



**PENGARUH VARIASI SPEKTRUM CAHAYA TAMPAK  
TERHADAP KARAKTERISTIK RAPAT ARUS-TEGANGAN  
SEL SURYA BERBASIS GALIUM ARSENIDA**

**SKRIPSI**

Oleh

**Aprizal Faruchi  
NIM 131810201047**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS JEMBER  
2018**



**PENGARUH VARIASI SPEKTRUM CAHAYA TAMPAK  
TERHADAP KARAKTERISTIK RAPAT ARUS-TEGANGAN  
SEL SURYA BERBASIS GALIUM ARSENIDA**

**SKRIPSI**

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat  
untuk menyelesaikan studi pada Program Studi Fisika (S-1)  
dan mencapai gelar Sarjana Sains

Oleh

**Aprizal Faruchi**  
**NIM 131810201047**

**JURUSAN FISIKA**  
**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**  
**UNIVERSITAS JEMBER**  
**2018**

### PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk :

1. Kakek-nenek Bapak Alm. Bukari yang sangat kusayangi belum melihat saya pada titik ini dan Ibu Poniem yang sangat kusayangi yang telah merawat dan mendidik saya sampai berada pada titik ini.
2. Kedua orang tuaku Bapak Imam Bahrowi dan Ibu Sulastri yang sangat kusayangi, kuucapkan terimakasih yang tak henti-hentinya memberi semangat, doa, kasih sayang serta pengorbanan yang tak tergantikan hingga saat ini;
3. Adikku Biki Ramadhani yang selalu memberikan motivasi;
4. Semua guru-guruku dari Taman Kanak-Kanak, SD, SMP, SMA sampai Perguruan Tinggi, terima kasih atas ilmu yang telah diberikan selama ini;
5. Almamater tercinta, Jurusan Fisika FMIPA Universitas Jember.

**MOTTO**

*“If you don’t believe in yourself, no one will do it for you”*

(Jika kamu tidak percaya pada dirimu sendiri, maka tidak ada orang yang akan melakukannya kepadamu)

(Izuchukwu Godson Udemezue)<sup>1</sup>



---

<sup>1</sup> Izuchukwu Godson Udemezue, *Golden Succes Principles To Live By* (Nigeria: Nwei-Anambra State, 2010), hlm. 21.

**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Aprizal Faruchi

NIM : 131810201047

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “*Pengaruh Variasi Spektrum Cahaya Tampak Terhadap Karakteristik Rapat Arus-Tegangan Sel Surya Berbasis Galium Arsenida*” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

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

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

Jember, 11 Januari 2018

Yang menyatakan,

Aprizal Faruchi

NIM 131810201047

**SKRIPSI**

**PENGARUH VARIASI SPEKTRUM CAHAYA TAMPAK  
TERHADAP KARAKTERISTIK RAPAT ARUS-TEGANGAN  
SEL SURYA BERBASIS GALIUM ARSENIDA**

Oleh

Aprizal Faruchi  
NIM 131810201047

**Pembimbing**

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

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “*Pengaruh Variasi Spektrum Cahaya Tampak Terhadap Karakteristik Rapat Arus-Tegangan Sel Surya Berbasis Galium Arsenida*” karya Aprizal Faruchi telah diuji dan disahkan pada:

Hari :

Tanggal :

tempat : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember

Tim Penguji:

Ketua,

Anggota I,

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

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

Anggota II,

Anggota III,

Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si.  
NIP 197208201998021001

Ir. Misto, M.Si.  
NIP 195911211991031002

Mengesahkan  
Dekan,

Drs. Sujito, Ph.D.  
NIP 196102041987111001

## RINGKASAN

**Pengaruh Variasi Spektrum Cahaya Tampak Terhadap Karakteristik Rapat Arus-Tegangan Sel Surya Berbasis Galium Arsenida;** Aprizal Faruchi, 131810201047; 2017: 72 halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Sel surya merupakan sebuah divais optoelektronik yang dapat mengkonversi secara langsung energi matahari yang diterimanya menjadi energi listrik. Divais sel surya dapat berupa dioda semikonduktor persambungan dua buah bahan semikonduktor tipe-p dan semikonduktor tipe-n. Salah satu parameter penting dalam pembentukan arus listrik pada sel surya adalah sinar matahari. Sinar matahari terdiri atas berbagai macam panjang gelombang, diantaranya cahaya tampak, dimana saat menumbuk permukaan sel surya akan dikonversi menjadi energi listrik oleh sel surya tersebut. Energi listrik yang dihasilkan bergantung pada besarnya panjang gelombang yang menumbuk divais. Hal ini berarti panjang gelombang memiliki peranan penting dalam pembentukan arus pada sel surya, sehingga dalam penelitian ini spektrum cahaya menjadi fokus dalam penelitian. Pada penelitian ini persambungan bahan semikonduktor yang digunakan untuk divais sel surya adalah p-n *heterojunction* GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As dengan indeks fraksi komposisi  $x=4$ . Tujuan dari penelitian ini adalah membuat simulasi karakteristik  $J-V$  (rapat arus-tegangan) dari divais sel surya berbasis galium arsenida untuk berbagai variasi spektrum cahaya tampak yang diterima oleh sel surya tersebut. Berdasarkan hasil simulasi yang didapatkan, telah dianalisis pengaruh variasi spektrum cahaya tampak terhadap karakteristik  $J-V$  sel surya.

Penelitian dilaksanakan dalam beberapa tahapan kegiatan simulasi. Pada tahap pertama dilakukan *entry* data yang berupa parameter divais sel surya p-n *heterojunction* GaAs/AlGaAs, geometri divais, panjang gelombang dari spektrum cahaya tampak ( $\lambda$ ) dan tegangan keluaran sel surya ( $V_A$ ). Geometri divais yang akan disimulasikan karakteristik  $J-V$  nya pada penelitian ini memiliki lebar 0,5  $\mu\text{m}$  dan ketebalan 0,7  $\mu\text{m}$ . Metode yang digunakan adalah metode elemen hingga sehingga geometri divais tersebut dibagi-bagi menjadi elemen-elemen yang lebih kecil yang disebut dengan *mesh*. Data-data yang telah di *entry* kemudian digunakan untuk mengatur kondisi batas serta menyelesaikan persamaan Poisson dan kontinuitas. Pada tahapan ini dihasilkan profil distribusi konsentrasi elektron dan *hole* dengan indikator warna untuk menunjukkan nilai dari konsentrasi pembawa muatan. Tahap kedua adalah pembuatan grafik karakteristik  $J-V$  yang memerlukan variasi tegangan keluaran ( $V_A$ ). Tegangan keluaran divariasi dari 0 volt sampai dengan 0,475 volt. Pada tahap ketiga, dilakukan kegiatan simulasi untuk mengetahui pengaruh variasi spektrum cahaya tampak terhadap karakteristik  $J-V$  divais sel surya dengan melakukan variasi spektrum cahaya tampak. Variasi spektrum cahaya tampak yang digunakan pada kegiatan simulasi adalah 0,50  $\mu\text{m}$  sampai 0,80  $\mu\text{m}$  dengan rentang 0,050  $\mu\text{m}$ . Pada tahap keempat dilakukan optimasi koefisien absorpsi cahaya dan variasi tegangan keluaran yang

lebih besar untuk mendapatkan karakteristik kelistrikan yang lebih baik. Optimasi koefisien absorpsi cahaya yang diberikan sebesar  $1,25 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$  sampai dengan  $2,25 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$  dengan interval  $0,25 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ , sedangkan tegangan keluaran divariasi dari 0 volt sampai dengan 0,725 volt. Pada tahapan kelima dilakukan kembali peninjauan pengaruh variasi spektrum cahaya tampak terhadap karakteristik  $J$ - $V$  divais sel surya dengan melakukan variasi spektrum cahaya tampak pada nilai koefisien absorpsi cahaya optimum yang dihasilkan. Perlakuan yang diberikan sama seperti pada tahap ketiga. Tahapan ini menghasilkan grafik karakteristik  $J$ - $V$  untuk beberapa variasi panjang gelombang dan koefisien absorpsi cahaya.

Berdasarkan hasil optimasi, koefisien absorpsi cahaya optimum yang digunakan untuk analisis pengaruh panjang gelombang terhadap karakteristik  $J$ - $V$  adalah sebesar  $2,25 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ . Hasil simulasi menunjukkan bahwa konsentrasi pembawa muatan (elektron dan *hole*) tertinggi diperoleh pada saat divais dikenai panjang gelombang sebesar  $0,50 \mu\text{m}$ . Konsentrasi pembawa muatan tersebut terus menurun ketika panjang gelombang diperbesar hingga  $0,80 \mu\text{m}$ . Sebagaimana konsentrasi pembawa muatan, rapat arus hubung singkat ( $J_{sc}$ ) tertinggi didapatkan ketika panjang gelombang  $0,50 \mu\text{m}$  diaplikasikan pada divais, yakni sebesar  $39,61 \text{ mA/cm}$ . Peningkatan panjang gelombang, yang dapat menyebabkan berkurangnya energi foton yang diserap oleh divais, menurunkan jumlah pembawa muatan dan menjadi penyebab utama menurunnya  $J_{sc}$  dalam bahan. Namun demikian, variasi panjang gelombang yang diterapkan dalam simulasi ini tidak menyebabkan adanya perbedaan pada tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ), yang bernilai tetap sebesar  $0,725 \text{ volt}$ .

## PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT. atas segala rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengaruh Variasi Spektrum Cahaya Tampak Terhadap Karakteristik Rapat Arus-Tegangan Sel Surya Berbasis Galium Arsenida”. 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.

Penulis mendapat bantuan serta bimbingan dari berbagai pihak dalam penyusunan skripsi ini, untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Endhah Purwandari, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama, dan Bapak Dr. Edy Supriyanto, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran dan perhatian dalam membantu penulisan skripsi ini;
2. Bapak Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.S.i., selaku Dosen Penguji Utama, dan Bapak Ir. Misto, M.S.i., selaku Dosen Penguji Anggota yang telah meluangkan waktu untuk memberikan kritik dan saran serta memberikan koreksi-koreksi untuk skripsi ini;
3. Tim Fisika Komputasi serta teman-teman yang telah membantu saya dalam penelitian (Dwi, Nely, Anwar, Siti, I'im, Tami, Fitri dan Lia) terimakasih atas kebersamaan dan kekeluargaan yang terjalin selama penelitian.
4. Sahabat-sahabat Jamaluddin, Subhan, Yubi, Fauzi, Alvin, Lukman, dan Ariebyo, serta teman-teman Physicopat 13 Hz yang telah memberikan pengalaman dan kesan luar biasa
5. Zilmi Kaffah yang selalu memberikan motivasi dalam pengerjaan skripsi ini
6. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

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

Jember, Januari 2018

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	ii
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	iii
<b>HALAMAN MOTTO</b> .....	iv
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	v
<b>HALAMAN PEMBIMBINGAN</b> .....	vi
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	vii
<b>RINGKASAN</b> .....	viii
<b>PRAKATA</b> .....	x
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiv
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xv
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	4
<b>1.3 Batasan Masalah</b> .....	4
<b>1.4 Tujuan</b> .....	5
<b>1.5 Manfaat</b> .....	5
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	6
<b>2.1 Radiasi Matahari</b> .....	6
<b>2.2 Sel Surya</b> .....	7
2.2.1 Struktur Persambungan Sel Surya p-n .....	8
2.2.2 Galium Arsenida (GaAs) dan Aluminium Galium Arsenida (AlGaAs).....	10
2.2.3 Absorpsi, Transmittansi dan Reflektansi.....	12
<b>2.3 Persamaan Dasar Semikonduktor</b> .....	14
2.3.1 Persamaan Poisson dan Persamaan Kontinuitas.....	14
2.3.2 Generasi dan Rekombinasi Sel Surya.....	15
2.3.3 Transport Pembawa Muatan dalam Semikonduktor...	16
2.3.4 Karakteristik Rapat Arus-Tegangan Sel Surya.....	17
<b>2.4 Pengaruh Spektrum Cahaya Tampak terhadap         Karakteristik <i>J-V</i> Sel Surya</b> .....	18
<b>2.5 Analisis Numerik Berbasis Metode Elemen Hingga</b> .....	20

<b>BAB 3. METODE PENELITIAN</b> .....	22
<b>3.1 Rancangan Kegiatan Penelitian</b> .....	22
<b>3.2 Jenis dan Sumber Data Penelitian</b> .....	23
3.2.1 Jenis Penelitian.....	23
3.2.2 Sumber Data Penelitian.....	23
<b>3.3 Variabel Penelitian dan Skala Pengukuran</b> .....	23
3.3.1 Variabel Penelitian.....	23
3.3.3 Skala Pengukuran.....	24
<b>3.4 Kerangka Pemecahan Masalah</b> .....	24
3.4.1 Identifikasi Permasalahan dan Kajian Pustaka.....	24
3.4.3 Program Komputasi.....	25
<b>3.5 Metode Analisis Data</b> .....	35
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	36
<b>4.1 Distribusi Pembawa Muatan</b> .....	36
4.1.1 Lapisan p.....	40
4.1.2 Lapisan Persambungan.....	43
4.1.3 Lapisan n.....	45
<b>4.2 Karakteristik <math>J-V</math></b> .....	47
<b>BAB 5. PENUTUP</b> .....	53
5.1 Kesimpulan.....	53
5.2 Saran.....	53
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	55
<b>LAMPIRAN</b> .....	59

DAFTAR TABEL

	Halaman
3.1 Parameter Input. ....	28
3.2 Faktor Skala Parameter Input.....	29
3.3 Parameter Input Pengaturan Kondisi Batas.....	31
4.1 Konsentrasi <i>Hole</i> Di Lapisan p Untuk Seluruh Variasi Panjang Gelombang Pada Variasi Tegangan Keluaran .....	41
4.2 Konsentrasi Elektron di Lapisan p Untuk Seluruh Variasi Panjang Gelombang Pada Variasi Tegangan Keluaran.....	42
4.3 Konsentrasi <i>Hole</i> di Lapisan Persambungan Untuk Seluruh Variasi Panjang Gelombang Pada Variasi Tegangan Keluaran .....	43
4.4 Konsentrasi Elektron di Lapisan Persambungan Untuk Seluruh Variasi Panjang Gelombang Pada Variasi Tegangan Keluaran .....	44
4.5 Konsentrasi <i>Hole</i> di Lapisan n Untuk Seluruh Variasi Panjang Gelombang Pada Variasi Tegangan Keluaran .....	45
4.6 Konsentrasi Elektron di Lapisan n Untuk Seluruh Variasi Panjang Gelombang Pada Variasi Tegangan Keluaran.....	46

