$$J_p = -qD_p n_i e^{-\psi} \nabla v \quad (3.11)$$

Dari persamaan di atas, rapat arus total ( $J_{T_T}$ ) pada persambungan p-n yang merupakan penjumlahan dari rapat arus elektron dan rapat arus *hole* adalah:

$$J_T = J_n + J_p \quad (3.12)$$

Grafik karakteristik I-V dioda sel surya didapatkan dengan parameter tegangan dan rapat arus total yang telah didapat untuk setiap variasi ketebalan lapisan-p.

### 3.4 Analisis Data

Analisa data dilakukan pada setiap karakteristik I-V yang dihasilkan dioda sel surya untuk variasi ketebalan lapisan-p: 0,7  $\mu\text{m}$ , 0,8  $\mu\text{m}$ , 0,9  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$ , 1,1  $\mu\text{m}$ , 1,2  $\mu\text{m}$ , 1,3  $\mu\text{m}$ , 1,4  $\mu\text{m}$ , dan 1,5  $\mu\text{m}$ . Analisa data meliputi beberapa parameter dioda sel surya yang diperoleh diantaranya; rapat arus hubung singkat, arus saturasi serta

tegangan yang dihasilkan berdasarkan kurva karakteristik I-V pada setiap variasi ketebalan lapisan-p yang diaplikasikan. Jika karakteristik I-V yang dihasilkan untuk setiap variasi ketebalan lapisan-p terdapat perbedaan, maka ketebalan lapisan-p berpengaruh pada karakteristik I-V dioda sel surya tersebut. Kriteria yang digunakan untuk menentukan pengaruh variasi ketebalan lapisan-p yang optimum pada kinerja sel surya berdasarkan karakteristik I-V yang dihasilkan dikaitkan dengan parameter kurva karakteristik I-V dioda sel surya. Salah satu parameter yang mudah diamati pada penelitian ini yaitu rapat arus hubung singkat yang dihasilkan. Rapat arus hubung singkat merupakan arus hubung singkat yang terbentuk pada dioda sel surya sepanjang penampang. Semakin besar nilai rapat arus hubung singkat ( $J_{sc}$ ) yang dihasilkan pada kurva karakteristik I-V maka kinerja sel surya tersebut semakin baik (Tool *et al*, 2001). Nilai rapat arus hubung singkat yang dihasilkan dibandingkan dengan nilai rapat arus hubung singkat yang diperoleh berdasarkan penelitian Li dan Gong pada tahun 2010. Nilai rapat arus Li dan Gong dipilih sebagai acuan, dikarenakan pada penelitiannya menggunakan material yang sama yaitu sel surya kristal Silikon dengan persambungan p-n. Selain itu untuk beberapa parameter lainnya dianalisis berdasarkan karakteristik masing-masing parameter, sesuai teori yang ada baik yang berasal dari buku, jurnal, disertasi maupun internet.



## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Hasil simulasi menunjukkan bahwa variasi ketebalan lapisan-p dari  $0,7 \mu m$  sampai  $1,5 \mu m$  dengan ketebalan lapisan-n dibuat konstan  $3,5 \mu m$  memberikan pengaruh terhadap karakteristik rapat arus-tegangan yang dihasilkan dioda sel surya. Semakin tebal lapisan-p yang diaplikasikan maka rapat arus yang dihasilkan dioda sel surya semakin menurun, sebaliknya semakin tipis lapisan-p yang diaplikasikan maka rapat arus yang bekerja pada dioda sel surya semakin meningkat.

### 5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan dari penelitian ini ialah:

1. Profil distribusi pembawa muatan masih dalam bentuk 1D sehingga dapat dikembangkan dalam bentuk 2D ataupun 3D.
2. Penggunaan parameter input dapat divariasi, sehingga dapat diperoleh nilai rapat arus hubung singkat yang tinggi.

## DAFTAR PUSTAKA

### Buku

Boylestad, R. dan Nashelsky, L. 2009. *Electronic Devices and Circuit Theory*. New Jersey : Prentice Hall.

Colinge, J.P. 2002. *Physics of Semiconductor Devices*. New York: Kluwer academic Publisher.

Danielsson, E. 2000. *FEMLAB Model Library For Semiconductor Device Model*. Stockholm: The Royal Institute Of Institute.

EPIA, 2011. Global Market Outlook for Photovoltaics until 2015. European Photovoltaic Industry Association, Brussels.

Fukuda, M. 1999. *Optical Semiconductor Devices*. Canada: John Willey & Sons, Inc.

Gareso, P.L. 2012. *Fisika Semikonduktor*. Makassar: Universitas Hasanuddin.

Griffiths, D, J. 1999. *Introduction to Electrodynamics*. Prentice Hall: Amerika Serikat.

Gray, J.L. 2003. *The Physics of the Solar Cell*. USA: Purdue University. Smallman, R. E. & Bishop, R. J. *Modern Physical Metallurgy & Materials Engineering 6<sup>th</sup> Edition*. Terjemahan oleh Sriati Djaprie. 2000. Jakarta: Erlangga.

Honsberg, C. dan Bowden, S. 1999. *Photovoltaics-Devis, Systems and Application (PVCDROM)*. Sydney: UNSW Press.

Jia-Ming Liu. 2005. *Photonic Devices*. Los Angeles: Cambridge University Press.

Kittel, C. 2005. *Introduction to Solid State Physics*. California: John Willey & Sons, Inc.

Malvino, A.P. 1979. *Electronic Principles*. New York: McGraw-Hill.

Neamen, D.A. 2003. *Semiconductor Physics and Devices*. New York: McGraw-Hill.

