



**SIMULASI 2D PERHITUNGAN EFISIENSI SEL SURYA BERBASIS
SILIKON KRISTAL PADA VARIASI KETEBALAN LAPISAN-P**

SKRIPSI

Oleh

**Gutaminingsih
NIM 131810201002**

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS JEMBER

2018



**SIMULASI 2D PERHITUNGAN EFISIENSI SEL SURYA BERBASIS
SILIKON KRISTAL PADA VARIASI KETEBALAN LAPISAN-P**

SKRIPSI

Diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan studi di Program Studi Ilmu Fisika (S-I) dan mencapai gelar Sarjana Sains

Oleh
Gutaminingsih
NIM 131810201002

JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER
2018

PERSEMBAHAN

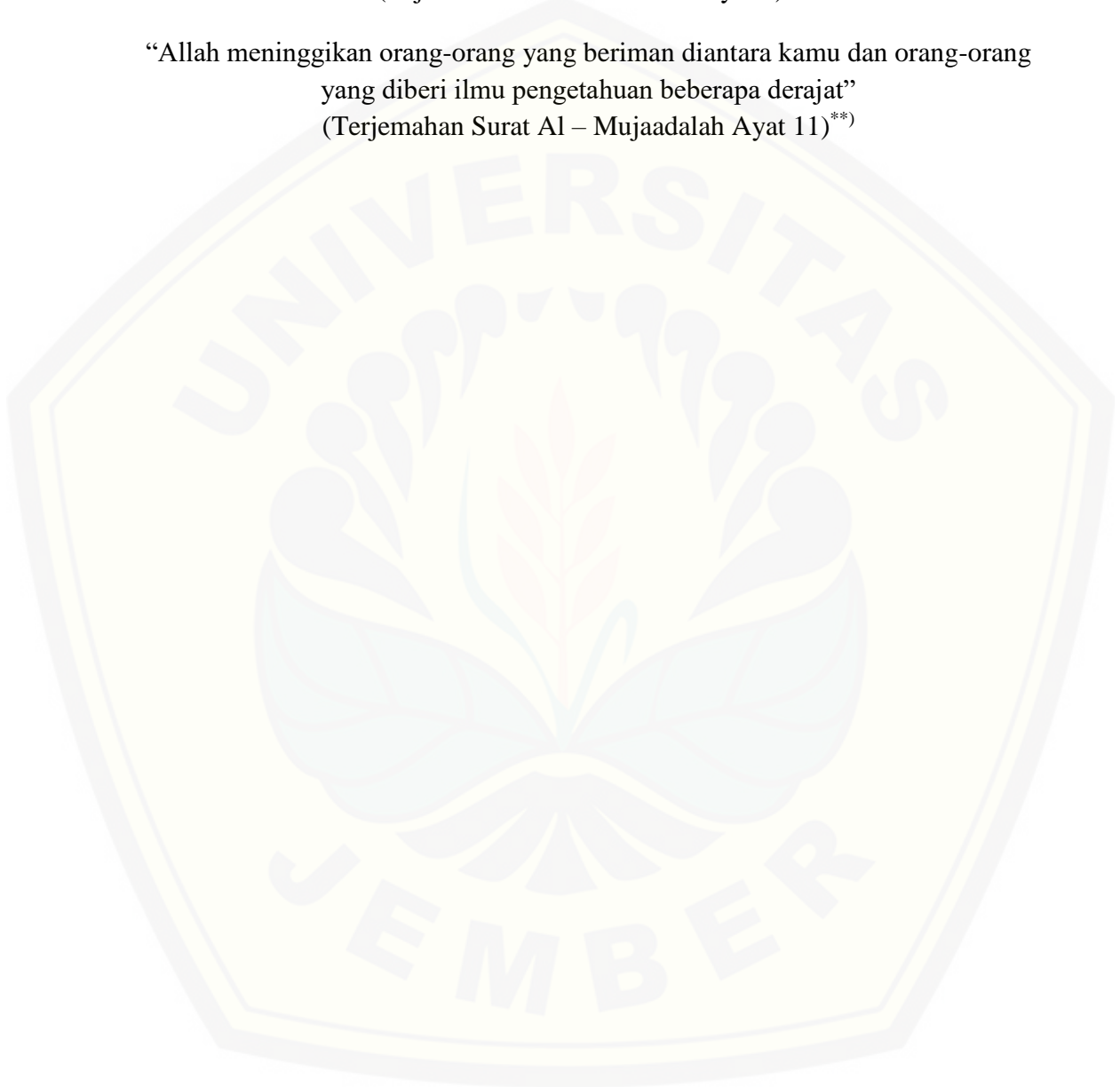
Dengan memanjatkan puji syukur terhadap kehadiran Allah SWT, skripsi ini penulis persembahkan untuk:

1. Ibunda Katemi dan Ayahanda Kastin tercinta, yang telah memberi segala kasih sayang , pengorbanan , dan doa yang selalu dipanjatkan, serta dukungan motivasi yang mengiringiku setiap saat;
2. Eyang Uti Hj. Karti dan Akong H. Tarmuji terimakasih atas segala kasih sayang dan pengorbanan serta kesabaran telah mendidik dan membesarkan Ananda selama ini;
3. Adik tersayang Ahmat S Widodo yang telah memberikan semangat dan keceriaan;
4. Para pahlawan tanpa tanda jasa yang sejak taman kanak- kanak hingga perguruan tinggi yang telah mendidiku dengan penuh kesabaran dan perhatian;
5. Almamater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

MOTTO

“ Dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pemurah lagi Maha Penyayang”
(terjemahan Surat Al Fatihah ayat 1)^{*)}

“Allah meninggikan orang-orang yang beriman diantara kamu dan orang-orang
yang diberi ilmu pengetahuan beberapa derajat”
(Terjemahan Surat Al – Mujaadalah Ayat 11)^{**)}



^{*)**)}Departemen Agama Republik Indonesia. 2015. Al – Qur’an dan Terjemahan.
Bandung: CV Penerbit Diponegoro.

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Gutaminingsih

NIM : 131810201002

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Simulasi 2D perhitungan efisiensi sel surya berbasis silikon Kristal pada variasi ketebalan lapisan-p” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi manapun serta 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 dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 24 Januari 2018

Yang menyatakan,

Gutaminingsih

NIM 131810201002

SKRIPSI

**SIMULASI 2D PERHITUNGAN EFISIENSI SEL SURYA BERBASIS
SILIKON KRISTAL PADA VARIASI KETEBALAN LAPISAN-P**

Oleh

Gutaminingsih

NIM 131810201002

Pembimbing:

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

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

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Simulasi 2D perhitungan efisiensi sel surya berbasis silikon Kristal pada variasi ketebalan lapisan-p” karya Gutamingisih telah diuji dan disahkan secara akademis pada:

hari :

tanggal :

tempat : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember

Tim Penguji

Ketua,

Anggota I,

Endhah Purwandari, S.Si., M.Si.

Ir. Misto, M.Si.

NIP 198111112005012001

NIP 19591121991031002

Anggota II,

Anggota III,

Bowo Eko Cahyono, S.Si., M.Si., Ph.D.

Agung T. Nugroho, S.Si., M.Phil., Ph.D.

NIP 197202101998021001

NIP 196812191994021001

Mengesahkan

Dekan,

Drs. Sujito, Ph.D.

NIP 196102041987111001

RINGKASAN

Simulasi 2D perhitungan efisiensi sel surya berbasis silikon Kristal pada variasi ketebalan lapisan-p, Gutaminingsih, 131810201002: 2018: 50 halaman; Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Univeristas Jember.

Energi matahari sebagai energi alternatif yang melimpah di Indonesia hingga saat ini. Pemanfaatan energi matahari merupakan satu diantara sumber energi yang dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan energi sebagai pembangkit listrik tenaga surya. Pembangkit listrik tenaga surya merupakan energi alternatif yang aman, bersih dan sangat mudah untuk digunakan. Sel surya adalah salah satu sumber energi terbarukan yang mengkonversi langsung energi matahari menjadi energi listrik. Proses konversi cahaya matahari menjadi energi listrik disebut dengan fotovoltaiik. Sel surya pertama kali dikembangkan dengan menggunakan bahan Silikon kristal. Keuntungan dari Silikon kristal adalah memiliki efisiensi yang cukup baik. Kinerja dari sel surya dapat dilihat berdasarkan kurva karakteristik rapat arus-tegangan $J-V$ beserta efisiensi yang dihasilkan.

Simulasi terkait bahan Silikon kristal ini telah dilakukan untuk mengetahui sifat karakteristik kelistrikan dari sebuah bahan. Berdasarkan penelitian yang sudah ada, maka penelitian ini dilakukan bertujuan untuk mendapatkan nilai efisiensi dalam rangka peningkatan kinerja sel surya, dengan mempertimbangkan beberapa parameter penting salah satunya ketebalan lapisan. Ketebalan lapisan dapat mempengaruhi proses konversi fotovoltaiik di dalam sel surya. Apabila ketebalan lapisan-p tebal maka akan mengurangi energi foton yang di butuhkan oleh lapisan-n untuk proses generasi, namun demikian, apabila lapisan-p teralalu tipis potensial difusi tidak dapat terbentuk, sehingga mengurangi rapat arus listrik yang dihasilkan. Rapat arus hubung singkat (J_{sc}) yang dihasilkan pada simulasi sel surya berbasis Silikon kristal ini, dapat diketahui pada perubahan kurva karakteristik rapat arus – tegangan $J-V$. Berdasarkan kurva karakteristik rapat arus – tegangan $J-V$ yang telah peroleh. Selanjutnya, dilakukan untuk menghitung efisiensi sel surya berbasis Silikon kristal.

Di dalam penelitian ini, dilakukan simulasi 2D perhitungan efisiensi sel surya berbasis Silikon kristal pada variasi ketebalan lapisan-p. Kegiatan penelitian ini diawali dengan membuat geometri dalam bentuk struktur 2D dari divais sel surya. Tahap berikutnya adalah menyelesaikan persamaan Poisson dan Kontinuitas untuk bahan Silikon kristal yang diaplikasikan pada geometri yang telah dibuat, untuk memperoleh kurva karakteristik rapat arus – tegangan $J-V$. Selanjutnya, akan didapatkan efisiensi sel surya berbasis Silikon kristal dengan menghitung rapat arus hubung singkat (J_{sc}), tegangan hubung terbuka (V_{oc}) dan *fill factor*.

Hasil simulasi memberikan informasi berkaitan dengan variasi ketebalan lapisan-p yang diaplikasikan pada sel surya berbasis Silikon kristal, yakni pada ketebalan $0.7 \mu m$, $0.8 \mu m$, $0.9 \mu m$, $1 \mu m$, $1.2 \mu m$, $1.3 \mu m$, $1.4 \mu m$ dan $1.5 \mu m$. Semakin tebal lapisan-p yang diaplikasikan, semakin kecil rapat arus hubung

singkat (J_{sc}) yang diperoleh. Rapat arus hubung singkat tertinggi didapatkan pada ketebalan lapisan-p sebesar $0.7 \mu m$ yaitu sebesar $26,941 \times 10^{-7} A/\mu m$, dengan tegangan hubung singkat (V_{oc}) sebesar $0,450 volt$ dan nilai efisiensi sel surya yang diperoleh sebesar $7,76\%$.



PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Simulasi 2D perhitungan efisiensi sel surya berbasis silikon kristal pada variasi ketebalan lapisan-p”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S-1) pada Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, pengarahan dan bimbingan berbagai pihak. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Endhah Purwandari, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama dan Ir. Misto M.Si., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam membimbing penulis;
2. Bowo Eko Cahyono, S.Si., M.Si., Ph.D., selaku Dosen Penguji I dan Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M.Phil., Ph.D., selaku Dosen Penguji II yang telah meluangkan waktu untuk menguji dan memberikan masukan demi kesempurnaan skripsi ini;
3. Moh Eko Ardiasyah, S.Si., yang telah sabar memberikan semangat motivasi;
4. Tim Komputasi Material: Imroatus, Dwi, Siti, Lailatul, Fitri dan Afrizal, telah banyak meluangkan waktu untuk saling berdiskusi serta teman seperjuanganku seluruh angkatan 2013 yang telah memberikan semangat;
5. Keluarga Besar UKMS TITIK, yang telah banyak memberikan pengalaman berharga kepada penulis;

Dengan segala kerendahan hati penulis menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca serta perkembangan dalam bidang Fisika.

Jember, Januari 2018

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN PEMBIMBING	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
RINGKASAN/SUMMARY	vii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	3
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Sel Surya	4
2.2 Bahan Semikonduktor	4
2.3 Semikonduktor Intrinsik dan Ekstrinsik	6
2.3.1 Semikonduktor Intrinsik.....	6
2.3.2 Semikonduktor Ektrinsik.....	7
2.4 Persambungan Sel Surya p-n	9
2.5 Pengaruh Ketebalan Lapisan-p pada Sel Surya	11
2.6 Parsamaan Dasar Semikonduktor	14
2.6.1 Persamaan Poisson	14

2.6.2 Persamaan Kontinuitas	15
2.7 Karakteristik Sel Surya	16
3.7.1 Rapat Arus Hubung Singkat (<i>Jsc</i>)	17
3.7.2 Tegangan Hubung Terbuka (<i>Voc</i>)	17
3.7.3 Daya Maksimum dan <i>Fill Factor</i>	17
2.8 Analisis Numerik Berbasis Metode Elemen Hingga	19
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	21
3.1 Rancangan Kegiatan Penelitian.....	21
3.2 Jenis dan Sumber Data	22
3.2.1 Jenis Penelitian	22
3.2.2 Sumber Data Penelitian	22
3.3 Variabel Penelitian dan Skala Pengukuran.....	23
3.3.1 Variabel Penelitian	23
3.3.1 Skala Perhitungan.....	23
3.4 Kerangka Pemecahan Masalah.....	23
3.4.1 Kajian Pustaka.....	24
3.4.2 Mekanisme Simulasi.....	25
3.5 Metode Analisis Data.....	31
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	32
4.1 Kurva Karakteristik Rapat Arus – Tegangan (<i>J-V</i>) Sel Surya	32
4.2 Efisiensi Sel Surya Berbasis Siikon Kristal	34
BAB 5. PENUTUP.....	38
5.1 Kesimpulan.....	38
5.2 Saran	38
DAFTAR PUSTAKA	39
LAMPIRAN.....	43

DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Bahan Semikonduktor dan Celah Energi	5
3.1 Parameter Input Simulasi	27
3.2 Faktor Skala Parameter Input.....	28
3.2 Data Perhitungan Efisiensi Sel Surya Berbasis Silikon Kristal Dengan Berbagai Variasi Ketebalan Lapisan-p	34

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Struktur Pita energi	6
2.2 Struktur Silikon kristal berikatan kovalen.....	7
2.3 (a) Struktur Silikon kristal dengan atom pengotor valensi tiga, (b) pita energi semikonduktor tipe-p	8
2.4 (a) Struktur Silikon Kristal dengan atom pengotor valensi lima, (b) pita energi semikonduktor tipe-n	9
2.5 Aliran difusi dan aliran <i>drift</i> elektron dan <i>hole</i>	11
2.6 Hasil Simulasi 1D karakteristik <i>J-V</i> sel surya pada persambungan p-n Silikon kristal ketebalan lapisan-p	13
2.7 Hasil simulasi 2D karakteristik <i>J-V</i> sel surya pada persambungan p-i-n berbasis a-Si:H	13
2.8 Karakteristik <i>J-V</i> sel surya	17
3.1 Diagram alir kegiatan penelitian	22
3.2 Diagram alir kegiatan simulasi.....	25
3.3 Geometri divais sel surya bahan Silikon kristal dengan struktur 2D	26
3.5 Pembagian geometri sel surya bahan Silikon kristal menjadi elemen- elemen kecil (<i>mesh</i>) dengan struktur 2D.....	27
4.6 Grafik simulasi karakteristik (<i>J-V</i>) sel surya berbasis Silikon Kristal dalam setruktur 2D.....	33
4.7 Grafik karakteristik J_{sc} , V_{oc} dan FF hasil perhitungan efisiensi sel surya berbasis Silikon Kristal dalam struktur 2D.	36

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
4.1 Tabel Data Karakteristik (<i>J-V</i>) Berbasis Silikon Kristal Pada Variasi Ketebalan Lapisan-p.....	43
4.2 Formula Efisiensi Pada Penelitian Ini.....	45
4.2 Data Perhitungan Penentuan Titik Daya Maksimum (Luas = $V_{mp} \times J_{mp}$).....	48

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi matahari sebagai energi alternatif yang melimpah di Indonesia hingga saat ini. Pemanfaatan energi matahari merupakan satu diantara sumber energi yang dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan energi sebagai pembangkit listrik tenaga surya. Pembangkit listrik tenaga surya merupakan energi alternatif yang aman, bersih dan sangat mudah untuk digunakan. Jumlah energi matahari yang banyak dan cenderung melimpah di Indonesia, yaitu sekitar 4,8 kWh/m²/hari, sehingga menyebabkan sel surya berpotensi untuk memenuhi kebutuhan energi di Indonesia (Sindo, 2014).

Sel surya adalah salah satu sumber energi terbarukan yang mengkonversi langsung energi matahari menjadi energi listrik. Proses konversi cahaya matahari menjadi energi listrik disebut dengan fotovoltaik. Sel surya pertama kali dikembangkan menggunakan bahan Silikon kristal dengan tipe persambungan p-n. Berdasarkan hasil eksperimen Sze (2007), konversi energi sel surya dengan bahan Silikon kristal memiliki efisiensi sebesar 22%. Sel surya dengan bahan Silikon kristal mampu menghasilkan konduktivitas yang cukup besar saat proses konversi fotovoltaik, karena memiliki keteraturan susunan atom dan sifat listrik yang cukup baik. Silikon kristal bahan yang sering digunakan karena merupakan unsur yang banyak di dapat di alam. Keuntungan dari Silikon kristal adalah memiliki efisiensi yang cukup baik sebesar (24.7%) untuk luas sel 4,00 cm² dan dalam bentuk modul mencapai (22.7%) dengan luas sel 278 cm² (Jasruddin dan Momang, 2009).

Kinerja dari sel surya dapat dilihat berdasarkan kurva karakteristik rapat arus-tegangan yang dihasilkan. Berdasarkan kurva karakteristik tersebut, semakin kecil rapat arus yang dihasilkan semakin baik kinerja dari sel surya (Li dan Gong, 2010). 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. Penelitian tentang simulasi sel surya telah dilakukan oleh Li dan Gong (2010) tentang pengaruh peran ketebalan lapisan-p

terhadap karakteristik rapat arus-tegangan pada sel surya berbasis material Silikon kristal. Pada lapisan-p yang lebih tipis, efisiensi sel surya menunjukkan nilai yang lebih baik. Penelitian tersebut menggunakan persambungan p-n dengan software AMPS (*Analysis of Microelectronic and Photonic Structure*). Simulasi pengaruh ketebalan lapisan-p pada karakteristik arus-tegangan sel surya persambungan p-n menggunakan metode elemen hingga telah dilakukan oleh Fatma (2016). Simulasi tersebut menggunakan pemodelan 1D dengan bahan Silikon kristal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi ketebalan lapisan-p memberikan pengaruh terhadap karakteristik rapat arus-tegangan yang dihasilkan sel surya. Semakin tebal lapisan-p yang diaplikasikan maka rapat arus yang dihasilkan sel surya semakin menurun, sebaliknya semakin tipis lapisan-p yang diaplikasikan maka rapat arus yang diberikan pada sel surya semakin meningkat. Namun dalam penelitian tersebut belum dihasilkan nilai efisiensi untuk menjadi acuan besarnya kinerja dari divais sel surya.

Berdasarkan penelitian yang telah ada, pada penelitian ini dilakukan simulasi 2D perhitungan efisiensi sel surya berbasis Silikon Kristal pada variasi ketebalan lapisan-p. Variasi ketebalan lapisan-p mulai dari $0,7 \mu\text{m}$ sampai $1,5 \mu\text{m}$ dilakukan dengan tujuan mengetahui perubahan karakteristik rapat arus- tegangan setiap variasi ketebalan yang lakukan serta menghitung efisiensi untuk mengetahui seberapa besar kemampuan lapisan-p di dalam meningkatkan kinerja sel surya. Pada penelitian ini, simulasi dilakukan dengan menggunakan pemodelan sel surya yang digambarkan dalam struktur 2D. Adapun pemodelan numerik yang digunakan adalah metode elemen hingga (MEH), yang mampu memodelkan bahan 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 kurva karakteristik rapat arus-tegangan $J-V$ serta nilai efisiensi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang rumusan masalah yang dibahas dalam penelitian ini adalah

1. Bagaimana pengaruh perubahan karakteristik rapat arus-tegangan $J-V$ dari sel surya berbasis silikon kristal, yang disimulasikan dalam struktur 2D, pada berbagai variasi ketebalan lapisan-p?
2. Bagaimana pengaruh perubahan variasi ketebalan lapisan-p terhadap efisiensi kinerja sel surya berbasis Silikon kristal?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Temperatur operasional bahan dianalisis hanya pada temperatur ruang (300K).
2. Metode yang digunakan adalah metode elemen hingga, karena metode ini 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.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh perubahan karakteristik rapat arus-tegangan $J-V$ dari sel surya berbasis Silikon kristal, yang disimulasikan dalam struktur 2D, pada berbagai variasi ketebalan lapisan p.
2. Mengetahui pengaruh perubahan variasi ketebalan lapisan-p terhadap efisiensi kinerja sel surya berbasis Silikon kristal.

1.5 Manfaat Penelitian

Beberapa manfaat yang diharapkan pada penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh perubahan karakteristik rapat arus-tegangan $J-V$ dari ketebalan lapisan-p terhadap kinerja sel surya berbasis Silikon kristal.
3. Memberikan informasi tentang perubahan variasi ketebalan lapisan-p terhadap efisiensi kinerja sel surya berbasis Silikon kristal.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sel Surya

Menurut Kwok (1995) sel surya merupakan salah satu sumber energi alternatif dan dapat mengkonversi secara langsung energi matahari menjadi energi listrik. Proses konversi cahaya matahari menjadi energi listrik disebut dengan fotovoltaiik. Energi matahari dapat dimanfaatkan dengan berbagai cara, salah satunya untuk kebutuhan energi sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Surya. Pembangkit listrik tenaga surya merupakan energi alternatif yang aman, bersih dan sangat mudah untuk digunakan. Cahaya dari matahari terdiri atas foton atau partikel, foton-foton inilah yang dikonversi menjadi energi listrik. Foton-foton tersebut mengandung energi yang bervariasi menurut panjang gelombangnya. Energi foton tersebut diserap oleh suatu divais untuk dikonversikan menjadi energi listrik. Divais tersebut merupakan sebuah sel fotovoltaiik yang dinamakan sel surya (*Solar Cell*). Penyerapan energi foton oleh sel surya diserahkan sebagian atau seluruhnya kepada elektron di dalamnya. Dengan adanya energi baru ini, maka elektron-elektron di dalam atom tereksitasi. Hasilnya terdapat fotogenerasi dari pembawa muatan yang berada di dalamnya sehingga menjadi arus dalam suatu sirkuit listrik (Santhiarsa dan Kusuma, 2005).