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1	Spektrum sinar matahari..... 6
2.2	Proses konversi energi matahari menjadi listrik pada sel surya..... 7
2.3	Diagram pita energi struktur p-n <i>homojunction</i> . .... 9
2.4	Diagram pita energi struktur p-n <i>heterojunction</i> . .... 10
2.5	(a) Struktur ikatan kovalen GaAs; (b) <i>Direct bandgap</i> GaAs..... 10
2.6	Hubungan antara energi <i>gap</i> dengan konstanta kisi beberapa bahan semikonduktor paduan.. .... 12
2.7	Grafik hubungan panjang gelombang dengan koefisien tranmitansi 13
2.8	Grafik hubungan panjang gelombang dengan koefisien absorpsi... 13
2.9	Kurva karakteristik rapat arus-tegangan sel surya ..... 17
2.10	Kurva karakteristik <i>J-V</i> silikon dengan variasi panjang gelombang foton datang..... 19
2.11	(a) Geometri dioda persambungan p-n dalam bentuk 2D; (b) Pendefinisian geometri dioda persambungan p-n menjadi elemen-elemen kecil..... 21
3.1	Diagram alir rancangan kegiatan penelitian..... 22
3.2	Geometri sel surya struktur p-n <i>heterojunction</i> GaAs/AlGaAs ..... 26
3.3	Alur simulasi penentuan karakteristik <i>J-V</i> divais sel surya struktur p-n <i>heterojunction</i> GaAs-AlGaAs..... 34
4.1	Profil distribusi konsentrasi elektron dengan variasi tegangan keluaran ( $V_a$ ) dengan indikator warna di sebelah kanan menunjukkan perubahan nilai konsentrasi elektron pada skala logaritmik..... 37
4.2	Profil distribusi konsentrasi <i>hole</i> dengan variasi tegangan keluaran ( $V_a$ ) dimana indikator warna di sebelah kanan menunjukkan nilai konsentrasi <i>hole</i> pada skala logaritmik..... 39
4.3	Kurva karakteristik <i>J-V</i> variasi panjang gelombang dimana daya maksimumnya ( $P_{max}$ ) ditunjukkan dengan garis putus-putus ..... 49
4.4	Kurva karakteristik <i>J-V</i> pada 5 variasi koefisien absorpsi cahaya dengan daya maksimumnya ( $P_{max}$ ) ditunjukkan dengan garis putus-putus..... 50
4.5	Kurva karakteristik <i>J-V</i> variasi panjang gelombang ( $\mu\text{m}$ ) pada koefisien absorpsi cahaya sebesar $2,25 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ dimana daya maksimumnya ( $P_{max}$ ) ditunjukkan dengan garis putus-putus..... 51

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
A Kurva Karakteristik <i>J-V</i> Sel Surya Berbasis Galium Arsenida Pada Variasi Spektrum Cahaya Tampak.....	59
B Kurva Karakteristik <i>J-V</i> Sel Surya Berbasis Galium Arsenida Pada Variasi Spektrum Cahaya Tampak Dengan Perlakuan Optimasi Koefisien Absorpsi Cahaya.....	63
C Kurva Karakteristik <i>J-V</i> Sel Surya Berbasis Galium Arsenida Pada Variasi Spektrum Cahaya Tampak Dengan Koefisien Absorpsi Cahaya Optimum $2,25 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ .....	66
D Tabel Nilai Rapat Arus Hubung Singkat (Ma/Cm) Untuk Variasi Tegangan Keluaran.....	70

## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Penggunaan sumber energi berlebih membuat ketersediaan sumber energi di dunia ini semakin lama semakin menipis, salah satunya adalah penggunaan energi listrik yang berlebih. Energi listrik yang berasal dari sumber energi konvensional, seperti bahan bakar fosil, semakin lama semakin menurun. Hal tersebut berbanding terbalik dengan kebutuhan manusia akan energi listrik yang terus meningkat setiap tahunnya. Terbatasnya ketersediaan bahan bakar fosil sebagai bahan baku energi listrik membuat manusia perlu mengembangkan sumber energi alternatif yang dapat dijadikan sebagai sumber energi listrik. Manfaat lain dari sumber energi alternatif ini diharapkan juga memiliki tingkat polusi yang rendah, sehingga bersifat ramah lingkungan. Salah satu sumber energi alternatif yang dapat digunakan dalam hal ini sebagai sumber energi listrik adalah sel surya (Prasetyowati, 2012).

Divais sel surya terbuat dari bahan semikonduktor yang berperan sebagai insulator pada temperatur rendah dan sebagai konduktor bila terdapat energi dan panas (Mintorogo, 2000). Divais sel surya dapat berupa dioda semikonduktor persambungan dua buah bahan semikonduktor tipe-p dan semikonduktor tipe-n dimana pada ujung tipe-p dijadikan terminal anoda dan ujung lainnya menjadi katoda (Surjono, 2007). Dioda yang umumnya digunakan sebagai divais sel surya terbuat dari bahan semikonduktor Germanium (Ge) dan Silikon (Si). Seiring berjalannya waktu ditemukan bahan yang dapat digunakan untuk membuat sel surya dan memiliki sifat yang sama seperti unsur golongan IVA yaitu Galium Arsenida (GaAs).

GaAs termasuk dalam klasifikasi bahan semikonduktor paduan yang tersusun dari Ga yang berasal dari golongan IIIA dan As dari golongan VA. Bahan GaAs merupakan semikonduktor campuran yang memiliki sifat listrik dan sifat optik seperti silikon. Bahan GaAs paling banyak digunakan dalam microwave dan aplikasi fotonik (Supriyanto, 2015). GaAs memiliki celah pita energi langsung (*direct bandgap*), berbeda dengan silikon yang mempunyai celah

pita energi tidak langsung (*indirect bandgap*). Nilai celah pita energi GaAs pada temperatur ruang sebesar 1,42 eV, berbeda dengan silikon yang memiliki pita energi sebesar 1,12 eV (Sze, 1981). Beberapa keuntungan material GaAs dibandingkan dengan Si adalah material GaAs dapat beroperasi hingga daerah frekuensi tinggi sehingga dapat digunakan untuk membuat piranti elektronik seperti LED, transistor, laser dioda serta divais sel surya (Sutrisno, 1986). GaAs merupakan *direct bandgap* yang memiliki kecepatan rekombinasi sangat tinggi sehingga sangat merugikan jika diaplikasikan pada divais sel surya, untuk mengatasi hal tersebut maka digunakan persambungan p-n *heterojunction* bahan GaAs dan AlGaAs (Aluminium Galium Arsenida) untuk mengurangi faktor rekombinasi (Subekti, 2003).

Penelitian mengenai kajian simulasi divais sel surya berbasis Galium Arsenida telah dilakukan oleh Liou dan Wong (1992) dengan membandingkan dan mengoptimasi kinerja sel surya bahan semikonduktor antara Si dan GaAs menggunakan metode analitik dengan menggunakan parameter divais yang ada pada literatur. Hasil simulasi yang didapatkan oleh Liou dan Wong (1992) panjang gelombang optimum yang diserap GaAs adalah 0,88  $\mu\text{m}$  yang menghasilkan rapat arus yang sebesar 0,0281  $\text{A}/\text{cm}^2$ . sedangkan panjang gelombang optimum yang dapat diserap Si terletak pada 1,1  $\mu\text{m}$  dengan rapat arus yang dihasilkan sebesar 0,0359  $\text{A}/\text{cm}^2$ . Nilai tegangan keluaran maksimum yang dihasilkan bahan semikonduktor Si dan GaAs berturut-turut adalah 0,62 Volt dan 1,09 Volt.

Slimane et al. (2013) melakukan penelitian mengenai simulasi numerik dari sel surya struktur *heterojunction* GaAs/AlGaAs dengan celah pita energi berjenjang menggunakan AMPS1-D. Struktur *heterojunction* yang digunakan berupa persambungan  $\text{p}^+\text{GaAs}/\text{N}^-\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ . Celah pita energi berjenjang digunakan untuk mengurangi kehilangan dari rekombinasi pembawa muatan di area persambungan yang akan mempengaruhi kinerja dari sel surya. Bahan yang digunakan pada celah pita energi berjenjang berupa  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  yang diletakkan di area persambungan. Dilakukan dua jenis simulasi yaitu dengan menggunakan celah pita energi berjenjang dengan hasil yang didapatkan berupa rapat arus

sebesar  $30,01 \text{ mA/cm}^2$  dan tegangan keluaran sebesar 1,16 volt, serta tanpa menggunakan celah pita energi berjenjang dengan hasil yang didapatkan berupa rapat arus sebesar  $29,94 \text{ A/cm}^2$  dan tegangan keluaran sebesar 1,15 volt.

Sinar matahari memiliki berbagai macam jenis spektrum gelombang elektromagnetik, salah satu diantaranya adalah cahaya tampak. Sinar matahari dapat dikonversi menjadi energi listrik saat menumbuk permukaan sel surya. Banyaknya spektrum gelombang elektromagnetik yang diserap oleh sel surya akan berbanding lurus dengan nilai efisiensinya (Yuwono, 2005). Penelitian terkait pengaruh spektrum cahaya terhadap kinerja sel surya secara simulasi telah dilakukan oleh Fitriana (2014) menggunakan bahan semikonduktor Si dengan pemodelan dalam bentuk dua dimensi berbasis metode elemen hingga. Hasil yang diperoleh dari penelitian tersebut adalah panjang gelombang foton  $0,5 \text{ }\mu\text{m}$  dengan nilai rapat arus  $0,0556 \text{ mA/m}$ . Variasi spektrum cahaya tidak mempengaruhi nilai tegangan hubungan terbuka dengan nilai tegangan tetap pada 0,4 volt, sehingga perlu dilakukan kajian mengenai hubungan antara panjang gelombang dengan tegangan keluaran yang dihasilkan.

Berdasarkan uraian di atas, maka pada penelitian ini akan dilakukan simulasi pengaruh variasi spektrum cahaya tampak terhadap karakteristik rapat-arus tegangan sel surya berbasis Galium Arsenida. Struktur persambungan sel surya yang digunakan dalam kegiatan simulasi adalah p-n *heterojunction* GaAs/AlGaAs yang mengacu pada penelitian Slimane et al. (2013). Simulasi menggunakan berbagai parameter yang diperoleh dari beberapa eksperimen dan referensi sebelumnya akan digunakan pada penelitian ini sebagai parameter input, sehingga didapatkan hasil berupa distribusi pembawa muatan dan karakteristik rapat arus dan tegangan. Persamaan yang digunakan pada penelitian ini adalah persamaan Poisson dan Kontinuitas untuk bahan GaAs. Temperatur yang digunakan dalam penelitian ini adalah temperatur ruang (300 K) dikarenakan umumnya divais sel surya didesain untuk beroperasi pada temperatur ruang.

Pemodelan divais sel surya yang akan dilakukan menggunakan metode elemen hingga untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial yang terdapat dalam persamaan divais semikonduktor. Metode elemen hingga ini diterapkan

dengan cara membagi geometri bahan menjadi beberapa elemen kecil. Dengan metode tersebut diharapkan diperoleh hasil perhitungan dari setiap elemen menjadi sangat akurat untuk menampilkan nilai distribusi pembawa muatan yang terdapat di seluruh bagian dalam geometri bahan tersebut (Usman, 2006; Purwandari, 2011). Geometri yang digunakan mengacu pada kegiatan simulasi yang telah dilakukan oleh Fitriana (2014) yang meneliti pengaruh panjang gelombang foton datang terhadap karakteristik arus-tegangan dioda Silikon melalui suatu kegiatan simulasi. Kegiatan simulasi yang telah dilakukan oleh Fitriana (2014) menggunakan struktur *homojunction* menggunakan bahan Silikon, sedangkan penelitian yang akan dilakukan menggunakan struktur *heterojunction* menggunakan bahan Galium Arsenida.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan sebelumnya, rumusan masalah yang akan dibahas pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh variasi spektrum cahaya tampak terhadap karakteristik rapat arus-tegangan sel surya dengan struktur p-n *heterojunction* GaAs/AlGaAs ?

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Struktur bahan yang dimodelkan adalah struktur p-n *heterojunction* GaAs/AlGaAs dengan lapisan p menggunakan bahan GaAs dan lapisan n menggunakan bahan AlGaAs. Indeks fraksi komposisi yang digunakan pada material AlGaAs adalah  $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ ;
2. Geometri dari divais sel surya dimodelkan dalam bentuk 2D, karena dasar pemodelan yang digunakan berbasis pada penelitian sebelumnya yang mengkaji distribusi pembawa muatan di ujung lapisan p, ujung lapisan n serta pada persambungan lapisan p dan n;

3. Solusi persamaan differensial yang digunakan dalam pemodelan ini menggunakan metode elemen hingga, karena metode ini membagi geometri bahan menjadi beberapa elemen kecil, sehingga hasil yang diperoleh lebih akurat;
4. Variasi spektrum cahaya tampak yang digunakan dalam penelitian ini berada pada rentang  $0,5 \mu\text{m}$  sampai dengan  $0,8 \mu\text{m}$  dengan interval  $0,05 \mu\text{m}$ . Hal ini didasarkan pada hasil simulasi pada penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa panjang gelombang mempengaruhi rapat arus dan tegangan keluaran yang dihasilkan.

#### **1.4 Tujuan**

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dikemukakan sebelumnya, tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai mengetahui pengaruh variasi spektrum cahaya tampak terhadap karakteristik rapat arus-tegangan sel surya dengan struktur *heterojunction* GaAs/AlGaAs.

#### **1.5 Manfaat**

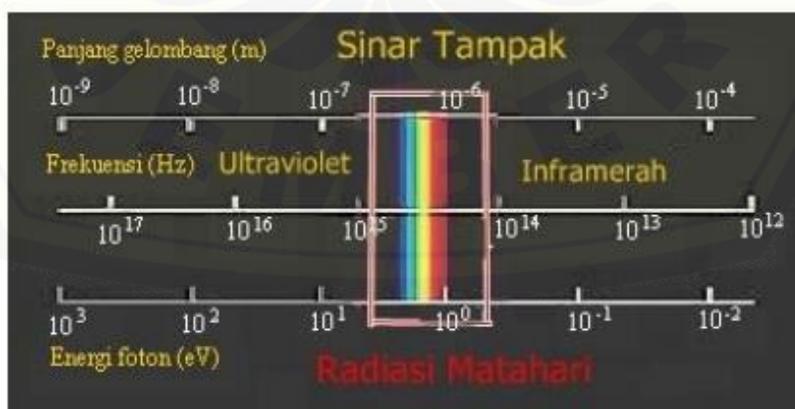
Beberapa manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Hasil penelitian yang didapatkan menjadi acuan untuk kegiatan penelitian selanjutnya dalam hal pengembangan sel surya.
2. Hasil penelitian dapat memberikan informasi mengenai kinerja sel surya dengan struktur struktur *heterojunction* GaAs/AlGaAs dengan perlakuan variasi spektrum cahaya tampak.

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Radiasi Matahari

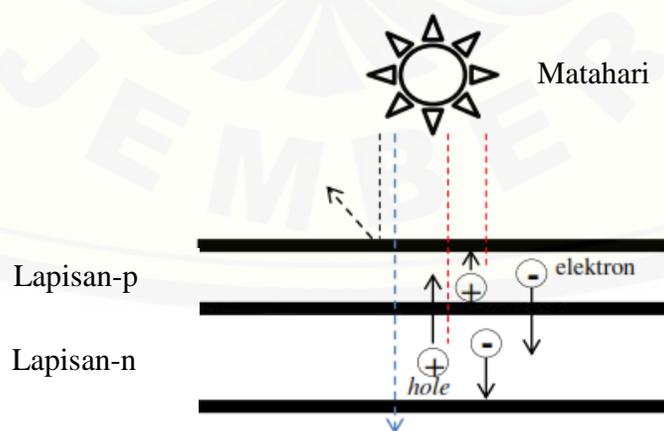
Radiasi matahari merupakan energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh matahari ke permukaan bumi. Energi yang ditransmisikan dalam bentuk radiasi elektromagnetik kurang lebih  $4 \times 10^{20}$  J/s yang berada pada rentang panjang gelombang (0,2-3)  $\mu\text{m}$  (tanpa melewati atmosfer), sedangkan yang melewati atmosfer bumi berkisar antara (0,32-2,53)  $\mu\text{m}$  (Sze dan Lee, 2007). Radiasi matahari dapat dikonversi menjadi energi listrik dengan menggunakan sel *photovoltaic*. *Photovoltaic* merupakan proses konversi cahaya menjadi energi listrik. Bahan utama dalam pembuatan sel *photovoltaic* adalah bahan semikonduktor. Sel *photovoltaic* yang baik digunakan terbuat dari bahan yang memiliki *bandgap* dengan *range* yang lebar agar dapat menyerap radiasi matahari (Sears dan Zemansky, 2003). Menurut Ariswan (2008), sebanyak 7 % energi matahari berupa *ultraviolet* (Air Mass 0), 47 % adalah *visible* (cahaya tampak memiliki panjang gelombang 0,4 mikrometer sampai 0,8 mikrometer), dan 46 % merupakan cahaya *infrared*. Spektrum cahaya dari sinar matahari akan menentukan beberapa jenis bahan yang digunakan untuk konversi energi yang sesuai. Gambar 2.1 merupakan spektrum yang dipancarkan oleh sinar matahari.