Polycarpou, A. C. 2006. *Introduction to the Finite Element Method in Electromagnetics*. USA: Morgan & Claypool Publishers.

Puri, R. K. dan Babbar, V.K. 2001. *Solid State Physics & Electronics*. New Delhi : S. Chand & Company LTD.

Singh, J. 2003. *Electronic and Optoelektronic Properties of Semiconductor Structures*. New York: Cambridge University Press.

Sze, S. M. dan Kwok, K. Ng. 2007. *Physics of Semiconductor Devices*. Canada: John Wiley and Sons, Inc.

### **Skripsi/Tesis/Disertasi**

Buwono, M.C. 2010. *Rancang Bangun Sistem Pengendali Pengisian Arus Sel Surya dengan Rekonfigurasi Seri-Paralel*. Depok: Universitas Indonesia.

Fandayani, D, K. 2014. *Distribusi Pembawa Muatan Dioda Sel Surya Persambungan P-N pada Variasi Ketebalan Lapisan-P*. Skripsi. Jember: Universitas Jember.

Fitriana. 2014. *Simulasi Pengaruh Panjang Gelombang Foton Datang Terhadap Karakteristik I-V Dioda Sel Surya Menggunakan Metode Elemen Hingga*. Skripsi. Jember: Universitas Jember.

Usman, I. 2006. *Penumbuhan Lapisan Tipis Silikon Amorf Terhidrogenasi dengan Teknik HWC-VHF-PECVD dan Aplikasinya Pada Sel Surya*. Disertasi. Bandung: ITB.

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

### **Jurnal**

Ashry, M., dan Fares, S. 2012. *Electrical Characteristic Measurement of the Fabricated CdSe/P-Si Heterojunctio Solar Cell Under Radiation Effect*. *American Journal of Materials Science*. Vol. **3**: 72-76.

Ballmann, T., Mertens, V., Peters, C., Koentopp, M., Cieslak, J., Schönmann, A., Klenke, C., Kauert, M, Zimmermann, G., Bordihn, S., dan Müller, J. 2014. *Wafer-thickness Dependence of Double-side Contacted Rear Junction n-type*

- Solar Cells. 4th International Conference on Silicon Photovoltaics. Vol. 55: 396 – 399.*
- Beaucarne, G. 2007. *Silicon Thin-Film Solar Cells. Solar Cells Technology Group. Vol. 75, Article ID 36970.*
- Belfar, A. 2015. *The Role of  $p^+$ -layer Dopant Concentration,  $p^+$ -layer Bandgap and  $p^+$ -layer Thickness in The Performances of a-Si:H n-i-p-p+ Solar Cells with Double Layer Window Nanocrystalline Silicon.* Algeria: Science Direct.
- Bikaneria, J., Joshi, S, P., dan Joshi, A, R. 2013. *Modeling and Simulation of PV Cell Using One-diode Model. International Journal of scientific and Research Publications. Vol. 3: 2250-3153.*
- Braescu, L., Balint, St., dan Tanasie, L. 2006. *Numerical Studies Concerning the Dependence of the Impurity Distribution on the Pulling Rate and on the Radius of the Capillary Channel in the Case of a Thin Rod Grown from the Melt by Edge-defined Film-fed Growth (EFG) Method. Vol. 291: 52-59.*
- Chapin, D, M., Fuller, C, S., dan Pearson, G, L. 1954. *J. Appl. Phys. Vol. 25: 676.*
- Curcio, S., Calabrò, V., dan Iorio, G. 2006. *A Theoretical and Experimental Analysis of a Membrane Bioreactor Performance in Recycle Configuration. Vol. 273: 129-142.*
- Guvelioglu, G.H., dan Stenger, H.G. 2005. *Computational Fluid Dynamics Modeling of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, J. Power Source. Vol. 147: 95-106.*
- Hoppmann, J., Peters, M., Schneider, M., dan Hoffman, H, V. 2013. *The Two faces of Market Support- How Deployment Policies Affect Technological Exploration and Exploitation in The Solar Photovoltaic Industry.* Switzerland: Science Direct.
- 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.*
- Jamiolahmady, M., Danesh, A., Sohrabi, M., dan Duncan, D.B. 2006. *Flow Around a Rock Perforation Surrounded by Crushed Zone: Experiments vs. Theory. J. Petroleum Sci. and Engineering. Vol. 50: 102-144.*