2.2 Bahan Semikonduktor

Bahan semikonduktor memiliki sifat kelistrikan dari suatu material dapat dikelompokkan menjadi beberapa bagian (Goetzberger *et al.*,1998):

1. Bahan konduktor yang memiliki harga konduktivitas listrik lebih besar dari $10^4 \Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$
2. Bahan semikonduktor yang memiliki harga konduktivitas listrik $(10^4 - 10^{-8}) \Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$
3. Bahan semikonduktor yang memiliki harga konduktivitas listrik lebih kecil dari $10^{-8} \Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$

ketiga jenis bahan tersebut banyak dimanfaatkan sebagai bahan pembuatan komponen elektronika, contohnya bahan isolator banyak digunakan sebagai

lapisan dielektrik pada kapasitor, bahan semikonduktor dimanfaatkan sebagai lapisan aktif pada komponen-komponen elektronika maupun komponen optoelektronik sedangkan bahan konduktor sering digunakan untuk pembuatan kontak pada komponen elektronik (Setiawan *et al.*, 2007). Bahan semikonduktor mempunyai *energy gap* lebih kecil dari 6 eV. Misalnya bahan Silikon pada temperatur ruang memiliki *energy gap* sebesar 1,11 eV (Purri dan Babbar, 2001). Beberapa jenis bahan semikonduktor dengan celah energi yang dimiliki disampaikan pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Bahan semikonduktor dan celah energi

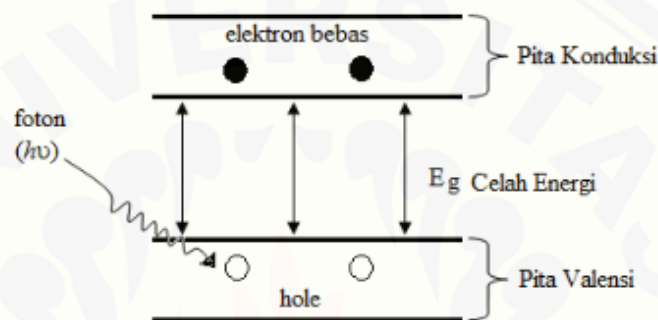
Bahan	Celah Energi (eV)	Bahan	Celah Energi (eV)
Golongan IV		Golongan III-V	
Si	1,11	Ga As	1,40
Ge	0,67	Ga P	2,24
Sn	0,08	Ga Sb	0,77
		In As	0,33
		In P	1,29
		In Sb	1,16
Golongan II-VI		Golongan IV-VI	
Cd S	2,40	Pb S	0,40
Zn Te	2,26		
Zn S	-		
Cd Te	-		
Cd Se	-		

Sumber : Subekti (2003).

Berdasarkan perkembangannya bahan semikonduktor yang pertama kali dieksplorasi adalah bahan Germanium (Ge), namun hingga saat ini bahan semikonduktor yang banyak diteliti untuk bahan baku dalam pembuatan divais elektronik maupun optoelektronik adalah bahan Silikon dengan pertimbangan bahan Silikon yang cukup melimpah di alam ini serta memiliki harga yang relatif murah. Selain bahan Silikon, bahan lain yang banyak diperelajari dan diteliti adalah bahan paduan yang berasal dari golongan II-V atau III-V dalam tabel periodik baik *binary* (Paduan 2 unsur) maupun *ternary* (paduan 3 unsur) seperti ZnO, GaN, AlN, InN, GaAS, GaSb dan AlGaIn. Bahan paduan tersebut masing-masing memiliki ciri khas dan keunikan tersendiri baik ditinjau dari sifat listrik

maupun sifat optiknya sehingga dapat diaplikasikan dengan karakteristik yang dimiliki (Setiawan *et al*, 2007).

Konduktivitas dalam suatu bahan dapat dijelaskan menggunakan konsep pita energi. Terdapat dua jenis pita energi yaitu pita konduksi dan pita valensi. Pita konduksi merupakan pita energi yang di isi oleh pembawa muatan negatif (elektron) sedangkan pita valensi merupakan pita energi yang diisi oleh pembawa muatan positif (*hole*).



Gambar 2.1 Struktur pita energi (Sumber: Vlack, 1991)

Keterangan:

● = elektron

○ = hole

Selisih antara pita konduksi dan pita valensi dinamakan celah energi (*bandgap*). Pemberian energi dapat memacu elektron pada pita valensi untuk tereksitasi menuju ke pita konduksi, sehingga dengan adanya foton (energi cahaya) akan muncul hole pada pita valensi dan elektron pada pita konduksi (Vlack, 1991).

2.3 Semikonduktor Intrinsik dan Ekstrinsik

Berdasarkan pada jenis pembawa muatannya, bahan semikonduktor dibagi menjadi dua bagian yaitu semikonduktor intrinsik dan semikonduktor ekstrinsik.

2.3.1 Semikonduktor Intrinsik

Semikonduktor intrinsik adalah bahan semikonduktor murni yang belum memiliki atom pengotor (impuritas). Semikonduktor intrinsik bahan semikonduktor murni berasal dari golongan IV-A pada tabel periodik, misalnya

Silikon (Si) atau Germanium (Ge) saja. Pada semikonduktor intrinsik, timbulnya elektron dan *hole* terjadi secara bersamaan. Hal ini menyebabkan konsentrasi *hole* sama dengan konsentrasi elektron sehingga dapat ditulis dengan persamaan:

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

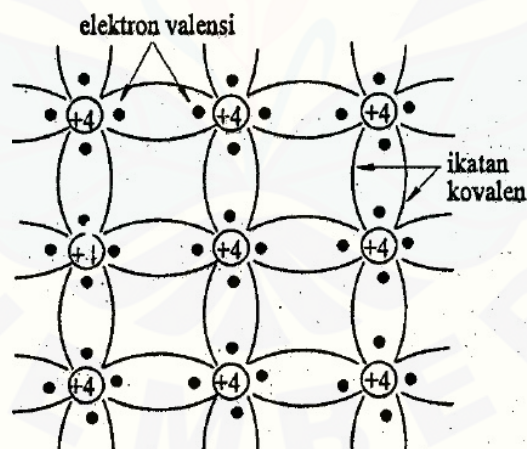
Keterangan:

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

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

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

Salah satu contoh dari bahan semikonduktor intrinsik adalah Silikon (Si). Silikon (Si) merupakan bahan semikonduktor yang memiliki 4 elektron valensi (*tetravalensi*), karena atom Silikon berikatan dengan 4 atom Silikon (Si) lainnya. Pada Silikon kristal, atom Silikon 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 4 elektron valensi yang dimilikinya dengan atom Silikon lainnya (Fukuda, 1999).

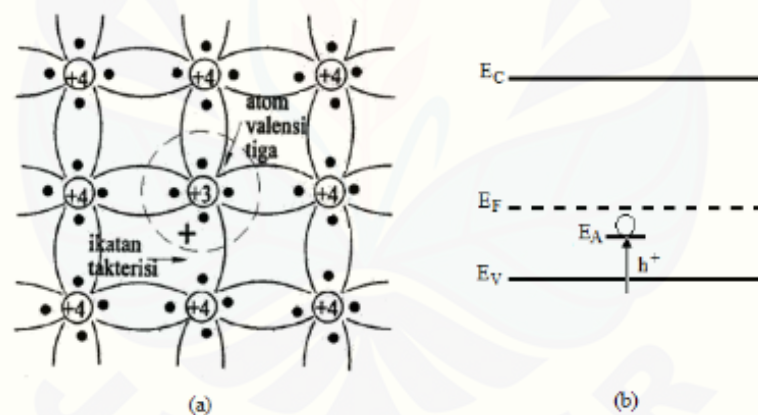


Gambar 2.2 Struktur Silikon kristal berikatan kovalen (Sumber: Sze dan Kwok, 2007)

2.3.2 Semikonduktor Ektrinsik

Bahan semikonduktor ekstrinsik merupakan bahan semikonduktor murni yang diberi pengotor berupa atom yang berasal dari golongan III-A (atom bervalensi 3) atau golongan V-A (atom bervalensi lima) pada tabel periodik. Berdasarkan pengotor (doping) yang diberikan bahan semikonduktor dapat

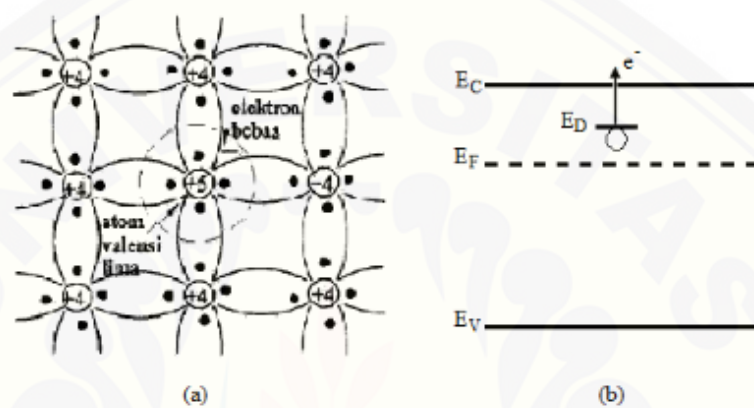
dibedakan menjadi dua yaitu semikonduktor tipe-p dan semikonduktor tipe-n. Semikonduktor tipe-p merupakan bahan semikonduktor pembawa muatannya mayoritasnya adalah *hole* sedangkan pembawa minoritasnya adalah elektron. Semikonduktor tipe-p dapat dibuat dengan menambahkan pengotor berupa atom bervaleksi tiga (trivalen), misalnya (Aluminium (Al), Boron (B), Galium (Ga) atau Indium (In)) pada semikonduktor murni. Atom pengotor ini mempunyai tiga elektron valensi sehingga secara efektif hanya dapat membentuk tiga ikatan kovalen. Saat sebuah atom trivalen menempati posisi atom Silikon dalam kisi kristal maka hanya ada 4 elektron valensi yang dapat membentuk ikatan kovalen lengkap dan tersisa satu elektron yang tidak berpasangan terlihat pada Gambar 2.3a. Karena hasil penggabungan Silikon dengan atom trivalen menghasilkan satu elektron yang tidak berpasangan, maka atom trivalen disebut atom aseptor. Penambahan atom aseptor ini akan mengubah keadaan energi Fermi mendekati di atas pita valensi terlihat pada Gambar 2.3b (Sze dan Kwok, 2007).



Gambar 2.3 (a) Struktur Kristal Silikon dengan atom pengotor valensi tiga, (b) Struktur pita energi semikonduktor tipe-p (Sumber: Sze dan Kwok, 2007)

Semikonduktor tipe-n merupakan bahan semikonduktor pembawa muatannya mayoritasnya adalah elektron sedangkan pembawa minoritasnya adalah *hole*. Semikonduktor ini dapat dibuat dengan penambahan impuritas dari golongan V-A (atom pentavalen) ke dalam semikonduktor intrinsik yang akan menghasilkan semikonduktor tipe-n. Contohnya dengan menambahkan sejumlah

kecil atom pengotor yaitu atom pentavalen seperti antimoni (Sb), fosfor (P) atau arsenik (As) pada silikon murni. Atom-atom pengotor ini memiliki lima elektron valensi sehingga secara efektif memiliki muatan sebesar $+5q$. Saat sebuah atom pentavalen menempati posisi atom Silikon dalam kisi kristal maka hanya ada empat elektron valensi yang dapat membentuk ikatan kovalen lengkap dan tersisa satu elektron yang tidak berpasangan.