Gambar 2.1 Spektrum sinar matahari (Sumber: Ariswan, 2008)

## 2.2 Sel Surya

Sebelum sampai ke permukaan bumi, energi matahari melakukan proses konversi menjadi energi listrik melalui mekanisme fotovoltaiik pada suatu alat yang disebut sel surya (*Solar Cell*). Penggunaan sel surya memiliki keuntungan yaitu dapat mengkonversi langsung radiasi matahari menjadi energi listrik, ramah lingkungan dan tanpa emisi saat dioperasikan, tidak memerlukan bahan bakar, serta tempat yang digunakan fleksibel sehingga jumlah sel surya yang dipakai dapat disesuaikan dengan kebutuhan (Wolf, 1991). Penelitian sel surya diawali dari penelitian efek fotovoltaiik yang dilakukan oleh Alexander Edmond Becquerel pada tahun 1839 yang mendeteksi bahwa ketika sinar matahari mengenai elektroda pada larutan elektrolit terdapat tegangan foton. Pada tahun 1912 Einstein menjelaskan secara teori, mekanisme fenomena tersebut, namun masih sebatas eksperimen di laboratorium. Selanjutnya dilakukan pengembangan efek fotovoltaiik menjadi sel surya dengan bahan semikonduktor oleh para peneliti dari *Bell Laboratories* pada tahun 1954 (Sze, 1981). Menurut Yuwono (2005), Pada umumnya sel surya terbuat dari bahan semikonduktor dan terdiri dari persambungan bahan semikonduktor bertipe p dan n (*p-n junction semiconductor*) yang jika terkena sinar matahari maka akan terjadi aliran elektron, aliran elektron inilah yang disebut sebagai aliran arus listrik. Proses penyinaran radiasi matahari terhadap sel surya dapat ditunjukkan pada Gambar 2.2



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

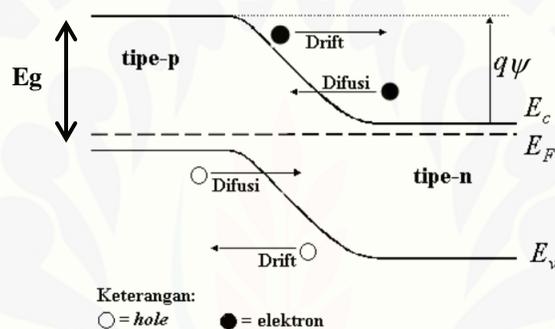
Sinar matahari terdiri dari partikel-partikel yang disebut sebagai foton. Proses konversi melalui mekanisme fotovoltaik melibatkan energi foton dalam sel surya. Energi foton yang menyinari sel surya akan diserap, dipantulkan atau dilewatkan oleh bahan, sehingga mengakibatkan elektron-elektron yang berada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

### 2.2.1 Struktur Persambungan Sel Surya p-n

Salah satu jenis sel surya yang umum digunakan adalah sel surya persambungan p-n. Struktur dasar dari persambungan p-n terdiri atas semikonduktor tipe-p dan semikonduktor tipe-n yang disambungkan satu sama lain, baik secara mekanik maupun melalui sebuah proses penumbuhan atau deposisi tertentu. Setelah terjadi persambungan terjadi perubahan pada daerah persambungan. Lapisan tipe-n yang memiliki mayoritas elektron akan dengan mudah terlepas dari atom induknya, begitu pula pada lapisan tipe-p yang didominasi oleh *hole*. Pada proses ini terjadi difusi elektron dari lapisan tipe-n menuju lapisan tipe-p serta difusi *hole* dari lapisan tipe-p menuju tipe-n (Yuwono, 2005)

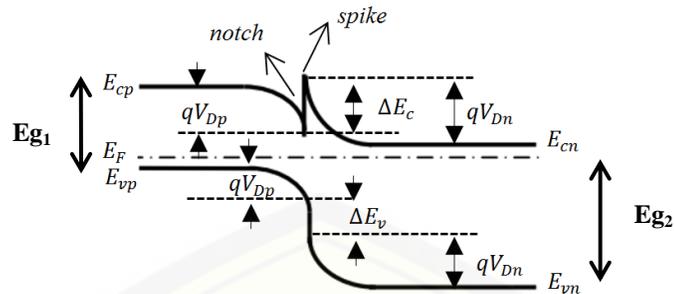
Struktur persambungan p-n dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu struktur p-n *homojunction* serta struktur p-n *heterojunction*. Struktur persambungan p-n *homojunction* merupakan persambungan dua material yang

sama dan memiliki pita energi yang sama pula. Struktur p-n *homojunction* dapat dijelaskan melalui konsep diagram pita energi pada gambar 2.3. Energi Fermi ( $E_f$ ) pada semikonduktor tipe-p dekat pada energi pita valensi ( $E_v$ ) sedangkan pada semikonduktor tipe-n dekat pada energi pita konduksi ( $E_c$ ). Hal ini berarti terdapat beda energi antara pita valensi ( $E_v$ ) dan pita konduksi ( $E_c$ ) pada semikonduktor tipe-p dengan pita valensi ( $E_v$ ) dan pita konduksi ( $E_c$ ) pada semikonduktor tipe-n. Perbedaan energi tersebut menimbulkan medan listrik ( $q\psi$ ) akibat beda potensial di antara persambungan. Medan listrik ( $q\psi$ ) akan menyebabkan terjadinya arus *drift* (Sutrisno, 1986).



Gambar 2.3 Diagram pita energi struktur p-n *homojunction* (Sumber: Sutrisno, 1986)

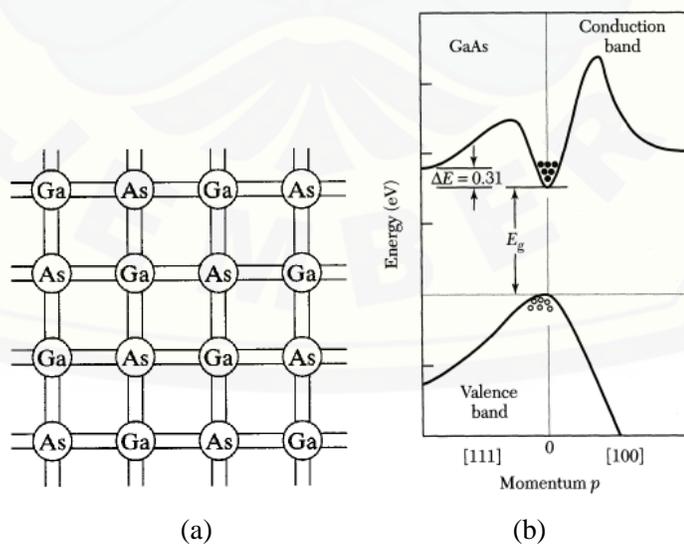
Struktur p-n *heterojunction* merupakan persambungan dua material yang berbeda dan memiliki pita energi yang berbeda pula. Bentuk diskontinuitas tergantung pada energi gap dari masing-masing bahan. Dua bahan dengan energi gap yang berbeda berpotensi akan membentuk sambungan yang tajam (Subekti, 2003). Struktur p-n *heterojunction* juga memiliki tipe konduksi yang berbeda. Properti dari p-n *heterojunction* secara umum sama dengan p-n *homojunction*, akan tetapi kedua energi gap yang disambungkan berbeda saat semikonduktor tipe-p dan semikonduktor tipe-n terhubung, maka terjadi difusi elektron dan *hole* menuju daerah yang berlawanan sampai menuju energi fermi seperti pada struktur p-n *homojunction*. Difusi membentuk area deplesi. *Spikes* dan *notch* merupakan lonjakan dan lekukan ke bawah yang diakibatkan persambungan dua bahan yang berbeda. *Spikes* dan *notch* hanya berada pada bagian pita konduksi kedua bahan (Fukuda, 1999). Pita energi p-n *heterojunction* ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Diagram pita energi struktur p-n *heterojunction*  $Eg_1$  = energi gap GaAs,  $Eg_2$  = energi gap AlGaAs,  $E_{cp}$  = energi pita konduksi hole,  $E_{cn}$  = energi pita konduksi elektron,  $\Delta E_c$  = selisih energi pita konduksi,  $E_{Fp}$  = energi fermi hole,  $E_{Fn}$  = energi fermi elektron,  $E_{vp}$  = energi pita valensi hole,  $E_{vn}$  = energi pita valensi elektron,  $qV_{Dp}$  = potensial diri hole,  $qV_{Dn}$  = potensial diri elektron dan  $E_F$  = energi fermi (Fukuda, 1999; Slimane *et al.*, 2013)

### 2.2.2 Galium Arsenida (GaAs) dan Aluminium Galium Arsenida (AlGaAs)

GaAs merupakan material semikonduktor paduan yang diperoleh dengan menggabungkan unsur golongan IIIA dengan VA. Model ikatan kimia GaAs terbentuk dengan proses meminjaman elektron. Unsur yang memiliki elektron valensi lebih tinggi akan meminjamkan elektron kepada unsur yang memiliki elektron valensi lebih rendah yang ditunjukkan gambar 2.5a (Pierret, 2002).

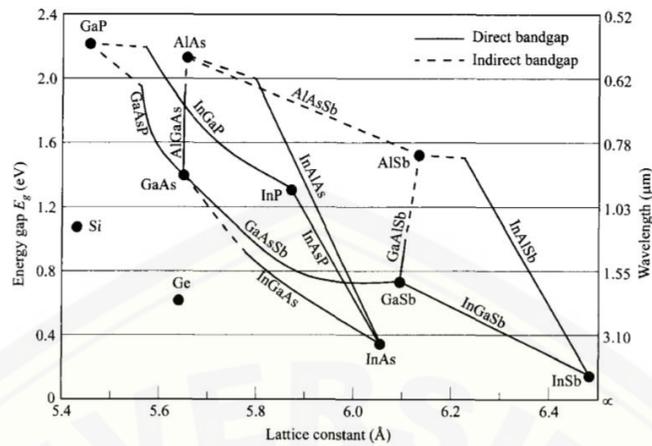


Gambar 2.5 (a) Struktur ikatan kovalen GaAs; (b) *Direct bandgap* GaAs (Sumber: Pierret, 2002)

Gambar 2.5 merupakan ikatan GaAs serta celah pita energinya. GaAs memiliki energi *bandgap* sebesar 1,42 eV. GaAs disebut juga dengan semikonduktor paduan murni meskipun bahan tersebut tersusun dari penggabungan dua jenis atom yang berbeda dari Ga dan As (Pierret, 2002). Gambar 2.5b menunjukkan transisi elektron dari pita valensi menuju pita konduksi dalam bahan GaAs. GaAs memiliki celah pita energi langsung (*direct bandgap*). *Direct bandgap* merupakan jenis pita energi dalam bahan semikonduktor dimana pada saat transisi elektron dari pita valensi menuju pita konduksi hanya membutuhkan energi, tidak membutuhkan momentum, sehingga proses transisi elektron akan semakin cepat (Sze dan Lee, 2007).

Jika terdapat dua jenis semikonduktor paduan yang digabungkan, maka akan terbentuk semikonduktor paduan baru. Parameter fisika dari semikonduktor paduan baru akan mendekati linear dengan proporsi komposisi alloy. Semikonduktor gabungan yang sering diaplikasikan untuk divais optoelektronik adalah Aluminium Galium Arsenida (AlGaAs) atau disebut dengan *ternary compound semiconductor*. AlGaAs dapat digunakan untuk sel surya dengan struktur persambungan *heterojunction* dengan bahan GaAs. AlGaAs merupakan material semikonduktor yang terdiri dari penggabungan AlAs (Aluminium Arsenida) dan GaAs (Galium Arsenida) (Fukuda, 1999).

AlGaAs memiliki nilai konstanta kisi yang hampir sama dengan GaAs, akan tetapi memiliki energi bandgap yang lebih besar dari GaAs. Energi bandgap untuk AlGaAs berbeda-beda tergantung pada indeks fraksi komposisi yang digunakan. AlGaAs memiliki indeks fraksi komposisi  $Al_xGa_{1-x}As$  dengan komposisi nilai  $x$  adalah  $0 \leq x \leq 1$ . Energi bandgap untuk AlGaAs dengan fraksi  $x=0,4$  sebesar 1,92 eV (Slimane, *et, al.*, 2013). Konstanta kisi merupakan parameter yang sangat penting pada p-n *heterojunction* yang disambungkan melalui proses penumbuhan lapisan (Sze, 1981; Subekti, 2003). Gambar 2.6 menunjukkan grafik antara energi bandgap dengan konstanta kisi untuk semikonduktor paduan yang digunakan pada divais optoelektronik. Gambar 2.6 juga menunjukkan konstanta kisi dari AlGaAs mendekati konstanta kisi dari GaAs.



Gambar 2.6 Hubungan antara energi *gap* dengan konstanta kisi beberapa bahan semikonduktor paduan (Sumber: Sze, 1981)

### 2.2.3 Transmisi dan Absorpsi

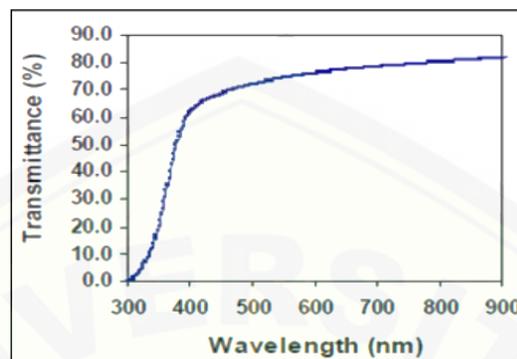
Transmisi dan absorpsi merupakan sifat optik dari suatu material yang ada kaitannya dengan interaksi antara material dengan gelombang elektromagnetik seperti cahaya, khususnya cahaya tampak. Spektrum transmisi cahaya menunjukkan fungsi transmisi terhadap panjang gelombang. Spektrum absorpsi cahaya menunjukkan fungsi koefisien absorpsi terhadap energi foton cahaya. Pengukuran sifat optik menggunakan gelombang elektromagnetik dari ultraviolet sampai inframerah. Parameternya adalah panjang gelombang ( $\lambda$ ), energi ( $h\nu$ ). Hubungan antara energi dan panjang gelombang adalah sebagai berikut:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (2.1)$$

E merupakan energi foton (joule), h merupakan konstanta planck yang besarnya  $6,63 \times 10^{-34}$  Js; c merupakan kecepatan cahaya dalam ruang hampa ( $3 \times 10^8$  m/s) dan  $\lambda$  adalah panjang gelombang cahaya (m) (Rasyidi, 2015).