- Kabir, M.I., Shahahmadi, S, A., Lim, V., Zaidi, S., Sopian, K., dan Amin, N,. (2012). *Amorphous Silicon Single-Junction Thin-Film Solar Cell Exceeding 10% Efficiency by Design Optimization*. International Journal of Photoenergy: Article ID 460919,7.
- Karim, S. 2004. *Optimasi Efisiensi Sel Surya GaAs dan GaSb Persambungan p/n untuk Komponen Sel Surya Tandem GaAs/GaSb*. Bandung: UPI.
- Li, C.J dan Gong, H. 2010. *Computer Simulation Study of Materials Parameters Influence on Solar Cell Performance*. National University of Singapore.
- Liu, S, Y., Perng, Y, H., dan Ho, Y, F. 2013. *The Effect of Renewable Energy Application on Taiwan Buildings: What are The Challenges and Strategies For Solar Energy Exploitation*. National Taiwan University of Science and Technology: Scince Direct
- Lyakas, M., Zaharia, R., dan Eizenberg, M. 1995. *Analysis of Nonideal Schottky and p-n Junction Diodes-Extraction of Parameters from I-V Plots*. Dpartment of Materials Engineering and Solid State Institute, Technion-Israel Institute of Technology, Haifa 3.2000, Israel.
- Pearson, G, L. 1985. *18<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. PV Founders Award Luncheon.
- Purwandari, E, dan Winata, T. 2013. *Analisis Perhitungan Efisiensi Sel Surya Berbasis a-Si:H dalam Penentuan Temperatur Filamen Optimum Bahan*. Jurnal Ilmu Dasar. Vol. **71**: 233-241
- Pribyl, M., Snita, D., dan Kubiček, M .2006. *Adaptive Mesh Simulations of Ionic Systems in Microcapillaries Based on the Estimation of Transport Times*, Computers and Chem. Engineering. Vol. **30**: 674-685.
- Romano, V.R., Marra, F., dan Tammaro, U. 2005. *Modeling of Microwave Heating of Foodstuff: Study on the Influence of Sample Dimensions with a FEM Approach*, J. Food Engineering. Vol. **71**: 233-241.
- Roumanie, M., Meille, V., Pijolat, C., Tournier, G., de Bellefon, C., Pouteau, P., dan Delattre, C. 2005. *Design and Fabrication of a Structured Catalytic Reactor at Micrometer Scale: Example of Methylcyclohexane Dehydrogenation*. Vol. **110**: 164-170.
- Saga, T. 2010. *Advances in Crystalline Silicon Solar Cell Technology for Industrial Mass Production*. Asia Materials. Vol. **2**(3) 96-102.

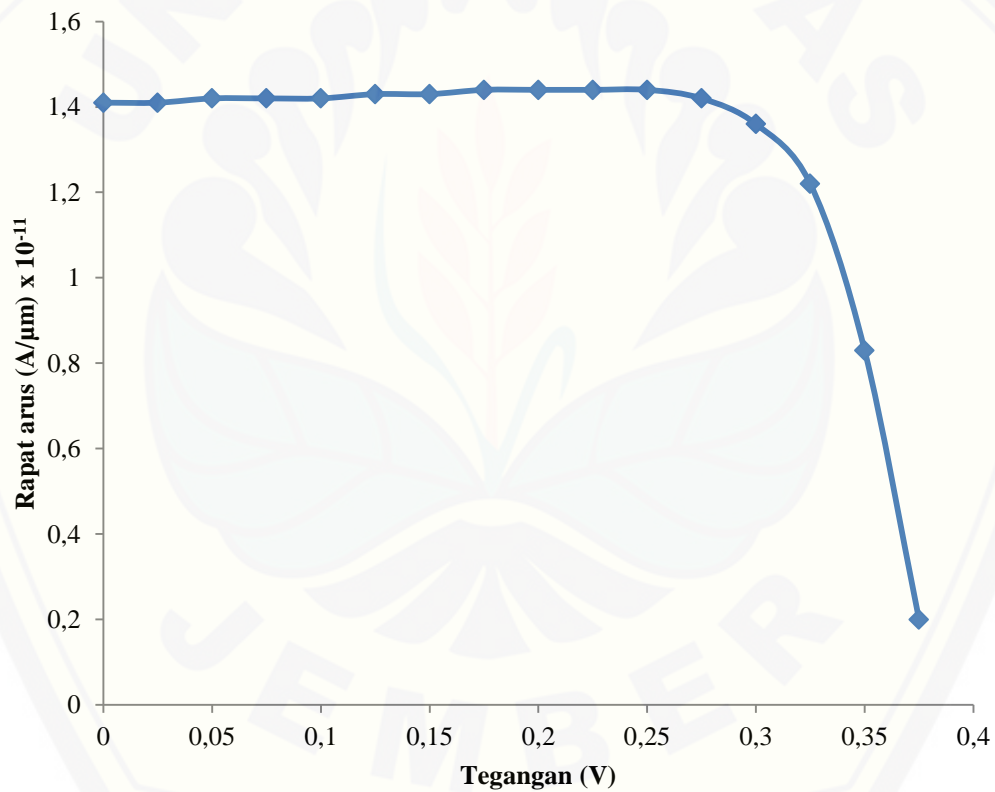
- Sconza, A., Torzo, G., dan Viola, G. 1994. *An Experiment on The Physics of The PN Junction. American Journal of Physics*. Vol. **62**. Issue 1. pp. 66-70.
- Seet, A. 1998. *Semiconductor Devices Modelling using Numerical Partial Differential Equation Solver-Simulation and Parameter Extraction of the Haynes-Shockley Experiment*. Queensland: University of Queensland.
- Spertino, F dan Akilimali, J, S. 2009. *Manufacturing I-V Mismatch and Reverse Currents Key Factors in Large Photovoltaic Arrays. IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol. **56**: 4520-4531.
- Tool, C. J. J., Burgers, A. R., Manshanden, A.M., dan Weeber. 2001. *Effect Of Wafer Thickness On The Performance Of mc-Si Solar Cells. 17<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference*.
- Tuomikoski, S., Virkkala, N., Rovio, S., Hokkanen, A., Sirén, H., dan Franssila, S. 2006. *Design and Fabrication of Integrated Solid-phase Extraction-zone Electrophoresis Microchip*. Vol. **1111**: 258-266.
- Wenham, S. R. dan Green, M. A. 1996. Silicon Solar Cells. *Progress in Photovoltaics*. Vol. **4**.pp.3-33.