Gambar 2.4 (a) Struktur Kristal Silikon dengan atom pengotor valensi lima, (b) Struktur pita energi semikonduktor tipe-n (Sumber: Sze dan Kwok, 2007).

2.4 Persambungan Sel Surya p-n

Persambungan p-n merupakan persambungan antara tipe-p dengan tipe-n. yang dibuat dengan menggunakan bahan semikonduktor intrinsik yang diberi dopan (pengotor) terlebih dahulu, agar berubah menjadi tipe-p atau tipe-n (Atmono, 2007). Persambungan tipe-p dan tipe-n akan menghasilkan aliran arus difusi akibat perbedaan konsentrasi dari masing-masing keduanya (Sconza *et al.*, 1994). Rapat arus difusi untuk elektron dan *hole* dapat dituliskan dalam bentuk persamaan berikut (Gray, 2003)

$$J_p = -qD_p \nabla p \quad (2.2)$$

$$J_n = qD_n \nabla n \quad (2.3)$$

Keterangan:

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

J_n = rapat arus elektron (A/cm)

n = kesentrasi elektron (cm^{-3})

p = kosentrasi *hole* (cm^{-3})

D_n = kosentrasi difusi elektron (cm/s)

D_p = kosentrasi difusi *hole* (cm/s)

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

Akibat proses difusi elektron dan *hole*, 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. Rio dan Iida (1999) menyatakan bahwa terdapat dua macam mekanisme yang menyebabkan arus mengalir, salah satunya adalah arus yang mengalir akibat arus difusi yang membentuk daerah deplesi di daerah persambungan lapisan p dan lapisan n, sehingga medan listrik yang muncul akan memicu terbentuknya arus *drift*. Rapat arus *drift* untuk *hole* dan elektron dapat dituliskan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$\vec{J}_p = qp\mu_p\vec{E} \quad (2.4)$$

$$\vec{J}_n = -qn\mu_n\vec{E} \quad (2.5)$$

Keterangan:

μ_p = mobilitas *hole* (cm^2/Vs)

μ_n = mobilitas elektron (cm^2/Vs)

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

Dengan demikian dapat arus total (\vec{J}_T) di dalam bahan semikonduktor merupakan jumlah rapat arus difusi dan rapat arus *drift* yang dapat dituliskan dalam bentuk persamaan sebagai berikut (Puri dan Babbar, 2001):

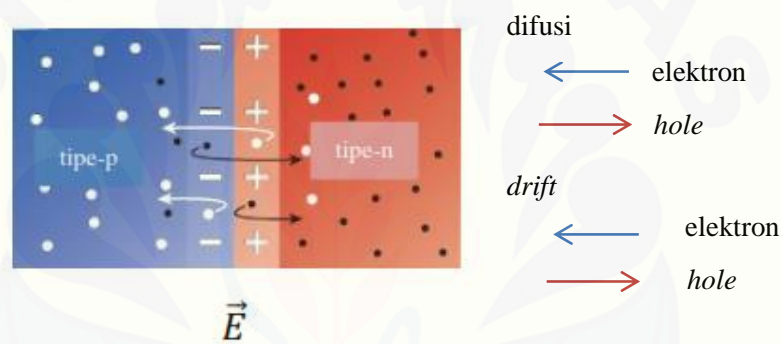
$$\vec{J}_T = \vec{J}_p + \vec{J}_n \quad (2.6)$$

dimana,

$$\vec{J}_p = -qp\mu_p\nabla\Psi - qD_p\vec{\nabla}p \quad (2.7)$$

$$\vec{J}_n = -qn\mu_n\nabla\Psi + qD_n\vec{\nabla}n \quad (2.8)$$

(Purri dan Babbar, 2001).



Gambar 2.5 Aliran difusi dan aliran *drift* elektron dan *hole* (Sumber: Boylestad, 2009)

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).

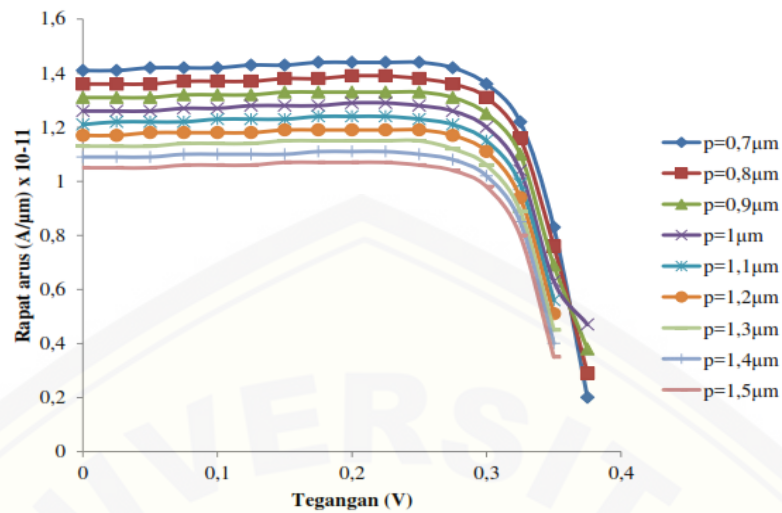
2.5 Pengaruh Ketebalan Lapisan-p pada Sel Surya

Efisiensi konversi sel surya ditentukan oleh rapat keadaan dalam lapisan-p. Rapat keadaan dapat berperilaku sebagai perangkap muatan sehingga akan memperbesar kerugian arus rekombinasi. Semakin kecil rapat keadaan dalam

lapisan-p efisiensi konversi sel surya p-n akan semakin baik. Rapat keadaan pada dasarnya dapat diatasi dengan mengatur ketebalan lapisan-p (Belfar, 2015). Lapisan-p 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-p 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).

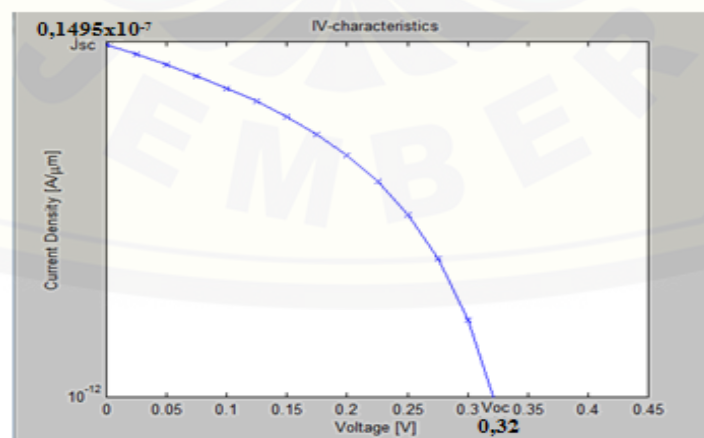
Kinerja sel surya dapat diketahui dari parameter sel surya yang dihasilkan parameter sel surya yang mudah digunakan untuk menentukan kinerja atau *performance* surya ditunjukkan dari besarnya rapat arus. Penelitian tentang simulasi sel surya dilakukan oleh Li dan Gong (2010) tentang pengaruh peran ketebalan lapisan-p terhadap karakteristik rapat arus-tegangan pada sel surya berbasis material Silikon kristal. Menunjukkan pada lapisan-p yang lebih tebal dapat menunjukkan efisiensi dalam penyerapan cahaya sehingga mengasikan sel surya dengan karakteristik yang baik. Penelitian tersebut menggunakan persambungan p-n dengan software AMPS (*Analysis of Microelectronic and Photonic Structure*).

Simulasi pengaruh ketebalan lapisan-p pada karakteristik arus-tegangan sel surya persambungan p-n menggunakan metode elemen hingga juga dilakukan oleh Fatma (2016). Simulasi tersebut menggunakan pemodelan 1D dengan bahan Silikon kristal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa ketebalan lapisan-p, memberikan pengaruh terhadap karakteristik rapat arus-tegangan yang dihasilkan sel surya. dimana semakin tebal lapisan-p yang diaplikasikan maka rapat arus yang dihasilkan sel surya semakin menurun, sebaliknya semakin tipis lapisan-p yang diaplikasikan maka rapat arus yang diberikan pada sel surya semakin meningkat. Dilihat pada Gambar 2.6 dengan variasi ketebalan lapisan-p yang berbeda – beda.



Gambar 2.6 Hasil Simulasi 1D Karakteristik J - V sel surya pada persambungan p-n Silikon kristal dengan variasi ketebalan lapisan-p (Sumber: Fatma, 2016)

Penelitian tersebut telah menghasilkan nilai 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. Namun dalam penelitian tersebut belum menghasilkan nilai efisiensi konversi energi untuk menjadi acuan besarnya kinerja dari divais sel surya. Hal tersebut dimungkinkan karena pemodelan 1D yang dilakukan dalam penelitian belum memberikan hasil perhitungan yang sesuai karakteristik dari divais. Seperti halnya yang ditunjukkan pada penelitian Solehuddin (2016), hasil grafik karakteristik J - V ditunjukkan pada Gambar 2.7



Gambar 2.7 Hasil simulasi 2D karakteristik J - V sel surya pada persambungan p-i-n berbasis a-Si:H (Sumber: Solehuddin, 2016).

Kurva Karakteristik J - V pada Gambar 2.7 tersebut dapat diketahui bahwa nilai untuk J_{sc} sebesar $0,1495 \times 10^{-7} A/\mu m$ sedangkan nilai V_{oc} sebesar $0,32 volt$. Harga V_{oc} dan J_{sc} sangat menentukan nilai dari *fill factor* suatu sel surya. Menunjukkan bahwa simulasi dalam struktur 2D pada sel surya berbasis silikon amorf terhidrogenasi menyatakan bahwa hasil simulasi dalam struktur 2D pada sel surya berbasis Silikon amorf terhidrogenasi nampak memiliki efisiensi konversi sel surya yang lebih tinggi yaitu sebesar 11,7 %. Hal tersebut mengindikasikan bahwa simulasi dalam struktur 1D dan 2D memiliki efek yang berbeda terhadap pada karakteristik yang dihasilkan. Hal ini dapat dipahami mengingat solusi terhadap persamaan semikonduktor, yang diaplikasikan pada divais. Oleh karenanya, kompleksitas perhitungan dari struktur 2D akan mempengaruhi total arus difusi yang dihasilkan.