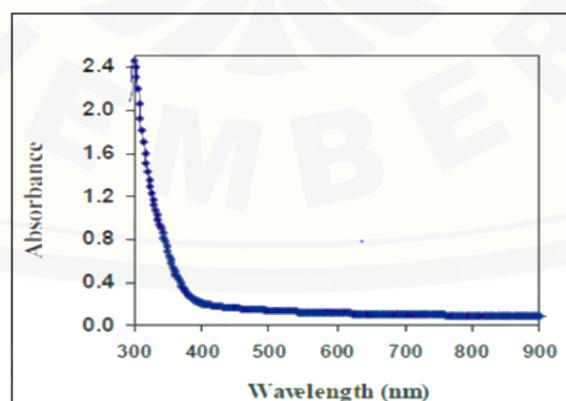
Transmisi merupakan perbandingan antara intensitas cahaya setelah dan sebelum melewati material semikonduktor. Nilai transmisi akan bergantung pada panjang gelombang foton datang yang mengenai divais sel surya. Besarnya tansmitansi dinyatakan dalam bentuk (%). Semakin besar panjang gelombang

foton datang yang mengenai maka presentase nilai transmitansinya semakin besar seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7 (Rasyidi, 2015).



Gambar 2.7 Grafik hubungan panjang gelombang dengan koefisien tranmitansi (Sumber: Rasyidi, 2015)

Pada bahan semikonduktor, kemampuan dalam menyerap radiasi disebut sebagai absorpsi dimana masing-masing bahan semikonduktor memiliki nilai koefisien absorpsi dengan rentang panjang gelombang yang berbeda-beda. Gambar 2.8 menunjukkan grafik hubungan koefisien absorpsi sebagai fungsi energi foton. Grafik tersebut menunjukkan bahwa koefisien absorpsi berhubungan dengan energi foton, karena ketika energi foton meningkat, puncak absorpsi mengalami pergeseran dan perluasan menuju energi yang lebih tinggi (Rasyidi, 2015).



Gambar 2.8 Grafik hubungan panjang gelombang dengan koefisien absorpsi (Sumber: Rasyidi, 2015)

## 2.3 Persamaan Dasar Divais Sel surya

### 2.3.1 Persamaan Poisson dan Persamaan Kontinuitas

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

$$\nabla \cdot \vec{E} = \nabla \cdot (-\nabla\psi) = -\nabla^2\psi = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (2.2)$$

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

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

sehingga persamaan Poisson menjadi :

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{q(p - n + N_D^+ - N_A^-)}{\epsilon} \quad (2.4)$$

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, serta  $\epsilon$  merupakan nilai permitivitas dari bahan.

Proses generasi, rekombinasi serta arus listrik yang diakibatkan oleh aliran elektron dan *hole* dapat ditentukan dengan persamaan kontinuitas. Persamaan kontinuitas untuk elektron dan *hole* dapat dituliskan sebagai berikut (Goetzeberger, 1998):

$$\frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_n = R - G \quad (2.5)$$

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

Keterangan:

$\vec{J}_p$  = rapat arus *hole* (A/cm<sup>2</sup>)

$\vec{J}_n$  = rapat arus elektron (A/cm<sup>2</sup>)

$G$  = Laju generasi (cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)

$R$  = Laju rekombinasi (cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)

### 2.3.2 Generasi dan Rekombinasi Sel Surya

Proses generasi bergantung jenis bahan yang digunakan serta temperatur di sekitar bahan. Proses generasi sel surya terjadi saat cahaya dengan panjang gelombang tertentu mengenai permukaan sel surya sehingga pasangan elektron-*hole* pada sel surya akan dihasilkan dengan laju generasi yang ditentukan melalui persamaan berikut (Usman, 2006; Fitriana, 2014):

$$G = \frac{F\alpha}{1 - P} (e^{-\alpha y} + P e^{\alpha y}) \quad (2.7)$$

Keterangan:

$G$  = Laju generasi (cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)

$F$  = Rapat fluks foton (cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)

$P$  = Koefisien transmisi cahaya

$\alpha$  = Koefisien absorpsi (cm<sup>-1</sup>)

$y$  = posisi dioda sel surya yang ditentukan dari tepi teratas tipe-p (μm)

Persamaan (2.7) memperlihatkan salah satu parameter fisis yang sangat berpengaruh pada laju generasi sel surya, yaitu rapat fluks foton. Rapat fluks foton merupakan banyaknya foton yang mengenai permukaan depan sel surya per cm<sup>2</sup> per detik. Rapat fluks foton dapat ditentukan dengan persamaan berikut (Liou dan Wong (1992):

$$F = C (19,7\lambda - 4,7) \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \text{ untuk } 0,24 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 0,4 \mu\text{m} \quad (2.8)$$

$$F = C (-2,5\lambda + 5,7) \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \text{ untuk } \lambda \geq 0,48 \mu\text{m} \quad (2.9)$$

C adalah konsentrasi fluks sinar matahari yang bernilai 1. Rapat fluks foton berdasarkan persamaan (2.8) dan (2.9) bergantung pada panjang gelombang foton yang diterima oleh permukaan sel surya tersebut (Liou dan Wong, 2002).

Menurut Puri dan Babbar (2001), Proses rekombinasi terjadi karena elektron pada pita konduksi melakukan transisi menuju pita valensi, sehingga menghilangkan *hole* pada pita valensi dan elektron pada pita konduksi. Terdapat beberapa perumusan untuk menentukan laju rekombinasi, bergantung pada jenis transisinya. Sel surya persambungan p-n *heterojunction* GaAs/AlGaAs memiliki pita energi langsung (*direct bandgap*), sehingga laju rekombinasi untuk material berjenis *direct bandgap* dapat ditentukan dengan persamaan *Direct Recombination* ( $R^{DIR}$ ) sebagai berikut (Palankovski, 2000):

$$R^{DIR} = C^{DIR}(pn - n_i^2) \quad (2.10)$$

Keterangan:

$R^{DIR}$  = laju *direct recombination* ( $\text{cm}^{-2}/\text{s}$ )

$C^{DIR}$  = konstanta *direct recombination* GaAs ( $1,0 \times 10^{-10} \text{cm}^{-2}/\text{s}$ )

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

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

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

### 2.3.3 Transport Pembawa Muatan dalam Semikonduktor

Peristiwa pergerakan partikel pembawa muatan elektron dan *hole* pada bahan semikonduktor disebut dengan transportasi. Mekanisme transportasi oleh partikel pembawa muatan terdiri dari dua jenis yaitu difusi dan *drift* (Subekti, 2003). Arus difusi terjadi disebabkan oleh karena adanya perbedaan konsentrasi pembawa muatan di dalam sebuah bahan. Mengalirnya arus difusi akan mengakibatkan pembentukan daerah deplesi di daerah persambungan lapisan p dan lapisan n, sehingga medan listrik yang muncul akan memicu terbentuknya arus *drift*. Persamaan *drift-difusi hole* dan elektron ideal digunakan pada persamaan divais semikonduktor yang ditunjukkan pada persamaan (2.13).

$$\vec{J}_p = -qp\mu_p\nabla\Psi - qD_p\vec{\nabla}p \quad (2.11)$$

$$\vec{J}_n = -qn\mu_n\nabla\Psi + qD_n\vec{\nabla}n \quad (2.12)$$

$$\vec{J}_{total} = \vec{J}_p + \vec{J}_n \quad (2.13)$$

$$D_{n(p)} = \frac{\mu_{n(p)}k_bT}{q} \quad (2.14)$$

Keterangan:

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

$D_p$  = konstanta difusi hole ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

$D_n$  = konstanta difusi elektron ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

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

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

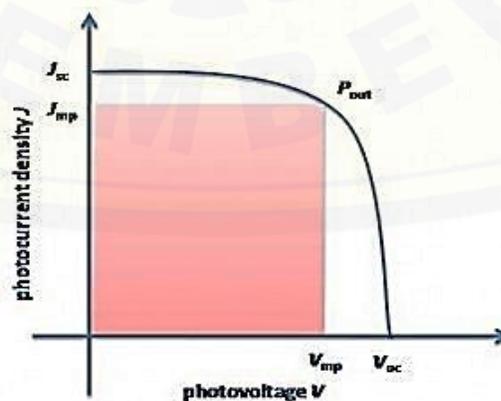
$\mu_p$  = mobilitas hole ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )

$\mu_n$  = mobilitas elektron ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )

$k_b = 1,38 \times 10^{-23}$  J/K

### 2.3.4 Karakteristik Rapat Arus-Tegangan Sel Surya

Karakteristik dari sel surya dapat digambarkan melalui sebuah grafik hubungan antara arus dan tegangan yang dihasilkan sel surya pada kondisi cahaya yang berbeda. Grafik rapat arus-tegangan dapat menggambarkan sifat dari sel surya yang diperlihatkan pada Gambar 2.9 (Satwiko, 2012).



Gambar 2.9. Kurva karakteristik rapat arus-tegangan sel surya (Sumber: Satwiko, 2012)

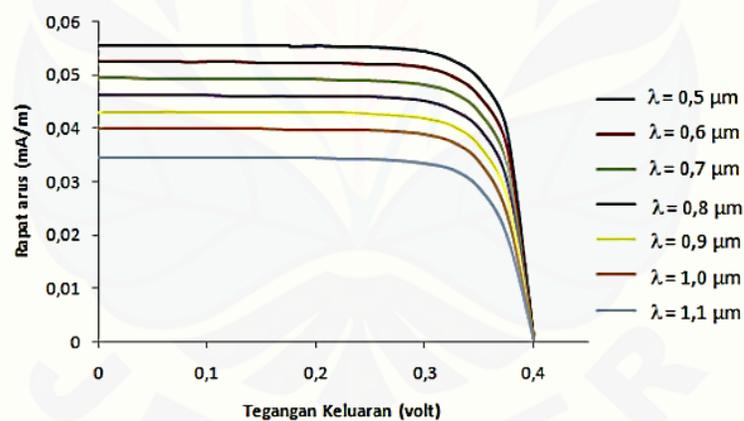
Satwiko (2012) juga mengatakan bahwa beberapa parameter yang digunakan untuk menentukan karakteristik dari sel surya adalah arus hubung singkat atau *short current density* ( $J_{sc}$ ), yang merupakan arus keluaran maksimum dari sel surya, dan tegangan rangkaian terbuka atau *open circuit voltage* ( $V_{oc}$ ), yang merupakan kapasitas tegangan maksimum saat tidak ada arus. Adapun  $J_{mp}$  dan  $V_{mp}$  masing-masing merupakan rapat arus dan tegangan keluar yang dihasilkan oleh bahan/divais saat daya keluaran bernilai maksimum. Adapun luasan persegi panjang yang melewati titik ( $J_{mp}, V_{mp}$ ), yang ditunjukkan oleh daerah arsir pada Gambar 2.9 akan bernilai maksimum pula.

#### **2.4 Pengaruh Spektrum Cahaya Tampak terhadap Karakteristik $J$ - $V$ Sel Surya**

Arus listrik pada sel surya dapat terbentuk karena adanya aliran elektron dan *hole* yang merupakan pembawa muatan dalam sel surya. Laju generasi menentukan banyaknya pasangan elektron dan *hole* yang terbentuk dalam divais sel surya sehingga perlu adanya simulasi pengaruh panjang gelombang foton datang terhadap laju generasi (Fitriana, 2014). Liou dan Wong (1992) melakukan penelitian mengenai perbandingan kinerja bahan semikonduktor Silikon dan Galium Arsenida dengan menggunakan metode analitik. Pada penelitian ini dijelaskan bahwa besarnya nilai panjang gelombang akan mempengaruhi nilai koefisien absorpsi yang digunakan. Nilai rentang panjang gelombang pada Silikon berada pada kisaran 0,5  $\mu\text{m}$  sampai dengan 1,1  $\mu\text{m}$  dan nilai rentang panjang gelombang pada Galium Arsenida berada pada kisaran 0,8  $\mu\text{m}$  sampai dengan 0,88  $\mu\text{m}$ .

Pada penelitian yang dilakukan oleh Liou dan Wong (1992), panjang gelombang optimum pada bahan Si terletak pada 1,1  $\mu\text{m}$  dengan nilai  $V_{oc}$  sebesar 0,62 V dan  $J_{sc}$  sebesar 35,9  $\text{mA}/\text{cm}^2$ , panjang gelombang optimum yang dapat diserap GaAs adalah 0,88  $\mu\text{m}$  dengan nilai  $V_{oc}$  sebesar 1,09 V dan  $J_{sc}$  sebesar 28,1  $\text{mA}/\text{cm}^2$ . Penelitian mengenai pengaruh panjang gelombang foton datang terhadap kinerja sel surya juga dilakukan oleh Fitriana (2014) dengan menggunakan

Silikon. Panjang gelombang foton yang digunakan sama dengan yang dilakukan oleh Liou dan Wong (1992) yaitu pada rentang  $0,5 \mu\text{m}$  sampai dengan  $1,1 \mu\text{m}$ . Pada penelitian ini dijelaskan bahwa terjadi penurunan  $J_{sc}$  (Rapat arus hubung singkat) ketika panjang gelombang foton datang yang mengenai sel surya semakin besar. Hal tersebut disebabkan adanya penurunan laju generasi sel surya ketika panjang gelombang foton datang semakin besar. Foton dengan panjang gelombang yang semakin kecil ini membuat energi yang diterima oleh sel surya semakin mengecil. Energi yang kecil ini menyebabkan mengecilnya laju generasi atau hanya sedikit elektron dan *hole* yang terlepas dari ikatan kovalennya, sehingga hanya sedikit pasangan elektron-*hole* yang terbentuk. Pasangan elektron-*hole* ini kemudian akan mengalir menjadi arus listrik sehingga semakin kecil pasangan elektron-*hole* yang terbentuk maka arus yang terbentuk juga semakin mengecil. Gambar 2.10 menunjukkan kurva karakteristik  $J$ - $V$  yang dilakukan oleh Fitriana (2014).



Gambar 2.10 Kurva karakteristik  $J$ - $V$  silikon dengan variasi panjang gelombang foton datang (Sumber: Fitriana, 2014)

Simulasi yang dilakukan Fitriana (2014) juga memperlihatkan bahwa panjang gelombang foton datang tidak mempengaruhi nilai  $V_{oc}$  (tegangan hubung terbuka). Nilai  $V_{oc}$  yang didapatkan selalu 0,4 volt meskipun panjang gelombang foton datang divariasikan dari  $0,5 \mu\text{m}$  sampai dengan  $1,1 \mu\text{m}$ . Nilai  $V_{oc}$  berhubungan erat dengan besarnya celah pita energi ( $E_g$ ) material semikonduktor suatu sel surya

sehingga material semikonduktor yang memiliki  $E_g$  berbeda akan menghasilkan  $V_{oc}$  yang berbeda pula (Rusdiana, 2012).

## 2.5 Analisa Numerik Metode Elemen Hingga

Simulasi dari sebuah divais elektronika dilakukan sebagai upaya menentukan solusi numerik dari sejumlah persamaan matematis yang menghubungkan sifat bahan dan mekanisme operasional divais tersebut. Salah satu metode numerik yang digunakan adalah metode elemen hingga. Metode elemen hingga diperkenalkan oleh Clough pada tahun 1960 dengan mengubah daerah domain sel surya menjadi segitiga atau segiempat yang sangat kecil (Handayanu, 2012). Metode elemen hingga digunakan untuk mengatasi permasalahan nilai batas dengan membagi geometri bahan menjadi elemen-elemen kecil menggunakan pendekatan persamaan differensial (Polycarpou, 2006). Di dalam penelitian ini, metode elemen hingga juga digunakan untuk mendapatkan pemodelan distribusi pembawa muatan. Pendekatan persamaan differensial dilakukan dengan mengasumsikan bahwa setiap elemen memiliki solusi berupa fungsi sederhana tertentu, dimana fungsi kontinu akan diubah menjadi fungsi diskrit, kemudian didapatkan solusi umum dari bahan yang merupakan penggabungan dari solusi masing-masing elemen. Semakin kecil ukuran elemen maka solusi yang didapatkan akan semakin akurat (Usman, 2006; Fitriana, 2014; Alviati, 2015).