### **Internet**

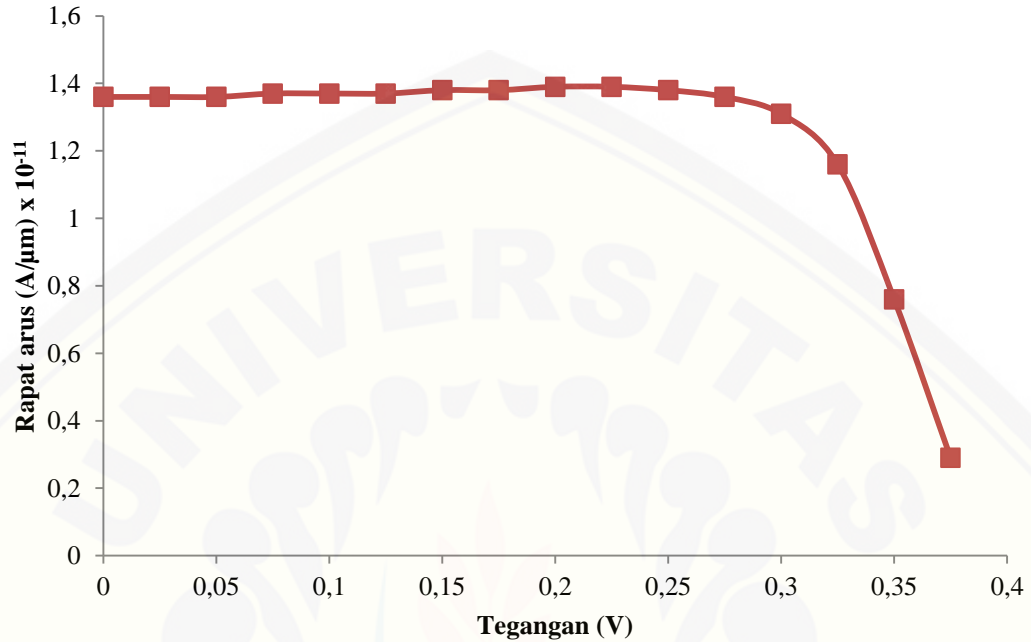
- Honsberg, C. dan Bowden, S. 2008. *Short-Circuit Current* <http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/short-circuit-current> [24 Mei 2016].
- Sproul, A. 2003. *Understanding The p-n Junction*. <http://www.bookshop.unsw.edu.au> [12 Maret 2016].

**LAMPIRAN A. KURVA KARAKTERISTIK I-V DIODA SEL SURYA Si  
PERSAMBUNGAN P-N PADA VARIASI KETEBALAN  
LAPISAN-P**

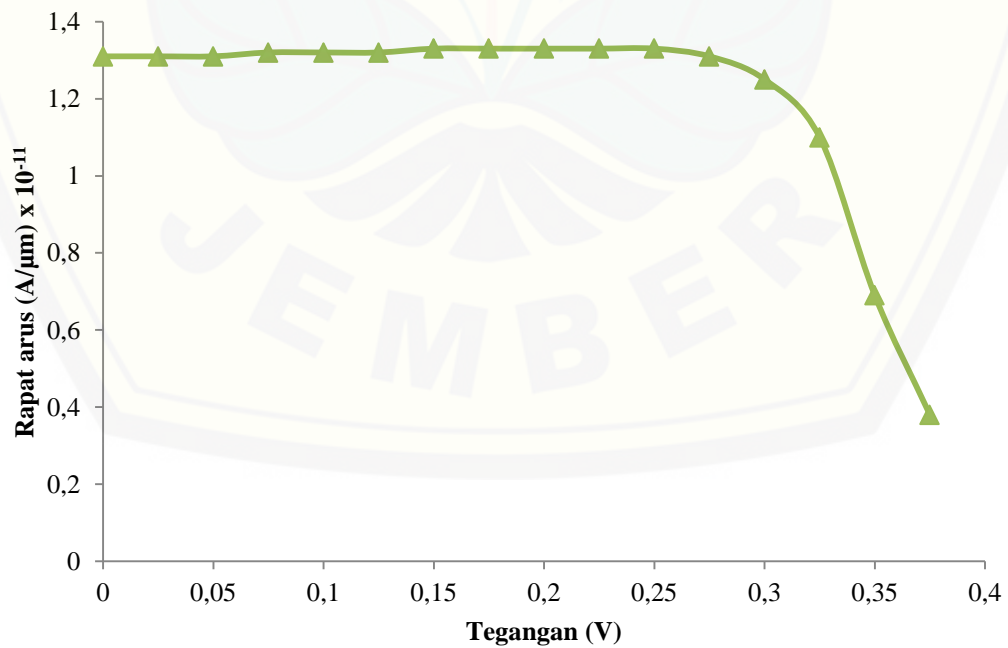
**A.1 Simulasi Kurva Karakteristik I-V Dioda Sel Surya pada Ketebalan Lapisan-p  
0,7  $\mu\text{m}$  dan Lapisan-n 3,5  $\mu\text{m}$**



A.2 Simulasi Kurva Karakteristik I-V Dioda Sel Surya pada Ketebalan Lapisan-p  $0,8 \mu\text{m}$  dan Lapisan-n  $3,5 \mu\text{m}$