2.6 Persamaan Dasar Semikonduktor

2.6.1 Persamaan Poisson

Persamaan Poisson secara umum menjelaskan fenomena perubahan medan listrik (E) dalam perangkat akibat perbedaan konsentrasi pembawa muatannya (ρ) (Hack dan Shur, 1985). Perubahan medan listrik tersebut sebanding dengan nilai pembawa muatannya. Jika dihubungkan dengan permivitas bahan (ϵ), 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 :

$$\nabla \cdot E = \nabla \cdot (-\nabla\psi) = -\nabla^2\psi = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (2.9)$$

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

$$\rho = q(p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad (2.10)$$

sehingga persamaan Poisson menjadi :

$$\nabla \cdot E = \nabla \cdot (-\nabla\psi) = -\nabla^2\psi = \frac{q(p - n + N_D^+ - N_A^-)}{\epsilon} \quad (2.11)$$

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 :

$$N_D^+ \approx N_D \quad (2.12)$$

$$N_A^- \approx N_A \quad (2.13)$$

2.6.2 Persamaan Kontinuitas

Persamaan Kontinuitas pada material semikonduktor disebut 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:

$$\frac{1}{q} \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_n = R - G \quad (2.14)$$

$$\frac{1}{q} \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_p = G - R \quad (2.15)$$

\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:

$$G = \frac{F\alpha}{1 - P} (e^{-\alpha x} + P e^{\alpha x}) \quad (2.16)$$

F adalah rapat fluk foton pada gelombang datang, α 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* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$R_{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} \quad (2.17)$$

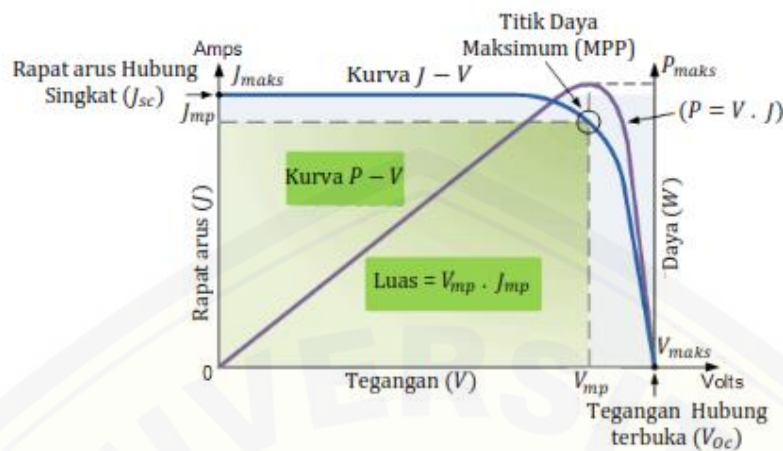
n_i adalah konsentrasi pembawa muatan intrinsik, τ_p adalah waktu hidup (*lifetime*) rekombinasi *hole*, τ_n adalah waktu hidup (*lifetime*) rekombinasi elektron, n_1 adalah parameter konsentrasi elektron dan p_1 adalah parameter konsentrasi *hole*. Sehingga persamaan (2.14) dan (2.15) secara berturut-turut menjadi:

$$\frac{1}{q} \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_n = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} - \frac{F\alpha}{1 - P} (e^{-\alpha x} + P e^{\alpha x}) \quad (2.18)$$

$$\frac{1}{q} \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_p = \frac{F\alpha}{1 - P} (e^{-\alpha x} + P e^{\alpha x}) - \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} \quad (2.19)$$

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 rapat 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 rapat arus hubung singkat (J_{sc}) yang dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.8 Karakteristik J - V sel surya ((Sumber: Markvart dan Castaner, 2005)

3.7.1 Rapat arus Hubung Singkat (J_{sc})

Rapat arus hubung singkat merupakan rapat arus yang melalui sel surya ketika tegangan yang melalui sel surya bernilai nol atau ketika beban di hubung singkat. Rapat arus ini muncul karena proses generasi dan pengumpulan dari pembawa muatan yang dihasilkan dari *irradiance* cahaya matahari. Rapat arus hubung singkat (J_{sc}) merupakan parameter fotovoltaik yang menggambarkan kemampuan sel surya dalam menangkap foton sehingga dapat mengeksitasi pembawa muatan bebas (Sanchez, 2001).

3.7.2 Tegangan Hubung Terbuka (V_{oc})

Tegangan hubung terbuka (V_{oc}) merupakan tegangan maksimum yang dihasilkan perangkat sel surya yang terjadi pada saat arus bernilai nol ampere. Berdasarkan kurva yang ditunjukkan pada Gambar 2.16, peningkatan secara non linier terhadap peningkatan intensitas cahaya matahari. Namun demikian, kebergantungan V_{oc} terhadap *irradiance* tidak terlalu memberi perubahan secara signifikan (Sanchez, 2001).

3.7.3 Daya maksimum dan *Fill Factor*

Daya maksimum merupakan titik maksimum suatu daya yang dihasilkan sel surya. Daya maksimum dapat dihasilkan dari hasil *product* tegangan dan arus

yang bernilai maksimum. Besarnya titik daya maksimum dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_{mp} = V_{mp}J_{mp} \quad (2.20)$$

dimana P_{mp} adalah titik daya maksimum, V_{mp} adalah tegangan yang dihasilkan oleh sel surya saat titik daya maksimum dan J_{mp} adalah rapat arus yang dihasilkan sel surya saat titik daya maksimum.

Sedangkan *fill factor* merupakan parameter yang digunakan untuk membandingkan daya maksimum dari sel surya terhadap V_{oc} dan J_{sc} . Gambar 2.16 merupakan kurva *fill factor* yang menunjukkan titik daya maksimum, selain itu daerah yang dibentuk oleh P_{mp} memiliki nilai lebih kecil dari pada daerah yang dibentuk oleh V_{oc} dan J_{sc} . Persamaan *fill factor* dapat ditentukan sebagai berikut:

$$F = \frac{V_{mp} \cdot J_{mp}}{V_{oc} \cdot J_{sc}} \quad (2.21)$$

FF adalah *fill factor*, V_{mp} adalah tegangan yang dihasilkan oleh sel surya saat titik daya maksimum, J_{mp} adalah rapat arus yang dihasilkan oleh sel surya saat titik daya maksimum, V_{oc} adalah tegangan terbuka dan J_{sc} adalah rapat arus hubung singkat (Usman dan Winata, 2008).

2.7.4 Efisiensi Konversi Sel Surya (η)

Efisiensi sel surya (η) adalah rasio output daya listrik maksimal selama cahaya mengenai permukaan sel surya. Efisiensi konversi energi sel surya menunjukkan banyaknya sinar matahari yang jatuh pada permukaan sel surya yang dapat dikonversi menjadi energi listrik. Efisiensi sel surya (η) dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \cdot J_{sc} \cdot FF}{\phi} \times 100\% \quad (2.22)$$

dimana V_{oc} adalah tegangan terbuka, J_{sc} adalah arus hubung singkat, ϕ adalah intensitas cahaya, intensitas cahaya masukan (P_{in}) mw/cm dan FF adalah *fill factor* (Usman, 2006).

2.8 Analisis Numerik Berbasis Metode Elemen Hingga

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. 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 (Kabir *et al.* 2012).

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. 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 (Usman, 2006).

Variabel yang digunakan dalam simulasi sel surya dengan metode elemen hingga adalah p , n , dan ψ . Solusi umum masing-masing variabel tersebut jika diselesaikan dengan menggunakan metode elemen hingga adalah

$$\psi = \sum_{j=1}^a \psi_j \quad (2.23)$$

$$n = \sum_{j=1}^a n_j \quad (2.24)$$

$$p = \sum_{j=1}^a p_j \quad (2.25)$$

dimana a adalah jumlah elemen segitiga di dalam geometri (Usman, 2006). Variabel p , n , dan ψ 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)

$$n = n_i e^{\psi_u} \quad (2.26)$$

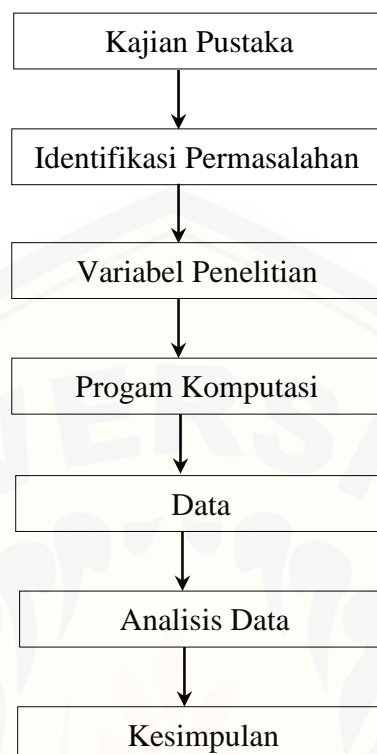
$$p = n_i e^{\psi_v} \quad (2.27)$$

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Kegiatan Penelitian

Kegiatan penelitian yang dilakukan berupa kegiatan simulasi untuk mengetahui pengaruh ketebalan lapisan-p terhadap kinerja sel surya berbasis Silikon kristal pada persambungan p-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.

Penelitian ini diawali dengan melakukan kajian pustaka melalui berbagai sumber yang ada baik buku maupun internet. Kajian kepustakaan merupakan langkah observasi terhadap topik yang diteliti. Pengumpulan berbagai referensi pendukung, identifikasi permasalahan dan perumusan solusi permasalahan selanjutnya disusun ke dalam sebuah bentuk proposal penelitian. Pekerjaan kedua merupakan inti dari kegiatan penentuan dari permasalahan dengan mengidentifikasi permasalahan yang akan diselesaikan yaitu bagaimana pengaruh ketebalan lapisan-p terhadap kinerja sel surya berbasis Silikon kristal pada persambungan p-n dengan metode elemen hingga. Permasalahan tersebut dapat diselesaikan dengan Sumber yang diperoleh kemudian digunakan sebagai acuan dan pembanding dalam pelaksanaan penelitian. Selanjutnya diperoleh beberapa variabel penelitian yang akan diidentifikasi melalui program komputasi. Tahap selanjutnya melakukan kegiatan simulasi untuk menghasilkan data yaitu grafik karakteristik $J-V$ untuk variasi ketebalan lapisan-p. Data simulasi yang diperoleh kemudian dianalisis dan dapat ditarik kesimpulan. Pada alur kegiatan penelitian yang akan dilakukan dapat ditampilkan dalam bentuk diagram alir Gambar 3.1



Gambar 3.1 Diagram alir kegiatan penelitian

3.2 Jenis dan Sumber Data

3.2.1 Jenis Penelitian

Penelitian yang dilakukan berupa kegiatan simulasi untuk mengetahui karakteristik rapat arus-tegangan pada variasi ketebalan lapisan-p berbasis Silikon kristal menggunakan metode elemen hingga. Penelitian bersifat kuantitatif dimana data yang diperoleh berasal dari hasil perhitungan numerik.

3.2.2 Sumber Data Penelitian

Sumber data yang digunakan untuk menentukan karakteristik rapat arus-tegangan sel surya berbasis Silikon kristal persabungan p-n menggunakan metode elemen hingga merupakan data sekunder. Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan hasil simulasi dan eksperimen yang telah ada. Rincian dari sumber data yang digunakan dapat diketahui pada Tabel 3.1

3.3 Variabel Penelitian dan Skala Pengukuran

3.3.1 Variabel Penelitian

Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian ini dapat dikelompokkan menjadi dua bagian, yaitu variabel bebas dan variabel terikat. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah ketebalan lapisan-p dan tegangan input yang digunakan untuk menghitung besarnya arus yang diperoleh dari tegangan yang di dapat dalam eksperimen. Tegangan ini merupakan tegangan yang di ukur dari karakterisasi kelistrikan bahan. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah rapat arus listrik berdasarkan data pembawa muatan yang dihasilkan.

3.3.2 Skala Perhitungan

Skala perhitungan yang digunakan dalam penelitian ini adalah skala pengukuran ordinal, dimana data yang diperoleh dari kegiatan simulasi yang mengklasifikasikan obyek tertentu dengan cara mengurutkan data yang diteliti dari data paling rendah ke data yang paling tinggi. Obyek yang diteliti adalah divais sel surya berbasis Silikon kristal. Hasil data yang diperoleh karakteristik rapat arus-tegangan dengan variasi ketebalan pada lapisan-p mulai dari $0,7 \mu m$ sampai dengan $1,5 \mu m$. Hasil tersebut kemudian akan diurutkan berdasarkan nilai yang paling kecil ke nilai yang paling besar.

3.4 Kerangka Pemecahan Masalah

Pemecahan masalah disini, dilakukan dengan memperoleh sumber- sumber data yang telah ada, untuk sebuah kerangka dalam penetian yang akan dilakukan, Kemudian melakukan observasi terhadap topik yang diteliti untuk pemecahan masalah dalam penelitian yang akan dilakukan, Selanjutnya Pengumpulan berbagai referensi pendukung, meliputi beberapa parameter umum pada sebuah bahan berdasarkan penelitian yang telah ada yang berhubungan dengan permasalahan dalam kegiatan yang akan disimulasikan. Serta menentukan perumusan dari solusi permasalahan untuk menyelesaikannya dengan melakukan kajian pustaka terlebih dahulu.