Geometri pada simulasi divais semikonduktor, berupa struktur persambungan p-n *heterojunction*, akan dibagi menjadi elemen segitiga-segitiga kecil atau segiempat bergantung terhadap tingkat kesulitan dari material yang dimodelkan dengan menggunakan beberapa variabel tertentu. Untuk struktur geometri yang rumit, biasanya digunakan pembagian menjadi bentuk segitiga seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11 (Daniellson, 2000; Usman, 2006;).

Menurut Daniellson (2000) variabel yang digunakan pada simulasi divais semikonduktor yaitu  $\Psi$ ,  $p$  dan  $n$ . Solusi umum masing-masing variabel tersebut jika diselesaikan dengan menggunakan metode elemen hingga adalah sebagai berikut:

$$\Psi = \sum_{j=1}^a \Psi_j \quad (2.15)$$

$$p = \sum_{j=1}^a p_j \quad (2.16)$$

$$n = \sum_{j=1}^a n_j \quad (2.17)$$

Variabel  $\Psi$ ,  $p$  dan  $n$  berhubungan dengan tingkat quasi-Fermi pembawa muatan yang dituliskan dalam persamaan berikut:

$$p = n_i e^{-\Psi v} \quad (2.18)$$

$$n = n_i e^{\Psi u} \quad (2.19)$$

Keterangan:

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

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

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

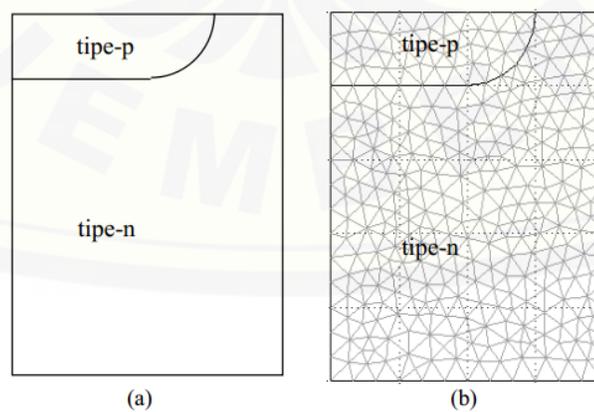
$\Psi$  = potensial elektrostatik (volt)

$a$  = jumlah elemen

$j$  = elemen batas

$v$  = variabel bebas *hole*

$u$  = variabel bebas elektron

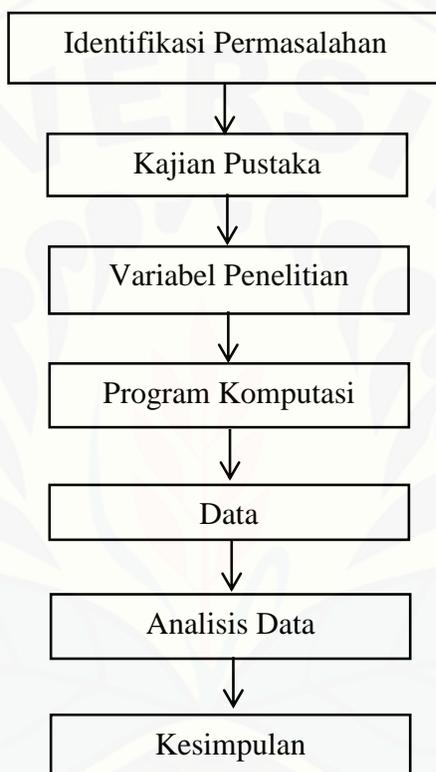


Gambar 2.11 (a) Geometri dioda persambungan p-n dalam bentuk 2D; (b) Pendefinisian geometri dioda persambungan p-n menjadi elemen-elemen kecil (Sumber: Daniellson, 2000)

### BAB 3. METODE PENELITIAN

#### 3.1 Rancangan Kegiatan Penelitian

Secara garis besar, skema dari rancangan kegiatan penelitian ditampilkan dalam bentuk diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir rancangan kegiatan penelitian

Kegiatan penelitian diawali dengan melakukan identifikasi terhadap permasalahan yang akan diselesaikan, terkait dengan karakteristik kelistrikan sel surya berbasis Galium Arsenida, di bawah variasi beberapa spektrum cahaya tampak. Berdasarkan hasil kajian pustaka, diperoleh bahwasanya karakteristik kelistrikan dari divais sel surya dapat ditunjukkan melalui hasil penggambaran distribusi pembawa muatan dan grafik karakteristik rapat arus-tegangan yang dihitung dari distribusi pembawa muatan. Beberapa variabel penelitian diidentifikasi untuk disimulasikan menggunakan program komputer. Dalam hal

ini digunakan PC Laptop Lenovo B490, dengan spesifikasi processor intel (R) Core (TM) i3-3110M CPU @2,40 GHz 2,40 GHz RAM 2.00 GB, dengan sistem 32-bit. Setelah data diperoleh, dilakukan analisis data untuk dibahas dan dikaji sesuai dengan permasalahan yang ingin diselesaikan. Hasil analisis selanjutnya dijadikan acuan untuk membuat kesimpulan.

## **3.2 Jenis dan Sumber Data Penelitian**

### **3.2.1 Jenis Penelitian**

Penelitian yang dilakukan berupa kegiatan simulasi untuk menginvestigasi pengaruh variasi spektrum cahaya tampak terhadap karakteristik rapat arus-tegangan sel surya berbasis Galium Arsenida menggunakan metode elemen hingga. Penelitian bersifat kuantitatif dimana data yang diperoleh berasal dari hasil perhitungan numerik.

### **3.2.2 Sumber Data Penelitian**

Data yang digunakan untuk menginvestigasi pengaruh variasi spektrum cahaya tampak terhadap karakteristik rapat arus-tegangan sel surya berbasis Galium Arsenida menggunakan metode elemen hingga merupakan data sekunder. Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan hasil simulasi dan eksperimen yang sudah dilakukan oleh Liou dan Wong (1992), Slimane et al. (2013), Fitriana (2014), serta beberapa referensi dari buku dan internet. Rincian data yang digunakan tertera pada Tabel 3.1.

## **3.3 Variabel Penelitian dan Skala Pengukuran**

### **3.3.1 Variabel Penelitian**

Terdapat tiga macam variabel yang digunakan dalam kegiatan penelitian ini, yaitu variabel bebas, variabel terikat dan variabel kontrol. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah nilai dari spektrum cahaya tampak, yang berupa variasi data panjang gelombang, dan tegangan *input* bagi divais sel surya yang dimodelkan. Dalam eksperimen, tegangan ini merupakan tegangan *output* dari hasil karakterisasi *J-V*. Adapun variabel terikat yang nilainya dipengaruhi oleh kedua

variabel bebas di atas berupa konsentrasi pembawa muatan dan rapat arus listrik dalam bahan. Beberapa data yang menjadi kendali dalam simulasi, dijadikan sebagai variabel kontrol yang bernilai konstan dan ditunjukkan pada Tabel 3.1.

### 3.3.2 Skala Perhitungan

Skala perhitungan yang digunakan dalam penelitian ini adalah skala pengukuran ordinal, 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 yang dikenai spektrum cahaya tampak, dengan panjang gelombang mulai dari 0,50  $\mu\text{m}$  sampai dengan 0,80  $\mu\text{m}$  dengan interval 0,050  $\mu\text{m}$ . Hasil perhitungan berupa data konsentrasi pembawa muatan dan kurva rapat-arus tegangan yang diperoleh akan diurutkan berdasarkan nilai paling kecil ke nilai paling besar.

## 3.4 Kerangka Pemecahan Masalah

### 3.4.1 Identifikasi Permasalahan dan Kajian Pustaka

Identifikasi permasalahan merupakan hal pertama yang dilakukan dalam kegiatan penelitian ini. Identifikasi permasalahan dilakukan mulai bulan mei 2017 sampai dengan juli 2017. Permasalahan yang didapatkan adalah bagaimana upaya untuk membuat divais sel surya yang menghasilkan rapat arus hubung singkat serta tegangan keluaran yang dihasilkan cukup besar. Permasalahan yang didapatkan akan diidentifikasi melalui kegiatan simulasi. Kegiatan simulasi dipilih atas pertimbangan menganalisis beberapa sifat yang dihasilkan oleh divais sel surya dari hasil eksperimen, setelahnya akan dikaji sifat mana yang dapat dioptimasi untuk memperoleh karakteristik divais sel surya yang mendekati hasil eksperimen yang menjadi acuan. Berangkat dari permasalahan yang didapatkan maka selanjutnya akan dilakukan kajian pustaka dari berbagai macam literatur untuk mendapatkan informasi mengenai fenomena fisis yang terjadi pada divais sel surya yang akan diteliti. Fenomena fisis yang dimaksudkan adalah sifat-sifat bahan pembuat divais sel surya, struktur divais dan karakteristik setiap lapisan

divais sel surya yang nantinya akan diterapkan dalam perumusan matematis. Hasil yang didapatkan dari kajian pustaka dapat menjadi acuan untuk menganalisis dalam menentukan karakteristik bahan yang akan diteliti. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Galium Arsenida dan Aluminium Galium Arsenida dengan indeks fraksi komposisi  $x$  pada konstanta kisi  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sebesar 0,4. Parameter input yang digunakan berupa nilai dari rentang spektrum gelombang elektromagnetik dari  $0,50 \mu\text{m}$  sampai dengan  $0,80 \mu\text{m}$  dengan interval  $0,050 \mu\text{m}$ , sehingga didapatkan karakteristik rapat arus dan tegangan yang terbaik.

#### 3.4.2 Program Komputasi

Simulasi yang dilakukan berupa program komputasi menggunakan software FEMLAB dan MATLAB untuk mendapatkan grafik distribusi pembawa muatan dan karakteristik rapat arus-tegangan sel surya berbasis Galium Arsenida dengan variasi spektrum cahaya tampak menggunakan metode elemen hingga dalam bentuk dua dimensi. Langkah awal yang dilakukan adalah memasukkan fungsi dopan dan parameter-parameter dari bahan GaAs dan AlGaAs, kemudian dilakukan penggambaran geometri divais sel surya struktur p-n *heterojunction* GaAs/AlGaAs pada software FEMLAB seperti pada Gambar 3.2. Langkah selanjutnya adalah mengatur kondisi batas dan dilanjutkan dengan penyelesaian persamaan Poisson dan Kontinuitas untuk bahan GaAs/AlGaAs p-n *heterojunction* sehingga diperoleh distribusi konsentrasi pembawa muatan. Distribusi konsentrasi pembawa muatan yang didapatkan selanjutnya divariasi tegangan keluarannya dengan interval  $0,0250$  volt dari  $0$  volt sampai  $0,475$  volt untuk diamati konsentrasi pembawa muatan elektron dan hole dari lapisan p menuju lapisan n, akan tetapi variasi yang diamati hanya pada  $0$  volt,  $0,100$  volt,  $0,250$  volt,  $0,400$  volt,  $0,450$  volt dan  $0,475$  volt. Variasi yang diamati hanya pada tegangan keluaran yang berpengaruh pada rapat arus yang dihasilkan. Distribusi konsentrasi pembawa muatan yang didapatkan selanjutnya akan digunakan untuk memperoleh kurva karakteristik rapat arus dan tegangan yang akan dianalisis dan dibandingkan dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Slimane et al. (2013) dan Fitriana (2014). Alur simulasi untuk menentukan distribusi pembawa muatan



Batas 2 (anoda) dan 5 (katoda) merupakan batas kontak dioda dengan logam sedangkan batas 4 dan 9 merupakan daerah persambungan GaAs tipe-p dengan AlGaAs tipe-n. Batas 3 dan 6 merupakan daerah dari lapisan tipe-p. Batas 1,7 dan 8 merupakan daerah lapisan tipe-n. Kemudian geometri sel surya dibagi-bagi menjadi daerah yang lebih kecil (*mesh*) berbentuk segitiga. Hal ini dikarenakan metode yang digunakan adalah metode elemen hingga. Daerah batas kontak dioda dengan logam (2 dan 5) dan batas persambungan tipe-p dan tipe-n dibuat lebih kecil (rapat) ukuran *mesh*-nya agar hasil yang didapatkan lebih akurat. Nilai *mesh* yang digunakan pada pemodelan sel surya adalah 0,005.

b. Parameter input sel surya struktur p-n *heterojunction* GaAs/AlGaAs

Parameter input yang digunakan dalam simulasi pengaruh spektrum gelombang elektromagnetik terhadap karakteristik rapat arus-tegangan sel surya berbasis Galium Arsenida menggunakan karakteristik dari bahan semikonduktor Galium Arsenida dan Aluminium Galium Arsenida. Parameter input yang digunakan juga diambil dari berbagai referensi baik dari eksperimen maupun simulasi yang telah dilakukan sebelumnya. Parameter input yang berupa konstanta fisika tertera pada Tabel 3.1.

Dalam penggunaan parameter input di dalam aplikasi haruslah berurutan sesuai dengan prosedur. Hal ini akan berpengaruh pada profil distribusi pembawa muatan dan kurva karakteristik rapat arus-tegangan yang akan dicari. Untuk parameter koefisien transmitansi cahaya ( $P$ ) diambil dari penelitian yang telah dilakukan oleh Jellison (1992) dengan variasi nilai transmisi. Selain itu pada kegiatan simulasi yang akan dilakukan, metode elemen hingga tidak boleh mengandung satuan, sehingga menyebabkan beberapa ekspresi dari parameter tidak ekuivalen.

Parameter input yang perlu disesuaikan meliputi jarak ( $x, y$ ), potensial listrik ( $\Psi$ ), konsentrasi pembawa muatan ( $n, p$ ), konstanta difusi pembawa muatan ( $D_n, D_p$ ) dan mobilitas pembawa muatan ( $\mu_n, \mu_p$ ). Penyesuaian yang diperlukan untuk beberapa parameter input ditunjukkan pada Tabel 3.2 yang merupakan faktor skala parameter input, dengan menggunakan suatu faktor skala, sehingga

diperoleh bentuk parameter ekuivalen yang akan diaplikasikan di dalam parameter input. Pada kegiatan simulasi yang dilakukan, satuan yang digunakan merujuk pada geometri bahan divais sel surya. Arah foton yang mengenai pada divais yang ditunjukkan dengan geometri 2D, diasumsikan hanya bekerja pada sumbu Y, sehingga satuan yang digunakan pada hasil simulasi ini adalah satuan untuk satu dimensi.