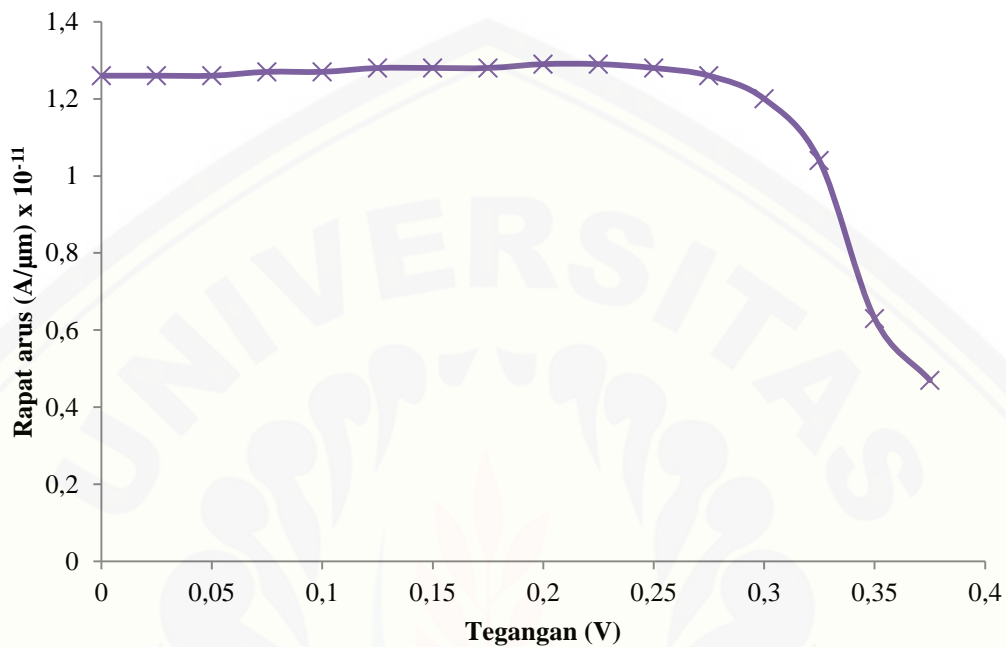


A.3 Simulasi Kurva Karakteristik I-V Dioda Sel Surya pada Ketebalan Lapisan-p  $0,9 \mu\text{m}$  dan Lapisan-n  $3,5 \mu\text{m}$

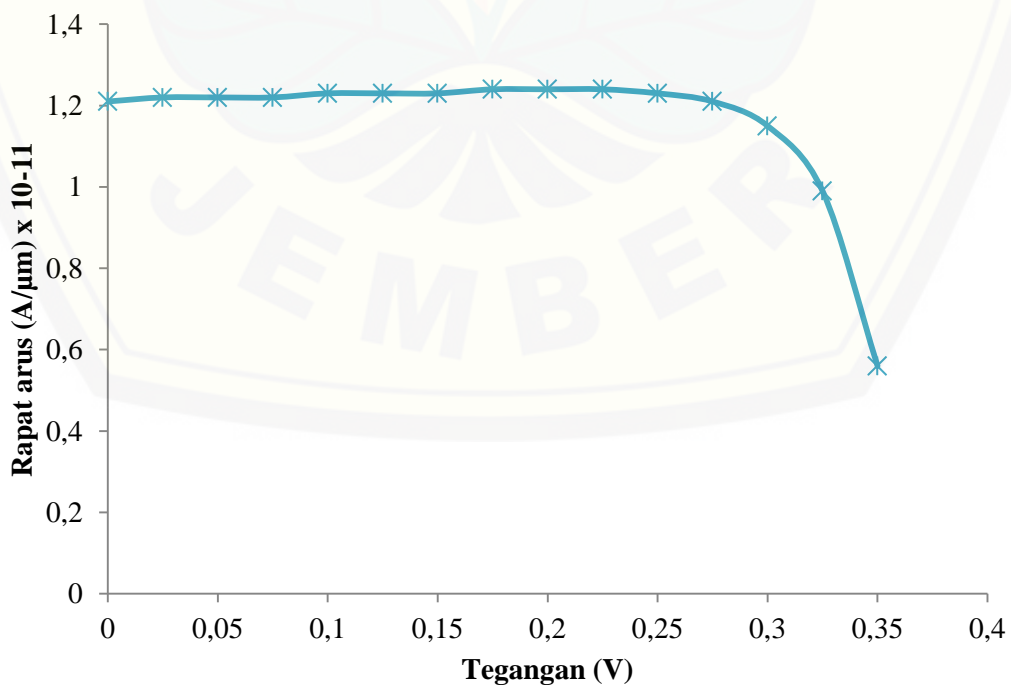




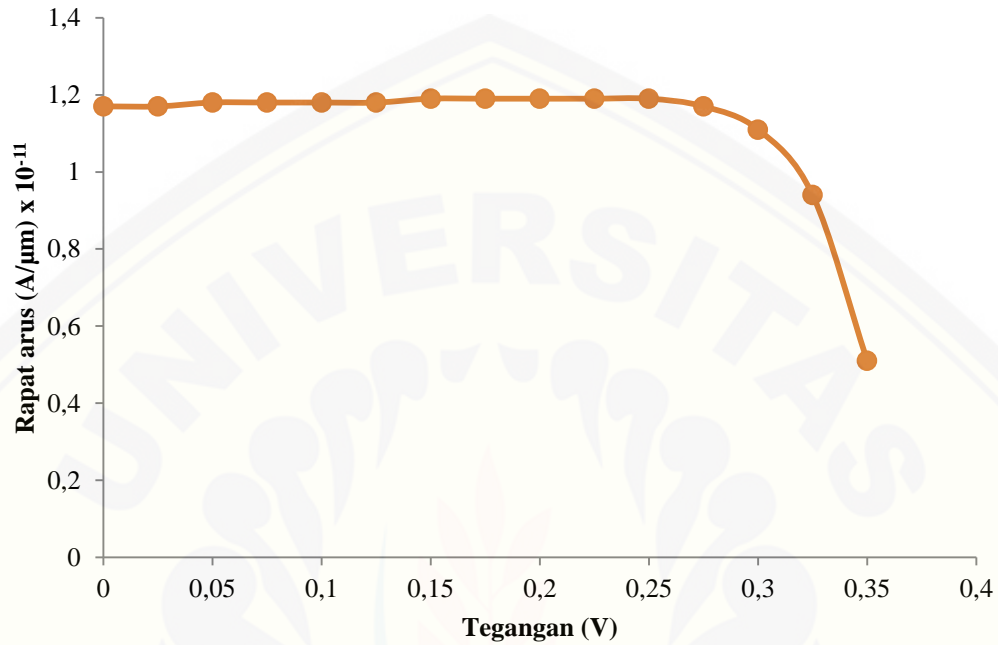
A.4 Simulasi Kurva Karakteristik I-V Dioda Sel Surya pada Ketebalan Lapisan-p  $1 \mu\text{m}$  dan Lapisan-n  $3,5 \mu\text{m}$