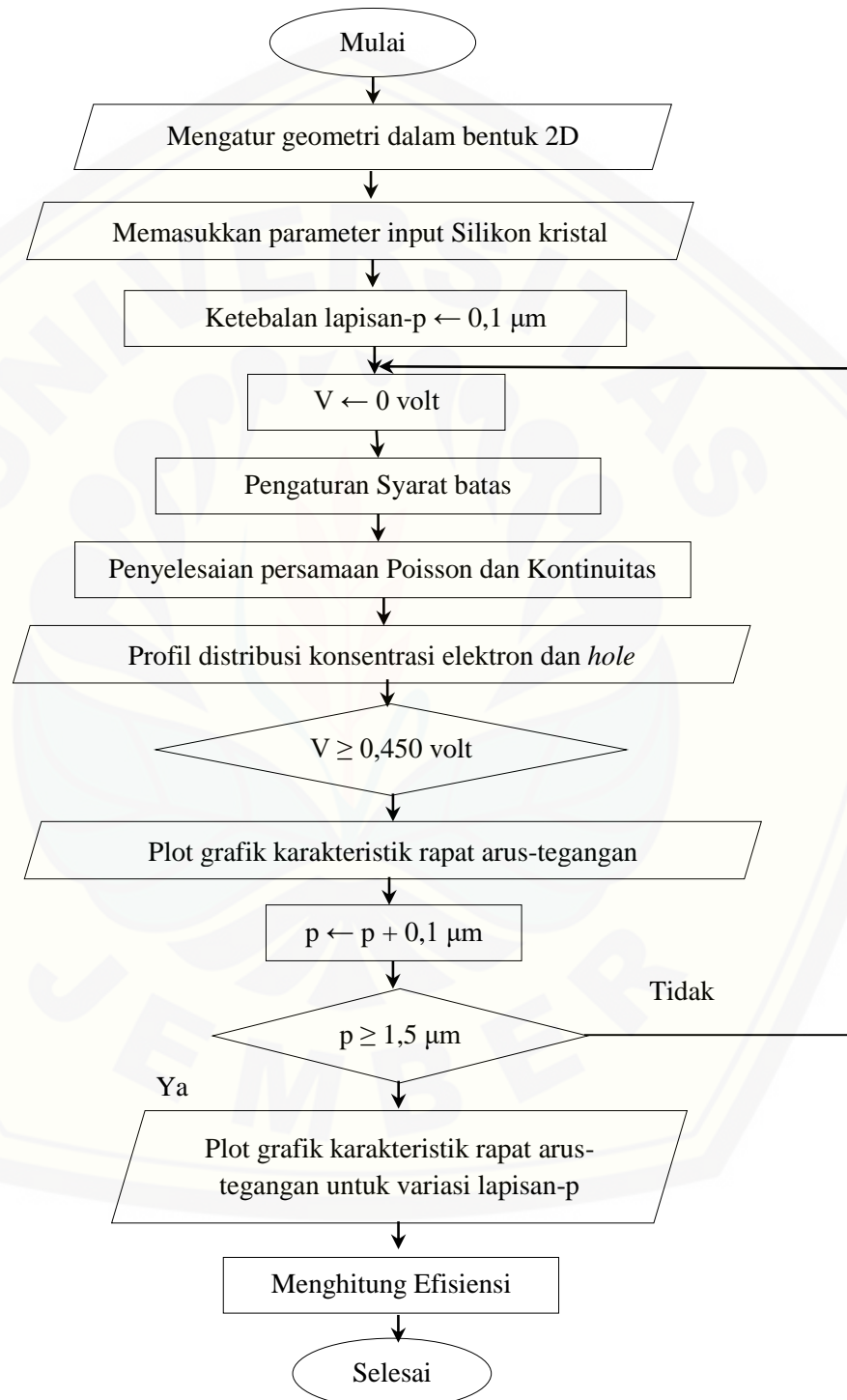
3.4.1 Kajian Pustaka

Kajian pustaka digunakan untuk mengkaji dan juga sebagai dasar penguat dari penelitian yang akan dilakukan dalam kegiatan penelitian. Hal pertama dari penelitian yang dilakukan dengan mencari berbagai sumber literatur mengenai semua informasi yang berhubungan dengan sel surya yang berkaitan dengan penelitian yang diangkat. Salah satu informasi yang akan didapat tersebut diantaranya ketebalan yang diaplikasikan pada sel surya secara eksperimen maupun simulasi yang telah dilakukan sebelumnya. Kemudian, hasil informasi yang didapatkan dari kajian pustaka dapat menjadi acuan atau referensi untuk menganalisis dalam menentukan karakteristik bahan yang akan diteliti.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan bahan Silikon kristal, karena bahan Silikon kristal memiliki sifat bahan yang baik untuk diaplikasikan. Bahan yang menjadi pilihan untuk diteliti dalam kegiatan simulasi tersebut diterapkan dalam persambungan p-n dengan metode elemen hingga. Kegiatan penelitian yang dilakukan mengacu pada penelitian simulasi sebelumnya yang dilakukan oleh Fatma (2016) simulasi karakteristik J - V Dioda sel surya pada variasi ketebalan lapisan-p 1D. Dalam penelitian ini akan dilakukan pemodelan struktur 2D dengan memunculkan nilai efisiensi konversi energi untuk menjadi acuan besarnya kinerja dari divais sel surya.

3.4.2 Mekanisme Simulasi

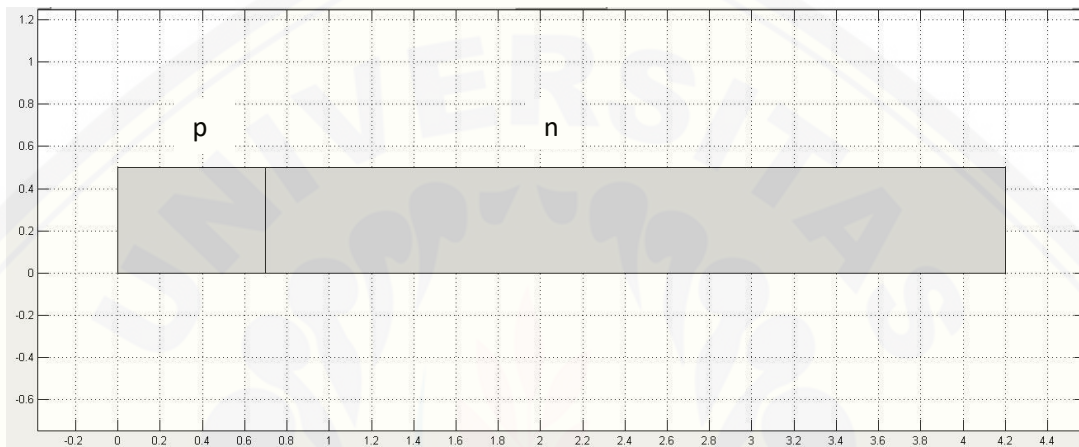
Prosedur simulasi persambungan p-n bahan Silikon kristal dapat digambarkan melalui diagram alir berikut ini :



Gambar 3.2 Diagram alir kegiatan simulasi

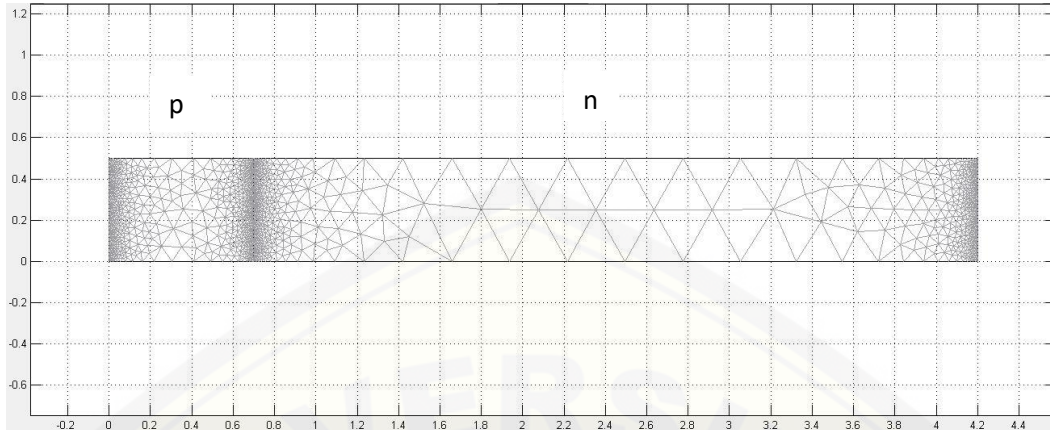
a. Geometri Silikon Kristal dalam 2D

Simulasi 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 dan lapisan-n, geometri dalam penelitian ini dapat ditunjukkan pada Gambar 3.3 berikut :



Gambar 3.3 Geometri divais sel surya bahan Silikon kristal dengan struktur 2D

Persambungan antara lapisan diasumsikan terbentuk dengan baik, sehingga aliran arus pada daerah persambungan didefinisikan sama dengan aliran arus pada daerah dekat persambungan. Pada gambar di atas dapat dilihat bahwa persambungan p-n mempunyai ketebalan yang berbeda antara lapisan p dan n. Ketebalan lapisan-p ini divariasikan mulai $0,7 \mu\text{m}$ sampai $1,5 \mu\text{m}$ dengan kelipatan 0,1. Sedangkan pada lapisan-n dibuat tetap (konstan). Ketebalan lapisan yang digunakan mengacu pada penelitian sebelumnya yaitu Fatma (2016). Tahap selanjutnya setelah penggambaran geometri sel surya yaitu pembagian geometri sel surya. Dalam Software Simulasi yang digunakan Pada penelitian ini, dilakukan pembagian geometri sel surya menjadi elemen-elemen kecil (*mesh*) yang berbentuk segitiga dapat ditunjukkan pada Gambar 3.4 berikut :



Gambar 3.4 Pembagian geometri divais sel surya bahan Silikon kristal menjadi elemen elemen kecil (*mesh*) dengan struktur 2D.

b. Parameter input sel surya sruktur p-n Silikon Kristal

Parameter input yang digunakan pada kegiatan simulasi ini disesuaikan dengan bahan Silikon kristal. Parameter input diperoleh berdasarkan studi pustaka ,diambil dari berbagai referensi baik dari eksperimen maupun simulasi yang telah dilakukan sebelumnya yang dilakukan. Beberapa parameter input yang digunakan dalam pemodelan 2D bahan Silikon kristal dapat ditunjukkan pada Tabel 3.1 berikut:

Tabel 3.1 Parameter Input simulasi

Parameter	Nilai
Muatan Listrik (q)	1.602×10^{-19} C
Permittivitas dalam vakum (ϵ_0)	8.85×10^{-14} F/cm
Temperatur (T)	300 K
Konstanta Boltzman (k)	1.38×10^{-23} J/K
Pembawa muatan intrinsik (n_i)	1.46×10^{10} cm ⁻²
Permittivitas bahan (ϵ_r)	11.8 F/cm
Faktor skala (C)	1×10^{-3} cm ⁻²
Faktor Transmisi	0.023
Mobilitas elektron (μ_n)	800 cm ² /Vs
Mobilitas hole (μ_p)	200 cm ² /Vs
Difusi elektron (D_n)	20.7 cm ² /s
Difusi hole (D_p)	5.17 cm ² /s
Koefisien absorpsi	30×10^4 cm ⁻¹
Koefisien transmisi cahaya	0.5
Mesh	0.005

(Sumber : Danielsson, 2000).