Tabel 3.1. Parameter Input Simulasi

Parameter	Nilai
Muatan elektron ( $q$ )**	$1,602 \times 10^{-19}$ C
Permitivitas vakum ( $\epsilon_0$ )**	$8,85 \times 10^{-14}$ F/cm
Temperatur ( $T$ )**	300 K
Konstanta Boltzman ( $K$ )**	$1,38 \times 10^{-23}$ J/K
Energi Gap ( $E_g$ ) GaAs*	1,42 eV
Energi Gap ( $E_g$ ) AlGaAs*	1,92 eV
Permitivitas bahan GaAs ( $\epsilon_{rGaAs}$ )*	13.1 F/cm
Permitivitas bahan AlGaAs ( $\epsilon_{rAlGaAs}$ ) *	11.8 F/cm
Koefisien rekombinasi GaAs ( $C_{dir}$ )***	$1 \times 10^{-10}$ cm <sup>-1</sup>
Koefisien rekombinasi AlGaAs ( $C_{dir}$ )***	$1,8 \times 10^{-10}$ cm <sup>-1</sup>
Mobilitas elektron ( $\mu_n$ ) GaAs *	8500 cm/Vs
Mobilitas hole ( $\mu_p$ ) GaAs*	400 cm/Vs
Mobilitas elektron ( $\mu_n$ ) AlGaAs *	800 cm/Vs
Mobilitas hole ( $\mu_p$ ) AlGaAs*	100 cm/Vs
Koefisien difusi elektron ( $D_n$ ) GaAs*	200 cm/s
Koefisien difusi hole ( $D_p$ ) GaAs*	10 cm/s
Koefisien difusi elektron ( $D_n$ ) AlGaAs*	40 cm/s
Koefisien difusi hole ( $D_p$ ) AlGaAs*	2,19 cm/s

Sumber: \*Slimane et al. (2013)

\*\*\* Palankovski (2000)

\*\*Daniellson (2000)

Tabel 3.2. Faktor Skala Parameter Input

Parameter	Faktor skala	Parameter ekuivalen
Jarak ( $x, y$ )	$x_0 = 10^{-3}$ cm	$x_1x_0, y_1y_0$
Potensial ( $\Psi$ )	$\Psi_0 = \frac{kT}{q}$	$\frac{\Psi}{\Psi_0}$
Konsentrasi pembawa muatan ( $n, p$ )	$C_0 = \max( n ,  p )$	$\frac{n}{C_0}, \frac{p}{C_0}$
Difusivitas pembawa muatan ( $D_n, D_p$ )	$D_0 = \max( D_n ,  D_p )$	$\frac{D_n}{D_0}, \frac{D_p}{D_0}$
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: Daniellson (2000)

c. Pengaturan Kondisi Batas

Menurut Daniellson (2000), terdapat dua jenis syarat batas di dalam menggambarkan mekanisme transport dari pembawa muatan di dalam suatu material, yaitu syarat batas Neumann dan syarat batas Dirichlet. Syarat batas Neumann menjelaskan permukaan yang tidak berkontak dengan logam. Pada geometri sel surya p-n *heterojunction* GaAs/AlGaAs syarat batas Neumann berlaku pada daerah batas 1, 3, 4, 6, 7, 8 dan 9. Bentuk syarat batas Neumann dapat dituliskan pada persamaan (3.1)

$$\hat{n} \cdot \vec{E} = 0; \hat{n} \cdot \vec{J}_n = 0; \hat{n} \cdot \vec{J}_p = 0 \tag{3.1}$$

Syarat batas Dirichlet digunakan untuk menentukan besarnya potensial dan konsentrasi pembawa muatan. Syarat batas ini menjelaskan hubungan batas kontak dengan konduktor atau logam (kondisi batas 2 dan 5). Pada permukaan yang berhubungan dengan logam, potensial elektrostatik ( $\Psi$ ) bernilai konstan dan laju rekombinasi bernilai tak berhingga. Syarat batas Dirichlet melibatkan konsentrasi dopan ( $N$ ) dan tegangan luar yang diberikan ( $V_a$ ), sehingga syarat batas Dirichlet ditentukan dengan persamaan (3.2), (3.3) dan (3.4) (Daniellson, 2000).

$$\psi = V_A + \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{\frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2}}{n_i} \right) \quad (3.2)$$

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

$$p = -\frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2} \quad (3.4)$$

Besar N pada persamaan (3.2), (3.3) dan (3.4) merupakan fungsi konsentrasi dopan (*fldoping*) yang dirumuskan dalam persamaan (3.5) berikut:

$$N = ND_n + ND_{nmax} e^{-\left(\frac{y+y_1}{ch}\right)^2} - NA_{pmax} e^{-\left(\frac{y}{ch}\right)^2} ((x < ac) + (x \geq ac)) e^{-\left(\frac{x-ac}{ch}\right)^2} \quad (3.5)$$

dengan besaran *ch* pada persamaan (3.5) ditentukan dengan persamaan berikut:

$$ch = \frac{ju}{\sqrt{\log(NA_{pmax}/ND_n)}} \quad (3.6)$$

Keterangan:

$ND_n$  = konsentrasi donor pada daerah tipe-n =  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-1}$

$ND_{nmax}$  = konsentrasi donor tertinggi pada daerah tipe-n =  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-1}$

$NA_{pmax}$  = konsentrasi akseptor tertinggi pada daerah tipe-p =  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-1}$

$ac$  = panjang batas 5 pada geometri divais =  $0,2 \text{ } \mu\text{m}$

$ju$  = panjang batas 6 pada geometri divais =  $0,1 \text{ } \mu\text{m}$

$y_1$  = ketebalan geometri divais =  $0,7 \text{ } \mu\text{m}$

Syarat batas juga dimasukkan dalam parameter input. Parameter input dari syarat batas Neumann dan Dirichlet disimbolkan dengan *nsa* dan *nsc*. Pengaturan kondisi batas tertera pada Tabel 3.3. Fungsi *fldoping* merupakan fungsi dopan yang digunakan serta *sqrt* merupakan istilah yang dipakai untuk merumuskan tanda operasi akar. Terdapat 3 input utama dalam fungsi ini, masing-masing input

mewakili 2 data posisi dan 1 data konstanta C0. Fldoping(0,0,C0) diterapkan pada daerah batas 5, sedangkan fldoping(0,-y1,C0) diterapkan pada daerah batas 2.

Tabel 3.3. Parameter Input Pengaturan Kondisi Batas

Parameter	Keterangan	Nilai
nsa	skala kondisi batas GaAs	$(fldoping(0,0,C0))/2+\sqrt{((fldoping(0,0,C0))^2/4+ni^2)}$
nsc	skala kondisi batas AlGaAs	$(fldoping(0,-y1,C0))/2+\sqrt{((fldoping(0,-y1,C0))^2/4+ni^2)}$

Sumber: Daniellson (2000)

d. Persamaan Poisson dan Kontinuitas

Solusi persamaan differensial yang diselesaikan merupakan persamaan dasar bahan semikonduktor yaitu persamaan Poisson dan persamaan kontinuitas. Persamaan Poisson merupakan dasar pendekatan karakteristik sumber pembawa muatan dalam dioda sel surya, dimana parameter konsentrasi pembawa muatan dihubungkan dengan beda potensial yang terbentuk. Persamaan Poisson yang digunakan seperti yang dinyatakan pada persamaan (2.4). Subtitusikan persamaan (2.18) dan (2.19) ke dalam persamaan (2.4), sehingga diperoleh persamaan berikut (Daniellson, 2000):

$$\Delta\Psi = \frac{q}{\varepsilon} (n_i(e^{\Psi}u - e^{-\Psi}v) - N_D^+ + N_A^-) \tag{3.7}$$

dengan  $\Delta\Psi = \nabla \cdot \nabla\Psi = \nabla \cdot E$ , yang mendefinisikan operasi Laplacian terhadap variabel  $\Psi$ . Persambungan yang digunakan dalam penelitian adalah *heterojunction*, sehingga energi *bandgap* dari masing-masing bahan diperhitungkan pada nilai konsentrasi intrinsiknya ( $n_i$ ) yang ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{E_g}{kT} \right] \tag{3.8}$$

$N_c$  merupakan konsentrasi pada pita konduksi, sedangkan  $N_v$  merupakan konsentrasi pada pita valensi. Nilai  $N_c$  dan  $N_v$  antara GaAs dan AlGaAs berbeda,

begitu pula dengan energi *bandgap*-nya ( $E_g$ ). Nilai  $N_c$  dan  $N_v$  untuk GaAs berturut-turut sebesar  $4,70 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  dan  $7,50 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , sedangkan Nilai  $N_c$  dan  $N_v$  untuk AlGaAs berturut-turut sebesar  $4,82 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  dan  $1,73 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Geometri yang dimodelkan pada penelitian ini terdiri dari dua domain. Subdomain yang pertama adalah semikonduktor tipe-n dan subdomain kedua adalah semikonduktor tipe-p seperti yang tertera pada Gambar 3.2. Pada subdomain tipe-p dan tipe-n berlaku persamaan kontinuitas (2.5) dan (2.6). Aliran elektron dan *hole* yang berkontribusi terhadap perubahan arus difusi dipengaruhi oleh laju rekombinasi dan generasi. Dengan mensubstitusikan persamaan (2.7) dan persamaan (2.10). Tingkat quasi-Fermi pembawa muatan dijelaskan pada persamaan (2.18) dan (2.19), sehingga persamaan kontinuitas (2.5) dan (2.6) menjadi

$$\nabla \cdot \vec{J}_n = (C^{DIR})n_i(uv - 1) - \frac{F\alpha}{1-P}(e^{-\alpha y} + Pe^{\alpha y}) \quad (3.9)$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_p = \frac{F\alpha}{1-P}(e^{-\alpha y} + Pe^{\alpha y}) - (C^{DIR})n_i(uv - 1) \quad (3.10)$$

Variasi spektrum cahaya tampak pada penelitian ini adalah 0,5  $\mu\text{m}$  sampai dengan 0,8  $\mu\text{m}$  merujuk pada penelitian Jiellson (1992) dan Fitriana (2014). Persamaan fluks foton yang dipakai adalah persamaan (2.9) yang disubstitusikan pada persamaan (3.11) dan (3.12) sehingga persamaan kontinuitasnya menjadi:

$$\nabla \cdot \vec{J}_n = (C^{DIR})n_i(uv - 1) - \frac{\alpha C(-2,5\lambda+5,7) \times 10^{15}}{1-P}(e^{-\alpha y} + Pe^{\alpha y}) \quad (3.11)$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_p = \frac{\alpha C(-2,5\lambda+5,7) \times 10^{15}}{1-P}(e^{-\alpha y} + Pe^{\alpha y}) - (C^{DIR})n_i(uv - 1) \quad (3.12)$$

e. Kurva karakteristik rapat arus-tegangan ( $J$ - $V$ )

Pembuatan kurva karakteristik rapat arus-tegangan ( $J$ - $V$ ) dilakukan dengan mengaplikasikan tegangan yang akan digunakan untuk mengkarakterisasi besarnya rapat arus yang mengalir. Setiap variasi tegangan akan menghasilkan nilai rapat arus yang berbeda. Pada sel surya persambungan p-n, tidak ada medan

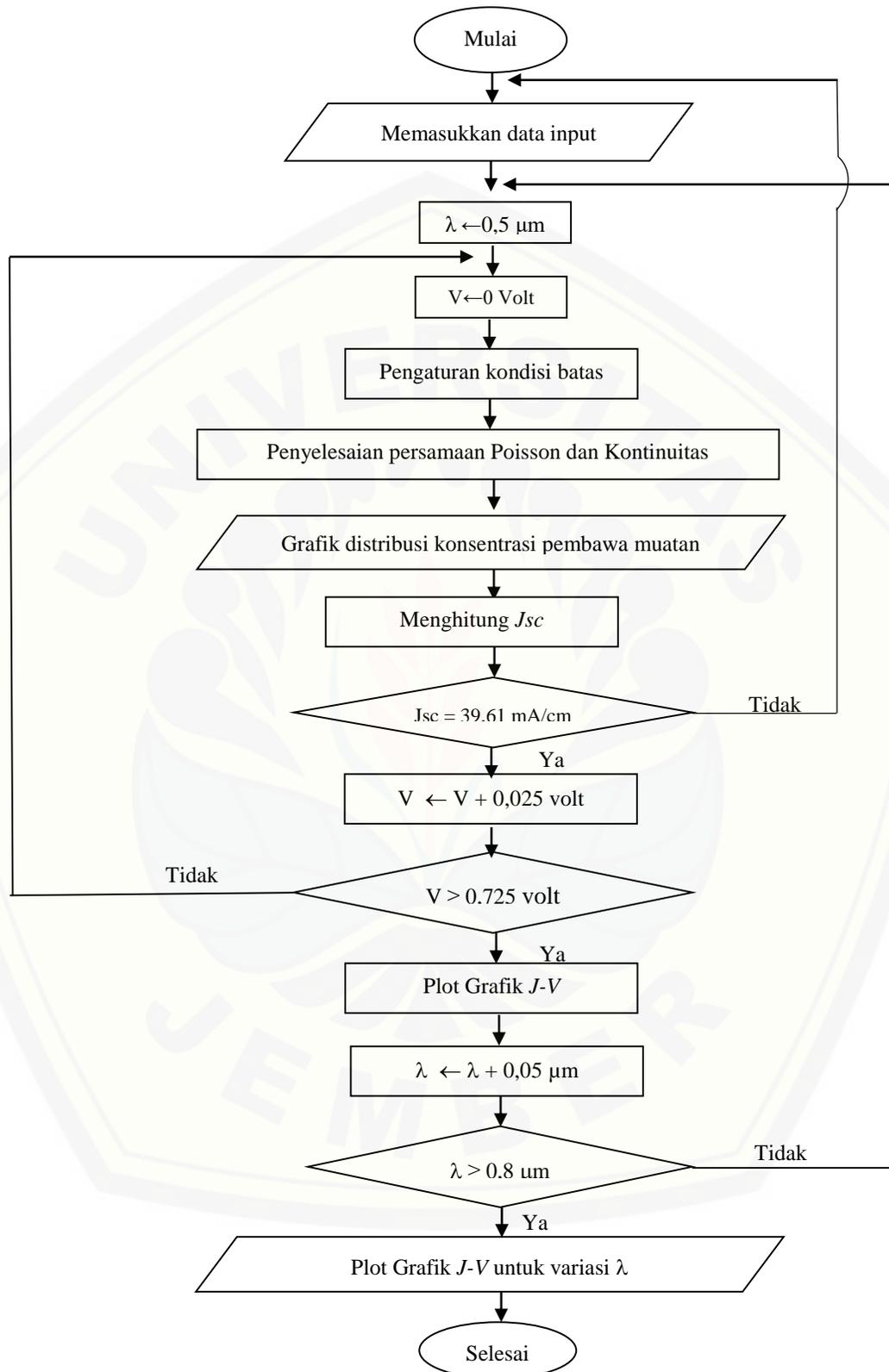
listrik di dalam daerah netral tipe-p dan tipe-n yang mengakibatkan nilainya nol, sehingga hanya arus difusi yang digunakan untuk menentukan rapat arus elektron dan rapat arus *hole* (Faituri, 2006; Fitriana, 2014). Persamaan rapat arus elektron dan rapat arus *hole* secara berturut-turut sebagai berikut:

$$\vec{J}_p = -qD_p n_i e^\psi \vec{V}_v \quad (3.13)$$

$$\vec{J}_n = qD_n n_i e^\psi \vec{V}_u \quad (3.14)$$

Pembuatan kurva karakteristik  $J$ - $V$  didapatkan setelah menghitung rapat arus total dengan menjumlahkan persamaan (3.13) dan (3.14). Dalam kegiatan simulasi ini penghitungan rapat arus total terletak pada batas 2 geometri, dimana batas 2 yang ditunjukkan pada gambar 3.2 merupakan daerah ujung lapisan n. Variasi tegangan yang diberikan merupakan variasi tegangan keluaran dalam kegiatan eksperimen, namun dalam simulasi ini akan menjadi variasi tegangan input. Variasi tegangan yang digunakan pada penelitian ini adalah 0 volt sampai 0,475 volt dengan kelipatan 0,0250 volt. Kurva karakteristik  $J$ - $V$  divais sel surya didapatkan dengan penggambaran kurva tegangan keluaran yang dinyatakan dalam skala linier dan total rapat arus dalam bentuk skala logaritmik. Gambar 3.3 menunjukkan alur simulasi pada penelitian ini.