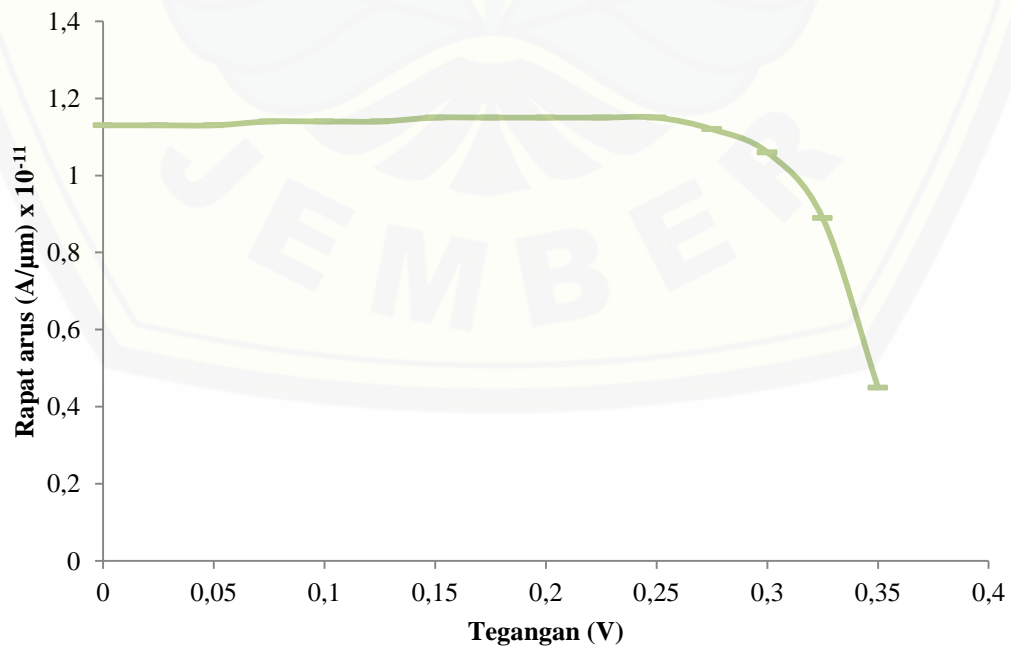
A.5 Simulasi Kurva Karakteristik I-V Dioda Sel Surya pada Ketebalan Lapisan-p  $1,1 \mu\text{m}$  dan Lapisan-n  $3,5 \mu\text{m}$



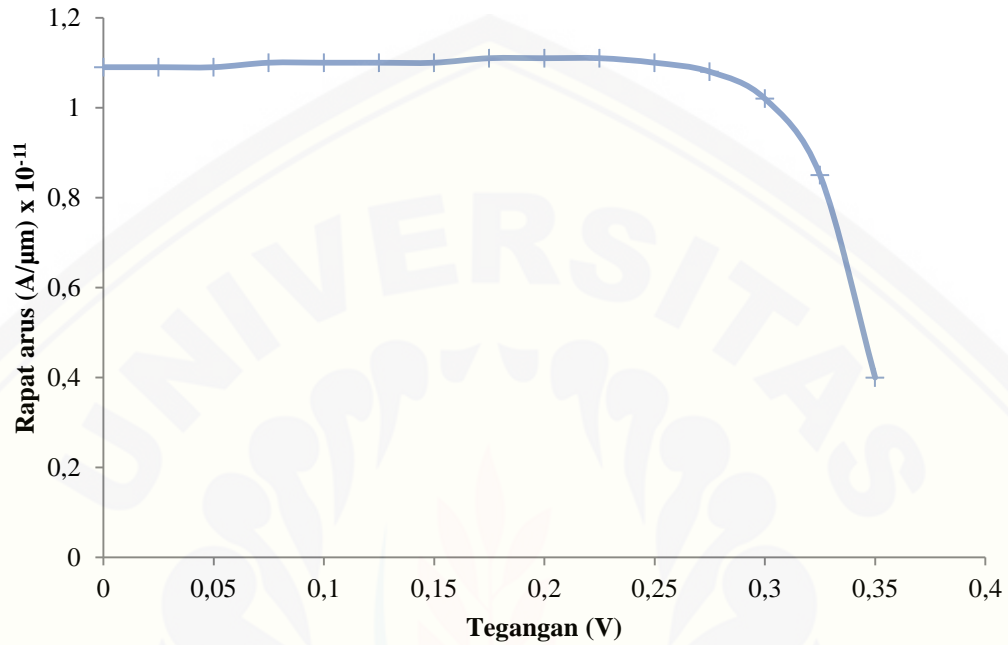
A.6 Simulasi Kurva Karakteristik I-V Dioda Sel Surya pada Ketebalan Lapisan-p  $1,2 \mu\text{m}$  dan Lapisan-n  $3,5 \mu\text{m}$