Parameter yang digunakan dalam kegiatan simulasi 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 (ψ), konsentrasi pembawa muatan (n, p, N), konstanta difusi dari pembawa muatan (D_n, D_p), mobilitas pembawa muatan (μ_n, μ_p), dan densitas pembawa muatan (ρ) yang ditunjukkan pada Tabel 3.2

Tabel 3.2 Faktor skala parameter input

Parameter	Faktor Skala	Parameter Ekivalen
Jarak (x, y, z)	$x_0 = (x , y , z)_{max}$	xx_0, yy_0, zz_0
Potensial listrik (ψ)	$\psi_0 = \frac{kT}{q}$	$\frac{\psi}{\psi_0}$
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 (μ_n, μ_p)	$\frac{D_0}{\psi_0}$	$\frac{\mu_n \psi_0}{D_0}, \frac{\mu_p \psi_0}{D_0}$

(Sumber : Danielsson, 2000)

c. Pengaturan Kondisi Batas

Pengaturan kondisi batas bahan dapat ditentukan dengan menggunakan kondisi batas Dirichlet dan kondisi batas Neumann. Kondisi batas Dirichlet yang berfungsi untuk mendefinisikan potensial dan konsentrasi pembawa muatan dalam kontak, serta kondisi batas Neumann untuk mendefinisikan turunan (*differential*). Oleh karena itu, simulasi yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan kondisi batas Dirichlet untuk daerah yang berhubungan dengan kontak logam serta kondisi batas Neumann untuk permukaan divais yang lain. Selain itu, dengan mengasumsikan bahwa persambungan antar lapisan terbentuk dengan baik sehingga aliran arus pada daerah persambungan didefinisikan sama dengan aliran arus pada daerah dekat persambungan. Kondisi batas Dirichlet secara matematis dapat ditulis dengan persamaan berikut:

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

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

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

dimana ψ 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 (Danielsson, 2000). Sedangkan kondisi batas Neumann secara matematis dapat ditulis dengan persamaan berikut:

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

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

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

Dimana \hat{n} adalah permukaan normal, E medan listrik sedangkan J_n dan J_p disini adalah rapat arus elektron dan *hole*

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 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 λ^2 sehingga persamaan tersebut menjadi:

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

Secara matematis ∇^2 sama dengan Δ , maka

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

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 2.18 dan 2.19. Kedua persamaan tersebut digunakan dengan mensubstitusikan persamaan 3.11 dan 3.12 terlebih dahulu, sehingga diperoleh:

$$\nabla \cdot \vec{J}_n = \frac{n_i (uv - 1)}{\tau_p (ue^{\psi} + 1) + \tau_n (ve^{\psi} + 1)} - \frac{F\alpha}{1 - P} (e^{-\alpha x} + Pe^{\alpha x}) \quad (3.13)$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_p = \frac{F\alpha}{1 - P} (e^{-\alpha x} + Pe^{\alpha x}) - \frac{n_i (uv - 1)}{\tau_p (ue^{\psi} + 1) + \tau_n (ve^{\psi} + 1)} \quad (3.14)$$

persamaan kontinuitas di atas siap diinputkan pada saat simulasi.

Sedangkan untuk menentukan nilai efisiensi masing-masing seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.21 dan 2.22, dengan menghitung total rapat arus dari divais pada variasi tegangan V tertentu, maka plot grafik karakteristik J - V akan memberikan informasi tentang nilai rapat arus hubung singkat (J_{sc}) dan tegangan rangkaian terbuka V_{oc} . Adapun efisiensi dari divais didefinisikan oleh persamaan berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \cdot J_{sc} \cdot FF}{\phi} \times 100\% \quad (3.15)$$

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot J_{mp}}{V_{oc} \cdot J_{sc}} \quad (3.16)$$

3.5 Metode Analisis Data

Penelitian ini akan dilakukan simulasi untuk menghasilkan kurva karakteristik rapat arus-tegangan J - V . Serta perhitungan efisiensi sel surya berbasis silikon Kristal. Dalam penelitian yang akan diperoleh sebagai berikut:

1. Kurva karakteristik rapat arus-tegangan J - V pada variasi ketebalan lapisan-p

Kurva karakteristik rapat arus-tegangan J - V yang diperoleh, diamati nilai tegangan hubung terbuka (V_{oc}) dan rapat arus hubung singkat (J_{sc}). Serta dianalisa setiap kurva karakteristik rapat arus-tegangan J - V yang diperoleh dengan variasi ketebalan lapisan-p mulai dari $0,7 \mu m$ sampai $1,5 \mu m$.

2. Efisiensi sel surya berbasis silikon kristal

Pada penelitian ini akan memunculkan nilai efisiensi dari variasi ketebalan lapisan-p. Efisiensi hasil simulasi ini dilakukan untuk menunjukkan seberapa besar kinerja devais sel surya berbasis Silikon Kristal. Pada perhitungan efisiensi ini dimulai dihitung (J_{mp}) dan (P_{mp}). Kemudian akan diperoleh nilai *fill factor* (FF), dimana nilai *fill factor* (FF) yang menentukan efisiensi terbesar pada saat variasi yang di aplikasikan. Nilai efisiensi di peroleh dari perhitungan rapat arus hubung singkat (J_{sc}), Tegangan hubung singkat terbuka (V_{oc}) dan nilai FF .

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah diuraikan di atas, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil simulasi kurva karakteristik rapat arus – tegangan $J-V$ pada sel surya berbasis Silikon kristal pada struktur 2D, menunjukkan bahwa semakin tebal lapisan-p yang diaplikasikan maka rapat arus J_{SC} semakin menurun. Rapat arus hubung singkat J_{sc} paling besar diperoleh yaitu $26,941 \times 10^{-7} A/\mu m$, dengan V_{OC} sebesar $0,450 Volt$. Nilai ini diperoleh pada saat ketebalan lapisan-p sebesar $0,7 \mu m$.
2. Efisiensi sel surya berbasis Silikon kristal mengalami penurunan saat lapisan-p semakin tebal. Efisiensi tertinggi diperoleh pada saat ketebalan lapisan-p $0,7 \mu m$, yakni sebesar $7,76\%$, sedangkan efisiensi terendah diperoleh ketika ketebalan lapisan-p $1,5 \mu m$, yakni sebesar $7,67\%$. Karakteristik perubahan efisiensi dipengaruhi oleh nilai J_{SC} dan $fill factor$.

5.2 Saran

Hasil nilai rapat arus J_{sc} pada kurva karakteristik $J-V$ yang diperoleh dari hasil simulasi untuk struktur persambungan p-n, telah berhasil memperbaiki sedemikian hingga dengan kesesuaian dari referensi. Dalam hal, dari beberapa parameter bahan semikonduktor yang mempengaruhi kurva karakteristik $J-V$. Parameter yang dimaksud meliputi, nilai koefisien difusi pembawa muatan, koefisien transmisi cahaya, koefisien absorpsi bahan, rapat fluks foton, mobilitas pembawa muatan. Dengan demikian, diharapkan pada penelitian selanjutnya dapat menjelaskan lebih detail dalam mensimulasikan profil distribusi pembawa muatan, karakteristik $J-V$ dan nilai efisiensi berdasarkan eksperimen yang telah ada. Dan Perlu dilakukan simulasi lebih detail mengenai karakteristik $J-V$ yang dihasilkan dari pemilihan beberapa parameter yang bersesuaian, agar dihasilkan nilai rapat arus yang lebih optimum dan nilai efisiensi yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Atmono, T.M. 2007. *Preparasi Lapisan Tipis Sambungan p-n ZnO dan Cuinse menggunakan Penyangga Lapisan CdS untuk Aplikasi Sel Surya*. Yogyakarta: BATAN.
- 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*
- Boylestad, R. dan Nashelsky, L. 2009. *Electronic Devices and Circuit Theory*. New Jersey : Prentice Hall.
- Danielsson, E. 2000. *FEMLAB Model Library For Semiconductor Device Model*. Stockholm: The Royal Insitute Of Insitute.
- Fatma, A, G. 2016. Simulasi Karakteristik I-V Dioda Sel Surya pada Variasi Ketebalan Lapisan-p Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Skripsi Jember: Universitas Jember*.
- Fukuda, M. 1999. *Optical Semiconductor Devices*. Canada: John Willey & Sons, Inc.
- Goetzberger, A. 1998. *Crystalline Silicon Solar Cell*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd.
- Hack, M. dan Shur. 1985. Physics of Amorphous Silicon Alloy p-i-n Solar Cells. *Journal of Applied Physics*. 58(2), 997-1020.
- Jasruddin, D.M., dan Momang, A. 2009a. Pengembangan Sel Surya P-I-N Berbasis Silikon Amorf Terhidrogenasi Pada Reaktor PECVD Ganda. *Jurnal Aplikasi Fisika*. 5(1),14-21.
- 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.

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

Kwok, K. Ng . 1995. *Complete Guide to Semiconductor Devices*, McGraw-Hill. Inc. United State of America.

Li, C.J dan Gong, H. 2010. *Computer Simulation Study of Materials Parameters Influence on Solar Cell Performance*. National University of Singapore.

Markvart, T., dan L. Castaner. 2005. *Solar Cell: Materials, Manufacture and Operation*. UK: University of Southampton.

Moller,H.J. 1993. *Semiconductors For Solar Cells*. Artech ; House, Inc.

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.

Rusdiana, D. 2012. *Kebergantungan Faktor Pengisian (Fill Factor) Sel Surya terhadap Besar Celah Pita Energi Material Semikonduktor Pembuatnya: Suatu Tinjauan Matematika*. Bandung: Universitas Pendidikan Indonesia.

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.

Santhiarsa, I. G. N. N., dan Kusuma, I. G. B. W. 2005. Kajian Energi Surya untuk Pembangkit Tenaga Listrik. *Teknologi Elektro*, 4(1): 29-33.

Setiawan, Rusdiana, Hamidah & Kaniawati. 2007. *Modul Semikonduktor*. Bandung: FMIPA UPI.

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.

Sindo. 2014. *Paradigma Pengelolaan Green Fund*. <http://m.koran-sindo.com/node/362215> diakses pada 20 juni 2017.

Solehuddin, M. 2016. Simulasi 2D Perhitungan Efisiensi Konversi Energi Sel Surya Persambungan p-i-n Berbasis Material Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H). *Skripsi*. Jember: FMIPA Universitas Jember.

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*. 9(2),77-80.