Hasil yang didapatkan akan dilakukan optimasi pada koefisien absorpsi cahayanya. Koefisien absorpsi cahaya dalam divais sel surya merupakan kemampuan dari bahan yang digunakan untuk menyerap radiasi matahari. Optimasi koefisien absorpsi cahaya dimaksudkan untuk menaikkan nilai rapat arus dan tegangan pada divais sel surya yang disimulasikan. Optimasi nilai koefisien absorpsi cahaya yang digunakan masih dalam rentang nilai koefisien absorpsi cahaya divais sel surya p-n *heterojunction* GaAs/AlGaAs yaitu pada orde  $\sim 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ . Nilai rentang optimasi yang digunakan dari  $1,25 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$  sampai dengan  $2,25 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$  dengan interval  $0,25 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ . Masing-masing nilai koefisien absorpsi cahaya akan menghasilkan rapat arus dan tegangan keluaran yang berbeda-beda.



Gambar 3.3. Alur simulasi penentuan karakteristik  $J$ - $V$  divais sel surya struktur p-n heterojunction GaAs/AlGaAs

### 3.5 Metode Analisis Data

#### 3.5.1 Analisis distribusi pembawa muatan

Profil distribusi pembawa muatan didapatkan dari pemodelan dua dimensi menggunakan FEMLAB. Profil distribusi pembawa muatan yang ditampilkan berupa distribusi pembawa muatan *hole* dan pembawa muatan elektron. Berdasarkan hasil simulasi, akan didapatkan variasi distribusi pembawa muatan sesuai dengan panjang gelombang yang divariasikan. Analisis terhadap distribusi pembawa muatan dapat ditentukan dengan melihat jumlah pembawa muatan *hole* dan pembawa muatan elektron pada posisi koordinat yang sama saat panjang gelombang divariasikan. Posisi koordinat diambil pada daerah lapisan p, persambungan p-n serta lapisan n, pemilihan ketiga titik tersebut sebagai titik pengamatan adalah di sekitar persambungan akan timbul daerah deplesi yang menghasilkan medan listrik pada saat sel surya terkena sinar matahari.

#### 3.5.2 Analisis kurva karakteristik rapat arus-tegangan

Profil kurva karakteristik rapat arus-tegangan didapatkan setelah profil distribusi pembawa muatan tersimpan dalam program MATLAB. Menurut Gray (2003) performa persambungan p-n maksimum dapat diketahui dengan melakukan pengukuran rapat arus hubung singkat dengan tegangan hubung singkat. Pada saat titik tertentu rapat arus akan menurun drastis yang diakibatkan pembesaran area deplesi pada persambungan p-n sel surya. Semakin membesarnya area deplesi pada persambungan p-n maka arus yang mengalir pada divais sel surya akan semakin sedikit. Hasil simulasi kurva karakteristik rapat arus dan tegangan ( $J$ - $V$ ) dari beberapa macam variasi panjang gelombang dengan hasil eksperimen yang dilakukan secara analitik oleh Liou dan Wong (1992). Selain itu, hasil simulasi dioda sel surya kristal semikonduktor GaAs yang didapatkan akan dibandingkan dengan hasil simulasi divais sel surya silikon, yang dilakukan oleh Fitriana (2014) pada panjang gelombang 0,50  $\mu\text{m}$  sampai dengan 0,80  $\mu\text{m}$  dengan interval 0,05  $\mu\text{m}$ . Hal ini dilakukan untuk membandingkan karakteristik kelistrikan divais sel surya dari kedua bahan semikonduktor tersebut.

## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi yang didapatkan dan pembahasan yang telah dilakukan maka diperoleh kesimpulan bahwa sel surya persambungan *heterojunction* GaAs/AlGaAs dalam bentuk 2 Dimensi menggunakan metode elemen hingga sebagai berikut

1. Konsentrasi pembawa muatan (elektron dan *hole*) tertinggi didapatkan saat variasi spektrum cahaya tampak 0,5  $\mu\text{m}$ , konsentrasi pembawa muatan terus menurun ketika panjang gelombang datang yang mengenai divais semakin besar. Sedangkan konsentrasi pembawa muatan yang terendah yaitu pada panjang gelombang 0,8  $\mu\text{m}$ . Terdapat fenomena adanya kenaikan konsentrasi elektron dan *hole* optimum pada lapisan p, lapisan persambungan dan lapisan n, saat tegangan keluarannya sebesar 0,25 volt, selanjutnya konsentrasi elektron dan *hole* akan menurun dengan bertambahnya tegangan keluaran.
2. Peningkatan variasi spektrum cahaya tampak dari 0,5  $\mu\text{m}$  sampai dengan 0,8  $\mu\text{m}$  menyebabkan penurunan rapat arus listrik pada sel surya p-n *heterojunction* GaAs/AlGaAs. Nilai rapat arus hubung singkat ( $J_{sc}$ ) yang didapatkan sebesar 39,61 mA/cm pada saat tegangan sebesar 0 volt. Seiring bertambahnya tegangan, maka rapat arus yang konstan mengalami penurunan drastis pada saat tegangan mendekati nilai  $V_{oc}$ . Selanjutnya pada saat  $V_{oc}$  sebesar 0,725 volt, nilai rapat arus yang dihasilkan mendekati 0 mA/cm. Nilai rapat arus tertinggi didapatkan pada saat nilai koefisien absorpsi yang digunakan sebesar  $2,25 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ .

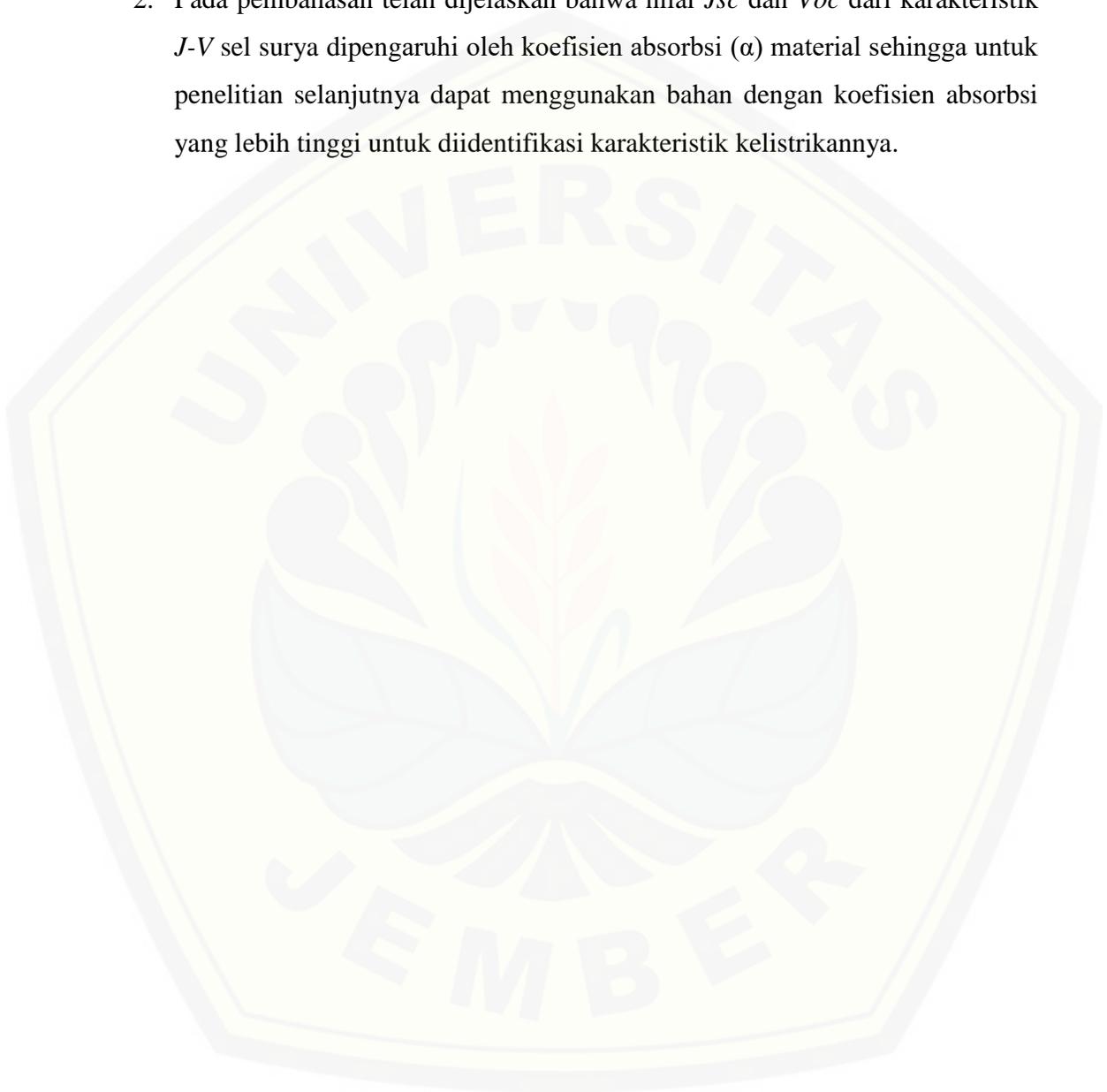
### 5.2 Saran

Ada beberapa masukan yang direkomendasikan oleh peneliti untuk penelitian lebih lanjut, yaitu:

1. Hasil yang didapatkan dalam penelitian ini terjadi rekombinasi pada lapisan n, sehingga untuk mengatasi hal tersebut dapat dilakukan dengan simulasi

menggunakan struktur *heterojunction* persambungan p-i-n agar mengurangi faktor rekombinasi pada lapisan n serta mendapatkan karakteristik *J-V* yang lebih bagus.

2. Pada pembahasan telah dijelaskan bahwa nilai  $J_{sc}$  dan  $V_{oc}$  dari karakteristik *J-V* sel surya dipengaruhi oleh koefisien absorpsi ( $\alpha$ ) material sehingga untuk penelitian selanjutnya dapat menggunakan bahan dengan koefisien absorpsi yang lebih tinggi untuk diidentifikasi karakteristik kelistrikannya.



**DAFTAR PUSTAKA**

- Alviati, N. 2015. Simulasi Distribusi Konsentrasi Elektron Kristal Semikonduktor GaAs Pada Peristiwa “Deformation Potential Scattering” Berbasis Metode Elemen Hingga. *Skripsi*. Jember: Universitas Jember.
- Ariswan. 2008. Prospek Penelitian dan Aplikasinya Fotovoltaik Sebagai Sumber Energi Alternatif di Indonesia. *Skripsi*. Yogyakarta: FMIPA universitas Yogyakarta.
- Buwono. M. C. 2010. Rancang Bangun Sistem Pengendali Pengisian Arus Sel Surya dengan Rekonfigurasi Seri-Paralel. *Skripsi*. Depok: Universitas Indonesia.
- Daniellson, E. 2000. *FEMLAB Model Library For Semiconductor Device Model*. Stockholm: The Royal Institute Of Institute.
- Faituri, F.Y.R. 2006. *Computer Simulation for Current Density in p-n Silicon Solar Cell*. Libya: University of Garyounis.
- Fitriana. 2014. Simulasi Pengaruh Panjang Gelombang Foton Datang Terhadap Karakteristik I-V Dioda Sel Surya Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Skripsi*. Jember : Universitas Jember.
- Fukuda, M. 1999. *Optical Semiconductor Devices*. Canada: John Willey & Sons, Inc.
- G.E. Jellison Jr. 1992. Optical Functions of Gaas, Gap, And Ge Determined By Two-Channel Polarization Modulation Ellipsometry. *Optical Materials 1 (1992)*. 1: 151-160.
- Goetzberger, A. 1998. *Crystalline Silicon Solar Cell*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd.
- Gray, J.L. 2003. *The Physics of the Solar Cell*. USA: Purdue University.

Hack, M. dan Shur. 1985. Physics of Amorphous Silicon Alloy p-i-n Solar Cells. *Journal of Applied Physics*. 58(2): 997-1020.

Handayanu. 2012. *Metode Elemen Hingga*. Surabaya: ITS.

Liou, J.J dan Wong. W. W. 1992. Comparison and Optimization of The Performance of Si and GaAs Solar Cells. *Solar Energy Material and Solar Cells*. 28: 9-28.

Matthew, M. 1973. *Fundamentals Of Electronics*. Prentice hall: 3rd revised edition.

Mintorogo, D. D. 2000. Strategi Aplikasi Sel Surya (Photovoltaic Cells) Pada Perumahan Dan Bangunan Komersial. *Dimensi Teknik Arsitektur*. 28: 129-141.

Palankovski, V. 2000. Simulation of Heterojunction Bipolar Junction. *Disertasi*. Jerman: Technische Universität Wien

Pierret, R.F. 2002. *Advanced Semiconductor Fundamentals*. New Jersey: Prentice Hall.

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

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

Purwandari, E, dan Winata, T. 2013. Analisis Perhitungan Efisiensi Sel Surya Berbasis a-Si:H dalam Penentuan Temperatur Filamen Optimum Bahan. *Jurnal Ilmiah Dasar*. 71: 233-241

Prasetyowati, R. 2012. Sel Surya Berbasis Titania Sebagai Sumber Energi Listrik Alternatif. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan dan Penerapan MIPA, Fakultas MIPA, Universitas Negeri Yogyakarta*. 2 Juni 2012.

Rasyidi, M. 2015. Analisis Sifat Optik dari Campuran Serbuk SiO<sub>2</sub>-ZnO dengan Variasi Suhu Sebagai Alternatif Bahan Semikonduktor Pada Sel Surya. *Skripsi*. Malang: Universitas Islam Malang.

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.

Satwiko, S. 2012. Uji Karakteristik pada Sistem 24 Volt DC sebagai Catudaya pada Sistem Pembangkit Tenaga Hybrid. *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXVI HFI Jateng & DIY, Purworejo*. 14 April 2012. ISSN: 0853-082.

Slimane, H. B., B. Dennai, A. Helmaoui. 2013. Numerical Simulation Of Graded Band Gap Gaas/Algaas Heterojunction Solar Cell By AMPS-1D. *Advances in Physics Theories and Applications*. 22.

Subekti, A. 2003. *Semikonduktor*. Jember: Fakultas MIPA Universitas Jember.

Supriyanto, E. 2015. *Diktat Fisika Semikonduktor*. Jember: Fakultas MIPA Universitas Jember.

Surjono, H. D. 2007. *Elektronika dan Penerapan*. Jember: Cerdas Ulet Kreatif.

Sutrisno. 1986. *Elektronika: Teori dan Penerapannya Jilid 1*. Bandung: ITB.

Sze, S. M. 1981. *Physics of Semiconductor Device*. New York: John Wiley and Sons, Inc.

Sze, S. M dan Lee, M. K. 2007. *Physics of Semiconductor Devices*. New York: John Wiley and Sons, Inc.

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

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

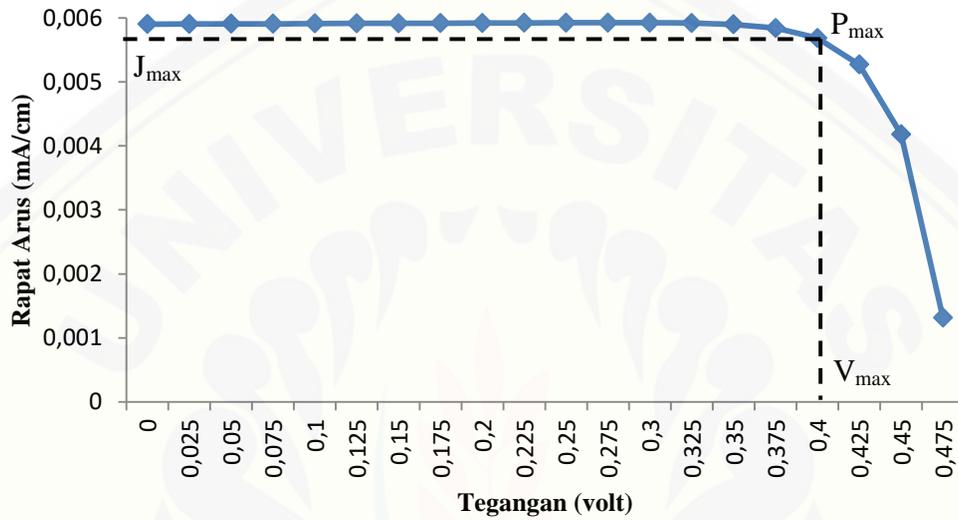
Yuwono, B. 2005. Optimalisasi Panel Sel Surya dengan menggunakan Sistem Pelacak Berbasis Mikrokontroler at89c51. *Skripsi*. Surakarta: Jurusan Fisika Universitas Sebelas Maret.