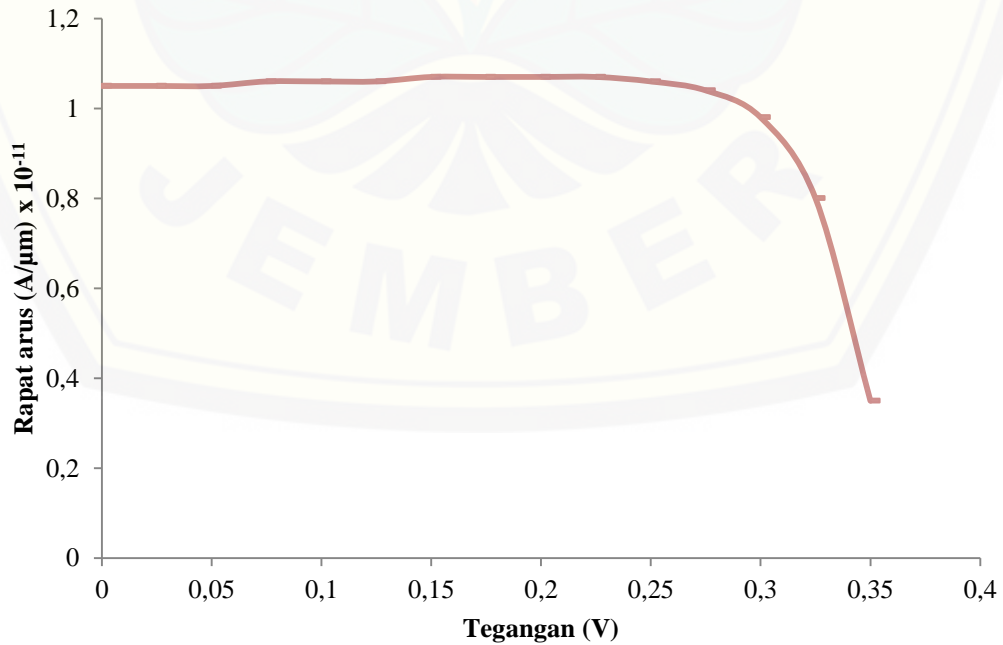
A.7 Simulasi Kurva Karakteristik I-V Dioda Sel Surya pada Ketebalan Lapisan-p  $1,3 \mu\text{m}$  dan Lapisan-n  $3,5 \mu\text{m}$



A.8 Simulasi Kurva Karakteristik I-V Dioda Sel Surya pada Ketebalan Lapisan-p  $1,4 \mu\text{m}$  dan Lapisan-n  $3,5 \mu\text{m}$



A.9 Simulasi Kurva Karakteristik I-V Dioda Sel Surya pada Ketebalan Lapisan-p  $1,5 \mu\text{m}$  dan Lapisan-n  $3,5 \mu\text{m}$



**LAMPIRAN B. KARAKTERISTIK RAPAT ARUS-TEGANGAN DIODA SEL SURYA Si PERSAMBUNGAN P-N PADA VARIASI KETEBALAN LAPISAN-P**

Tabel 1. Karakteristik rapat arus-tegangan dioda sel surya pada ketebalan lapisan-p 0,7  $\mu\text{m}$  sampai 1  $\mu\text{m}$

<b>Tegangan (V)</b>	<b>Rapat Arus (<math>\text{A}/\mu\text{m}</math>) 0,7 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Rapat Arus (<math>\text{A}/\mu\text{m}</math>) 0,8 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Rapat Arus (<math>\text{A}/\mu\text{m}</math>) 0,9 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Rapat Arus (<math>\text{A}/\mu\text{m}</math>) 1 <math>\mu\text{m}</math></b>
<b>0,000</b>	$1,41 \times 10^{-11}$	$1,36 \times 10^{-11}$	$1,31 \times 10^{-11}$	$1,26 \times 10^{-11}$
<b>0,025</b>	$1,41 \times 10^{-11}$	$1,36 \times 10^{-11}$	$1,31 \times 10^{-11}$	$1,26 \times 10^{-11}$
<b>0,050</b>	$1,42 \times 10^{-11}$	$1,36 \times 10^{-11}$	$1,31 \times 10^{-11}$	$1,26 \times 10^{-11}$
<b>0,075</b>	$1,42 \times 10^{-11}$	$1,37 \times 10^{-11}$	$1,32 \times 10^{-11}$	$1,27 \times 10^{-11}$
<b>0,100</b>	$1,42 \times 10^{-11}$	$1,37 \times 10^{-11}$	$1,32 \times 10^{-11}$	$1,27 \times 10^{-11}$
<b>0,125</b>	$1,43 \times 10^{-11}$	$1,37 \times 10^{-11}$	$1,32 \times 10^{-11}$	$1,28 \times 10^{-11}$
<b>0,150</b>	$1,43 \times 10^{-11}$	$1,38 \times 10^{-11}$	$1,33 \times 10^{-11}$	$1,28 \times 10^{-11}$
<b>0,175</b>	$1,44 \times 10^{-11}$	$1,38 \times 10^{-11}$	$1,33 \times 10^{-11}$	$1,28 \times 10^{-11}$
<b>0,200</b>	$1,44 \times 10^{-11}$	$1,39 \times 10^{-11}$	$1,33 \times 10^{-11}$	$1,29 \times 10^{-11}$
<b>0,225</b>	$1,44 \times 10^{-11}$	$1,39 \times 10^{-11}$	$1,33 \times 10^{-11}$	$1,29 \times 10^{-11}$
<b>0,250</b>	$1,44 \times 10^{-11}$	$1,38 \times 10^{-11}$	$1,33 \times 10^{-11}$	$1,28 \times 10^{-11}$
<b>0,275</b>	$1,42 \times 10^{-11}$	$1,36 \times 10^{-11}$	$1,31 \times 10^{-11}$	$1,26 \times 10^{-11}$
<b>0,300</b>	$1,36 \times 10^{-11}$	$1,31 \times 10^{-11}$	$1,25 \times 10^{-11}$	$1,20 \times 10^{-11}$
<b>0,325</b>	$1,22 \times 10^{-11}$	$1,16 \times 10^{-11}$	$1,10 \times 10^{-11}$	$1,04 \times 10^{-11}$
<b>0,350</b>	$8,30 \times 10^{-12}$	$7,60 \times 10^{-12}$	$6,90 \times 10^{-12}$	$6,30 \times 10^{-12}$
<b>0,375</b>	$2,00 \times 10^{-12}$	$2,90 \times 10^{-12}$	$3,80 \times 10^{-12}$	$4,70 \times 10^{-12}$