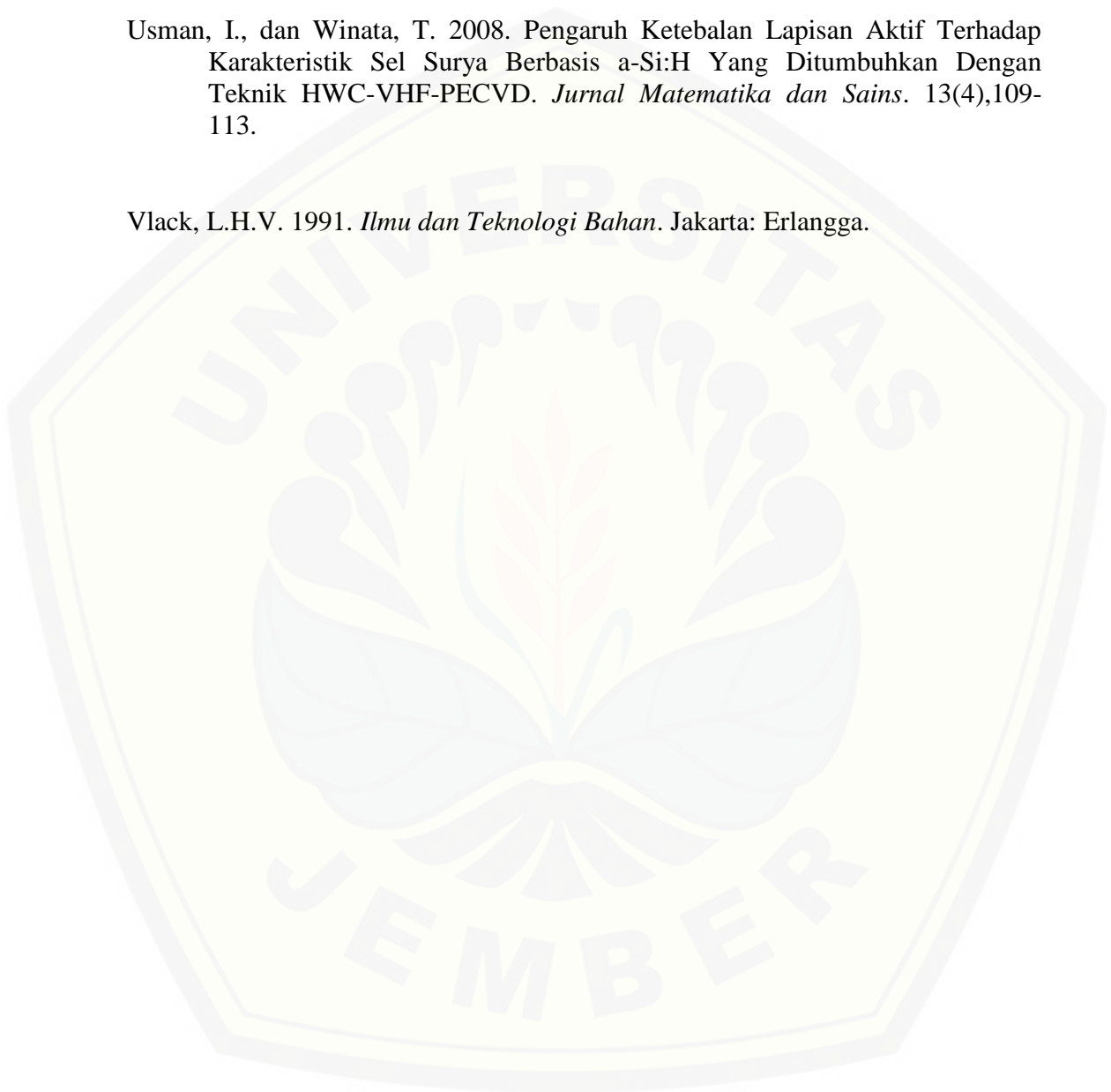
Sze, S. M. 2007. *Physics Of Semiconductor Devices*. New Jersey: John Willey & Son.

Sze, S. M. dan Kwok, K. Ng. 2007. *Physics of Semiconductor Devices*. Canada: John Wiley and Sons, Inc. *Cells with Double Layer Window Nanocrystalline Silicon*. Algeria: Science Direct.

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

Usman, I., dan Winata, T. 2008. Pengaruh Ketebalan Lapisan Aktif Terhadap Karakteristik Sel Surya Berbasis a-Si:H Yang Ditumbuhkan Dengan Teknik HWC-VHF-PECVD. *Jurnal Matematika dan Sains*. 13(4),109-113.

Vlack, L.H.V. 1991. *Ilmu dan Teknologi Bahan*. Jakarta: Erlangga.



LAMPIRAN

4.1 Tabel Data Karakteristik *J-V* berbasis Silikon Kristal pada Variasi Ketebalan Lapisan-p

a) Data Karakteristik *J-V* sel surya berbasis silikon Kristal pada Variasi Ketebalan Lapisan-p 0,7 μm sampai 1 μm

Tegangan (Voc)	Rapat arus (A/ μm) p= 0,7 μm	Rapat arus (A/ μm) p= 0,8 μm	Rapat arus (A/ μm) p= 0,9 μm	Rapat arus (A/ μm) p= 1,0 μm
0,000	26,941 x 10 ⁻⁷	26,891 x 10 ⁻⁷	26,841 x 10 ⁻⁷	26,791 x 10 ⁻⁷
0,025	26,940 x 10 ⁻⁷	26,889 x 10 ⁻⁷	26,840 x 10 ⁻⁷	26,789 x 10 ⁻⁷
0,050	26,939 x 10 ⁻⁷	26,889 x 10 ⁻⁷	26,839 x 10 ⁻⁷	26,789 x 10 ⁻⁷
0,075	26,939 x 10 ⁻⁷	26,888 x 10 ⁻⁷	26,839 x 10 ⁻⁷	26,789 x 10 ⁻⁷
0,100	26,938 x 10 ⁻⁷	26,888 x 10 ⁻⁷	26,838 x 10 ⁻⁷	26,788 x 10 ⁻⁷
0,125	26,938 x 10 ⁻⁷	26,887 x 10 ⁻⁷	26,838 x 10 ⁻⁷	26,788 x 10 ⁻⁷
0,150	26,937 x 10 ⁻⁷	26,887 x 10 ⁻⁷	26,837 x 10 ⁻⁷	26,787 x 10 ⁻⁷
0,175	26,936 x 10 ⁻⁷	26,886 x 10 ⁻⁷	26,836 x 10 ⁻⁷	26,786 x 10 ⁻⁷
0,200	26,934 x 10 ⁻⁷	26,884 x 10 ⁻⁷	26,835 x 10 ⁻⁷	26,785 x 10 ⁻⁷
0,225	26,932 x 10 ⁻⁷	26,882 x 10 ⁻⁷	26,833 x 10 ⁻⁷	26,783 x 10 ⁻⁷
0,250	26,929 x 10 ⁻⁷	26,879 x 10 ⁻⁷	26,830 x 10 ⁻⁷	26,780 x 10 ⁻⁷
0,275	26,923 x 10 ⁻⁷	26,874 x 10 ⁻⁷	26,825 x 10 ⁻⁷	26,776 x 10 ⁻⁷
0,300	26,914 x 10 ⁻⁷	26,865 x 10 ⁻⁷	26,817 x 10 ⁻⁷	26,768 x 10 ⁻⁷
0,325	26,897 x 10 ⁻⁷	26,849 x 10 ⁻⁷	26,802 x 10 ⁻⁷	26,754 x 10 ⁻⁷
0,350	26,879 x 10 ⁻⁷	26,830 x 10 ⁻⁷	26,779 x 10 ⁻⁷	26,727 x 10 ⁻⁷
0,375	26,850 x 10 ⁻⁷	26,812 x 10 ⁻⁷	26,758 x 10 ⁻⁷	26,698 x 10 ⁻⁷
0,400	26,806 x 10 ⁻⁷	26,761 x 10 ⁻⁷	26,717 x 10 ⁻⁷	26,662 x 10 ⁻⁷
0,425	26,678 x 10 ⁻⁷	26,637 x 10 ⁻⁷	26,596 x 10 ⁻⁷	26,554 x 10 ⁻⁷
0,450	26,394 x 10 ⁻⁷	26,357 x 10 ⁻⁷	26,321 x 10 ⁻⁷	26,284 x 10 ⁻⁷

b) Data Karakteristik *J-V* berbasis silikon Kristal pada Variasi Ketebalan Lapisan-p 1,1 μm sampai 1,5 μm

Tegangan (Voc)	Rapat arus (A/ μm) p= 1,1 μm	Rapat arus (A/ μm) p= 1,2 μm	Rapat arus (A/ μm) p= 1,3 μm	Rapat arus (A/ μm) p= 1,4 μm	Rapat arus (A/ μm) p= 1,5 μm
0,000	26,749 x 10 ⁻⁷	26,699 x 10 ⁻⁷	26,659 x 10 ⁻⁷	26,599 x 10 ⁻⁷	26,539 x 10 ⁻⁷
0,025	26,739 x 10 ⁻⁷	26,689 x 10 ⁻⁷	26,639 x 10 ⁻⁷	26,588 x 10 ⁻⁷	26,538 x 10 ⁻⁷
0,050	26,739 x 10 ⁻⁷	26,688 x 10 ⁻⁷	26,638 x 10 ⁻⁷	26,588 x 10 ⁻⁷	26,538 x 10 ⁻⁷
0,075	26,738 x 10 ⁻⁷	26,688 x 10 ⁻⁷	26,638 x 10 ⁻⁷	26,588 x 10 ⁻⁷	26,538 x 10 ⁻⁷
0,100	26,738 x 10 ⁻⁷	26,688 x 10 ⁻⁷	26,638 x 10 ⁻⁷	26,587 x 10 ⁻⁷	26,538 x 10 ⁻⁷

Tegangan (Voc)	Rapat arus (A/ μm) p= 1,1 μm	Rapat arus (A/ μm) p= 1,2 μm	Rapat arus (A/ μm) p= 1,3 μm	Rapat arus (A/ μm) p= 1,4 μm	Rapat arus (A/ μm) p= 1,5 μm
0,125	26,737 x 10 ⁻⁷	26,687 x 10 ⁻⁷	26,637 x 10 ⁻⁷	26,587 x 10 ⁻⁷	26,537 x 10 ⁻⁷
0,150	26,737 x 10 ⁻⁷	26,686 x 10 ⁻⁷	26,637 x 10 ⁻⁷	26,587 x 10 ⁻⁷	26,537 x 10 ⁻⁷
0,175	26,736 x 10 ⁻⁷	26,686 x 10 ⁻⁷	26,636 x 10 ⁻⁷	26,586 x 10 ⁻⁷	26,536 x 10 ⁻⁷
0,200	26,735 x 10 ⁻⁷	26,685 x 10 ⁻⁷	26,635 x 10 ⁻⁷	26,585 x 10 ⁻⁷	26,535 x 10 ⁻⁷
0,225	26,733 x 10 ⁻⁷	26,683 x 10 ⁻⁷	26,633 x 10 ⁻⁷	26,584 x 10 ⁻⁷	26,534 x 10 ⁻⁷
0,250	26,731 x 10 ⁻⁷	26,681 x 10 ⁻⁷	26,631 x 10 ⁻⁷	26,581 x 10 ⁻⁷	26,532 x 10 ⁻⁷
0,275	26,726 x 10 ⁻⁷	26,677 x 10 ⁻⁷	26,627 x 10 ⁻⁷	26,578 x 10 ⁻⁷	26,529 x 10 ⁻⁷
0,300	26,719 x 10 ⁻⁷	26,670 x 10 ⁻⁷	26,621 x 10 ⁻⁷	26,572 x 10 ⁻⁷	26,523 x 10 ⁻⁷
0,325	26,706 x 10 ⁻⁷	26,657 x 10 ⁻⁷	26,609 x 10 ⁻⁷	26,561 x 10 ⁻⁷	26,512 x 10 ⁻⁷
0,350	26,680 x 10 ⁻⁷	26,633 x 10 ⁻⁷	26,586 x 10 ⁻⁷	26,539 x 10 ⁻⁷	26,491 x 10 ⁻⁷
0,375	26,658 x 10 ⁻⁷	26,599 x 10 ⁻⁷	26,561 x 10 ⁻⁷	26,520 x 10 ⁻⁷	26,472 x 10 ⁻⁷
0,400	26,627 x 10 ⁻⁷	26,574 x 10 ⁻⁷	26,537 x 10 ⁻⁷	26,492 x 10 ⁻⁷	26,446 x 10 ⁻⁷
0,425	26,512 x 10 ⁻⁷	26,470 x 10 ⁻⁷	26,428 x 10 ⁻⁷	26,386 x 10 ⁻⁷	26,343 x 10 ⁻⁷
0,450	26,247 x 10 ⁻⁷	26,210 x 10 ⁻⁷	26,172 x 10 ⁻⁷	26,134 x 10 ⁻⁷	26,097 x 10 ⁻⁷