Zemansky, M. W. dan Sears, F. W. 2003. *Fisika Universitas Jilid 1*. Jakarta: Erlangga

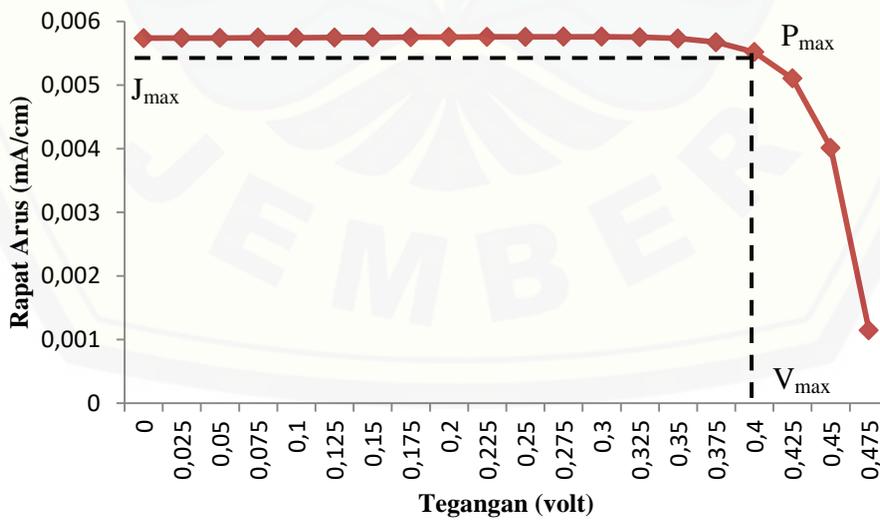


**LAMPIRAN A. KURVA KARAKTERISTIK J-V SEL SURYA BERBASIS GALIUM ARSENIDA PADA VARIASI SPEKTRUM CAHAYA TAMPAK**

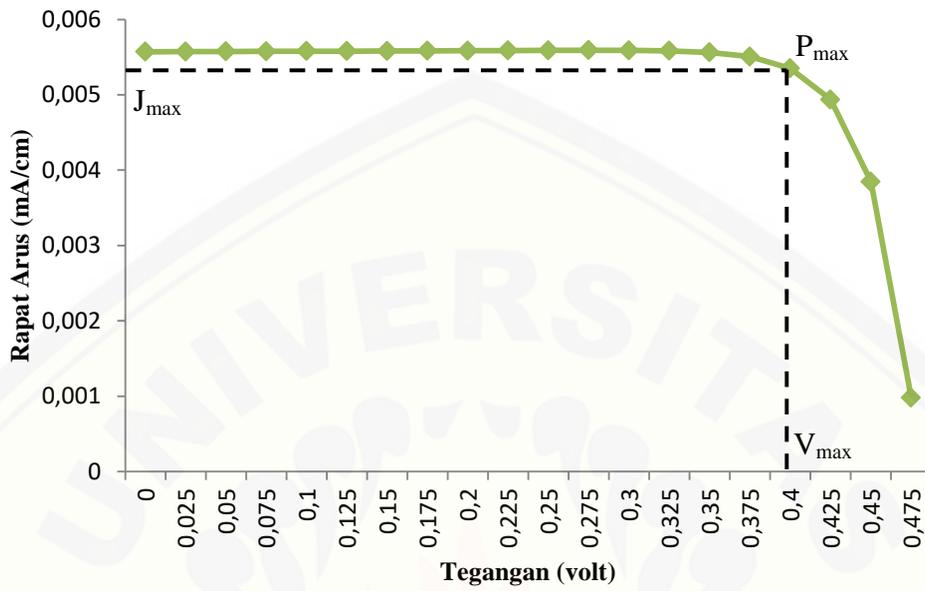
A.1 Karakteristik J-V Sel Surya Berbasis Galium Arsenida Pada Variasi Spektrum Cahaya Tampak 0,50  $\mu\text{m}$



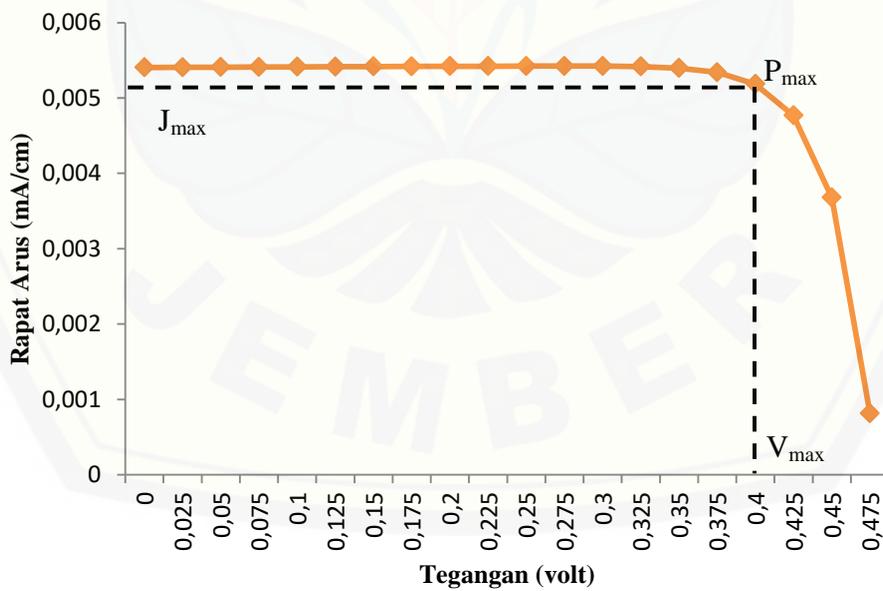
A.2 Karakteristik J-V Sel Surya Berbasis Galium Arsenida Pada Variasi Spektrum Cahaya Tampak 0,55  $\mu\text{m}$



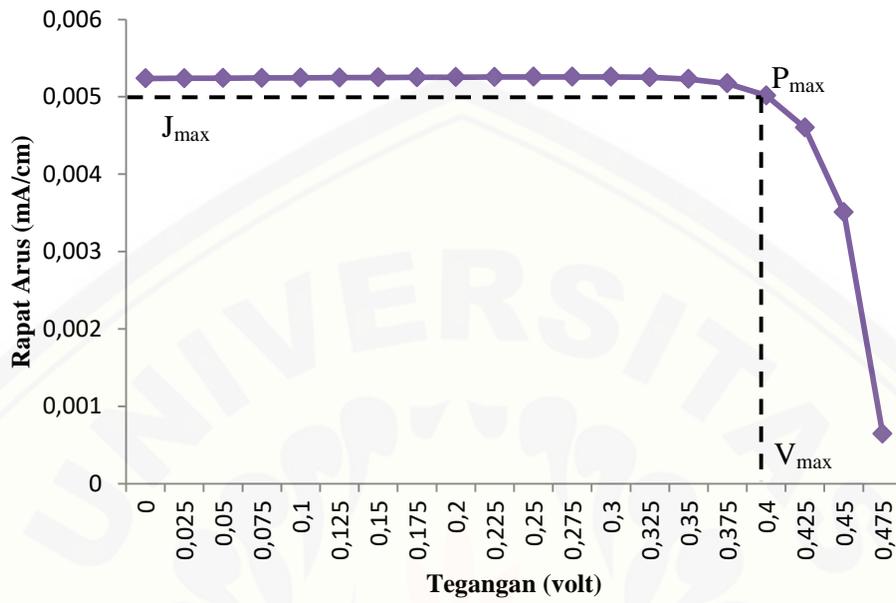
A.3 Karakteristik  $J$ - $V$  Sel Surya Berbasis Galium Arsenida Pada Variasi Spektrum Cahaya Tampak  $0,60 \mu\text{m}$



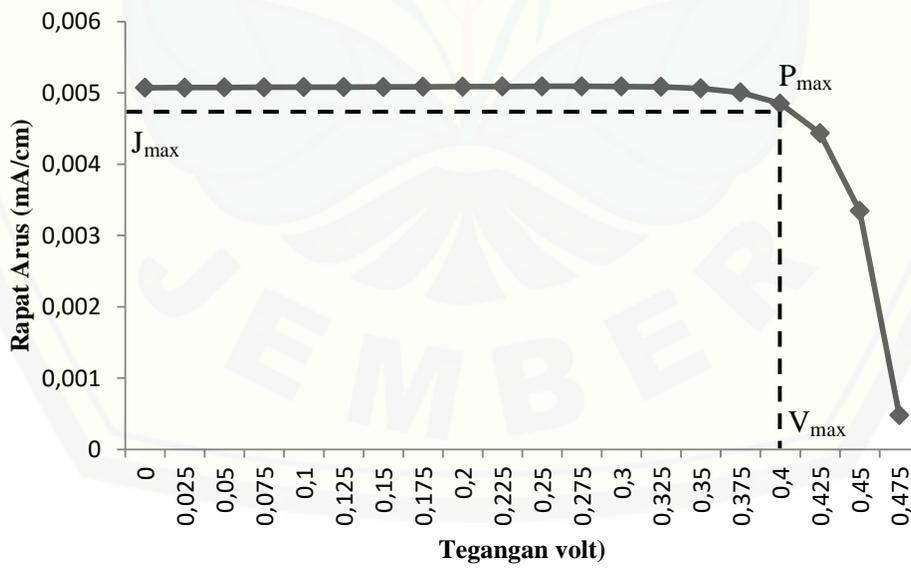
A.4 Karakteristik  $J$ - $V$  Sel Surya Berbasis Galium Arsenida Pada Variasi Spektrum Cahaya Tampak  $0,65 \mu\text{m}$



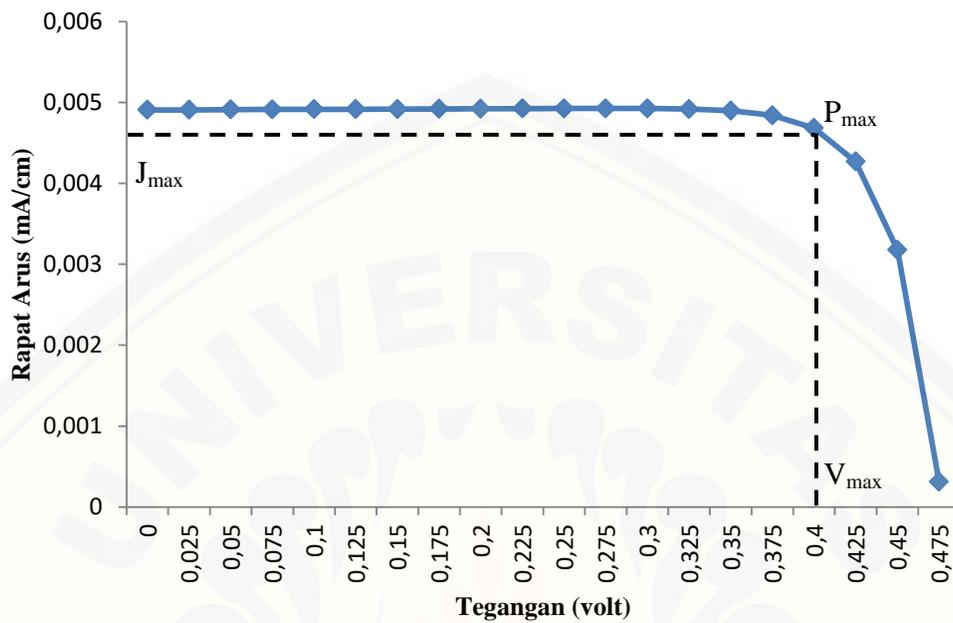
A.4 Karakteristik  $J$ - $V$  Sel Surya Berbasis Galium Arsenida Pada Variasi Spektrum Cahaya Tampak  $0,70 \mu\text{m}$



A.6 Karakteristik  $J$ - $V$  Sel Surya Berbasis Galium Arsenida Pada Variasi Spektrum Cahaya Tampak  $0,75 \mu\text{m}$



A.7 Karakteristik  $J$ - $V$  Sel Surya Berbasis Galium Arsenida Pada Variasi Spektrum Cahaya Tampak  $0,80 \mu\text{m}$



Keterangan:

- \* $P_{\text{max}}$  : Daya maksimum dari divais sel surya p-n *heterojunction* GaAs/ AlGaAs
- \*\* $V_{\text{max}}$  : Tegangan keluaran maksimum yang dihasilkan oleh divais sel surya p-n *heterojunction* GaAs/AlGaAs
- \*\*\* $J_{\text{max}}$  : Rapat arus maksimum yang dihasilkan oleh divais sel surya p-n *heterojunction* GaAs/AlGaAs

**LAMPIRAN D. TABEL NILAI RAPAT ARUS HUBUNG SINGKAT (mA/cm)  
UNTUK VARIASI TEGANGAN KELUARAN**

D.1 Nilai rapat arus hubung singkat (mA/cm) untuk berbagai variasi panjang gelombang dan variasi tegangan keluaran

Va (volt)	0,50 $\mu\text{m}$	0,55 $\mu\text{m}$	0,60 $\mu\text{m}$	0,65 $\mu\text{m}$	0,70 $\mu\text{m}$	0,75 $\mu\text{m}$	0,80 $\mu\text{m}$
0	0,00590	0,00573	0,00557	0,00540	0,00523	0,00507	0,00490
0,025	0,00590	0,00573	0,00557	0,00540	0,00524	0,00507	0,00490
0,050	0,00590	0,00573	0,00557	0,00540	0,00524	0,00507	0,00491
0,075	0,00590	0,00574	0,00557	0,00541	0,00524	0,00507	0,00491
0,100	0,00591	0,00574	0,00557	0,00541	0,00524	0,00508	0,00491
0,125	0,00591	0,00574	0,00558	0,00541	0,00524	0,00508	0,00491
0,150	0,00591	0,00574	0,00558	0,00541	0,00524	0,00508	0,00491
0,175	0,00591	0,00575	0,00558	0,00541	0,00525	0,00508	0,00491
0,200	0,00591	0,00575	0,00558	0,00542	0,00525	0,00508	0,00492
0,225	0,00592	0,00575	0,00558	0,00542	0,00525	0,00508	0,00492
0,250	0,00592	0,00575	0,00559	0,00542	0,00525	0,00509	0,00492
0,275	0,00592	0,00575	0,00559	0,00542	0,00525	0,00509	0,00492
0,300	0,00592	0,00575	0,00559	0,00542	0,00525	0,00509	0,00492
0,325	0,00591	0,00575	0,00558	0,00541	0,00525	0,00508	0,00491
0,350	0,00589	0,00573	0,00556	0,00539	0,00523	0,00506	0,00489
0,375	0,00583	0,00567	0,00550	0,00533	0,00517	0,00500	0,00483
0,400	0,00568	0,00551	0,00535	0,00518	0,00501	0,00484	0,00468
0,425	0,00527	0,00510	0,00493	0,00476	0,00460	0,00443	0,00426
0,450	0,00418	0,00401	0,00384	0,00367	0,00351	0,00334	0,00317
0,475	0,00131	0,00114	0,00098	0,00081	0,00064	0,00047	0,00031