Tabel 2. Karakteristik rapat arus-tegangan dioda sel surya pada ketebalan lapisan-p 1,1  $\mu\text{m}$  sampai 1,5  $\mu\text{m}$ .

<b>Tegangan (V)</b>	<b>Rapat Arus (A/<math>\mu\text{m}</math>) 1,1 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Rapat Arus (A/<math>\mu\text{m}</math>) 1,2 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Rapat Arus (A/<math>\mu\text{m}</math>) 1,3 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Rapat Arus (A/<math>\mu\text{m}</math>) 1,4 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Rapat Arus (A/<math>\mu\text{m}</math>) 1,5 <math>\mu\text{m}</math></b>
<b>0,000</b>	1,21 x 10 <sup>-11</sup>	1,17 x 10 <sup>-11</sup>	1,13 x 10 <sup>-11</sup>	1,09 x 10 <sup>-11</sup>	1,05 x 10 <sup>-11</sup>
<b>0,025</b>	1,22 x 10 <sup>-11</sup>	1,17 x 10 <sup>-11</sup>	1,13 x 10 <sup>-11</sup>	1,09 x 10 <sup>-11</sup>	1,05 x 10 <sup>-11</sup>
<b>0,050</b>	1,22 x 10 <sup>-11</sup>	1,18 x 10 <sup>-11</sup>	1,13 x 10 <sup>-11</sup>	1,09 x 10 <sup>-11</sup>	1,05 x 10 <sup>-11</sup>
<b>0,075</b>	1,22 x 10 <sup>-11</sup>	1,18 x 10 <sup>-11</sup>	1,14 x 10 <sup>-11</sup>	1,10 x 10 <sup>-11</sup>	1,06 x 10 <sup>-11</sup>
<b>0,100</b>	1,23 x 10 <sup>-11</sup>	1,18 x 10 <sup>-11</sup>	1,14 x 10 <sup>-11</sup>	1,10 x 10 <sup>-11</sup>	1,06 x 10 <sup>-11</sup>
<b>0,125</b>	1,23 x 10 <sup>-11</sup>	1,18 x 10 <sup>-11</sup>	1,14 x 10 <sup>-11</sup>	1,10 x 10 <sup>-11</sup>	1,06 x 10 <sup>-11</sup>
<b>0,150</b>	1,23 x 10 <sup>-11</sup>	1,19 x 10 <sup>-11</sup>	1,15 x 10 <sup>-11</sup>	1,10 x 10 <sup>-11</sup>	1,07 x 10 <sup>-11</sup>
<b>0,175</b>	1,24 x 10 <sup>-11</sup>	1,19 x 10 <sup>-11</sup>	1,15 x 10 <sup>-11</sup>	1,11 x 10 <sup>-11</sup>	1,07 x 10 <sup>-11</sup>
<b>0,200</b>	1,24 x 10 <sup>-11</sup>	1,19 x 10 <sup>-11</sup>	1,15 x 10 <sup>-11</sup>	1,11 x 10 <sup>-11</sup>	1,07 x 10 <sup>-11</sup>
<b>0,225</b>	1,24 x 10 <sup>-11</sup>	1,19 x 10 <sup>-11</sup>	1,15 x 10 <sup>-11</sup>	1,11 x 10 <sup>-11</sup>	1,07 x 10 <sup>-11</sup>
<b>0,250</b>	1,23 x 10 <sup>-11</sup>	1,19 x 10 <sup>-11</sup>	1,15 x 10 <sup>-11</sup>	1,10 x 10 <sup>-11</sup>	1,06 x 10 <sup>-11</sup>
<b>0,275</b>	1,21 x 10 <sup>-11</sup>	1,17 x 10 <sup>-11</sup>	1,12 x 10 <sup>-11</sup>	1,08 x 10 <sup>-11</sup>	1,04 x 10 <sup>-11</sup>
<b>0,300</b>	1,15 x 10 <sup>-11</sup>	1,11 x 10 <sup>-11</sup>	1,06 x 10 <sup>-11</sup>	1,02 x 10 <sup>-11</sup>	9,80 x 10 <sup>-12</sup>
<b>0,325</b>	9,90 x 10 <sup>-12</sup>	9,40 x 10 <sup>-12</sup>	8,90 x 10 <sup>-12</sup>	8,50 x 10 <sup>-12</sup>	8,00 x 10 <sup>-12</sup>
<b>0,350</b>	5,60 x 10 <sup>-12</sup>	5,10 x 10 <sup>-12</sup>	4,50 x 10 <sup>-12</sup>	4,00 x 10 <sup>-12</sup>	3,50 x 10 <sup>-12</sup>