



**ANALISIS DAN INVESTIGASI KARAKTER
SEMIKONDUKTOR p^+ -GaAs/ n^+ -Si *Heterojunction* UNTUK
PERSAMBUNGAN SEL SURYA TANDEM BERBASIS Si/GaAs
MENGUNAKAN ARCHIMEDES 2.0.1**

TESIS

Oleh

DITA PUSPITA

NIM 161820201001

**PROGRAM STUDI MAGISTER FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER**

2020



**ANALISIS DAN INVESTIGASI KARAKTER
SEMIKONDUKTOR p^+ -GaAs/ n^+ -Si *Heterojunction* UNTUK
PERSAMBUNGAN SEL SURYA TANDEM BERBASIS Si/GaAs
MENGUNAKAN ARCHIMEDES 2.0.1**

TESIS

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan Program Studi Magister Fisika (S-2)
dan mencapai gelar Magister Sains (M.Si)

oleh

**DITA PUSPITA
NIM 161820201001**

**PROGRAM STUDI MAGISTER FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER
2020**

PERSEMBAHAN

Puji syukur kepada Allah SWT atas segala nikmat dan kesempatan untuk dapat menggenggam ilmu, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “*Analisis dan Investigasi Karakter Semikonduktor p^+ -GaAs/ n^+ -Si Heterojunction Untuk Persambungan Sel Surya Tandem Berbasis Si/GaAs Menggunakan Archimedes 2.0.1*”. Dari lubuk hati yang paling dalam, penulis mempersembahkan tesis ini kepada:

1. Kedua orang tua tercinta Akhmad Yatiman dan Evy, terima kasih atas segala cinta, doa dan pengorbanan yang telah diberikan hingga saat ini, semoga Allah SWT senantiasa melimpahkan rahmat-Nya;
2. Suami dan putriku tercinta Wahyu Arif Bintoro dan Shafiyah N.I.D, terima kasih sudah ikut berjuang dan menjadi motivasi selama ini;
3. Seluruh anggota keluarga besar, terima kasih atas perhatian, doa serta dukungannya;
4. Sahabat-sahabat seperjuangan di Laboratorium Komputasi;
5. Sahabat-sahabat seperjuangan selama pendidikan S-2 terima kasih atas segala dukungan dan keceriaan-keceriaan yang mewarnai masa perjuangan;
6. Para dosen pengajar, terima kasih telah memberikan ilmu, dukungan dan bimbingan dengan penuh kesabaran dan kasih sayang;
7. Seluruh keluarga besar Jurusan Fisika, terima kasih atas segala dukungan dan bantuan yang telah diberikan hingga dapat menyelesaikan tesis ini;
8. Almamater yang kebanggakan Program Studi Magister Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember.

MOTO

“ Selalu ada celah retak dalam segala sesuatu, dari situlah cahaya masuk. “
(Leonard Cohen)^{*)}

“ Akan datang saat kau berpendapat bahwa segala sesuatunya selesai. Itulah yang
akan menjadi awalnya. “ (Louis L’Amour)^{**)}

*“ Imperfection is beauty. Madness is genius and it is better to be absolutely
ridiculous than absolutely boring. “ (Marilyn Monroe)^{***)}*

*) Hawthorne, R Jennifer et all. 2007. Life Lesson for Loving the Way You Live 7 Essential Ingredients for Finding Balance and Serenity. USA: Health Communications, Inc.

***) Canfield. Jack *et all.* 1999. Chicken Soup for the Single’s Soul. Florida: Health Communication, Inc.

***) <http://katakatabijak.com/tag/marilyn-monroe>. 14 Januari 2014

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dita Puspita

NIM : 161820201001

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul: *Analisis dan Investigasi Karakter Semikonduktor p^+ -GaAs/ n^+ -Si Heterojunction Untuk Persambungan Sel Surya Tandem Berbasis Si/GaAs Menggunakan Archimedes 2.0.1* 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.

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

Jember, Juni 2020

Yang menyatakan,

Dita Puspita

NIM 161820201001

TESIS

**ANALISIS DAN INVESTIGASI KARAKTER SEMIKONDUKTOR
 p^+ -GaAs/ n^+ -Si *Heterojunction* UNTUK PERSAMBUNGAN SEL SURYA
TANDEM BERBASIS Si/GaAs MENGGUNAKAN ARCHIMEDES 2.0.1**

Oleh

**Dita Puspita
NIM 161820201001**

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si

Dosen Pembimbing Anggota : Prof. Drs. Agus Subekti, M.Sc., Ph.D

PENGESAHAN

Tesis berjudul *Analisis dan Investigasi Karakter Semikonduktor p^+ -GaAs/ n^+ -Si Heterojunction Untuk Persambungan Sel Surya Tandem Berbasis Si/GaAs Menggunakan Archimedes 2.0.1* telah diuji dan disahkan oleh Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember pada:

Hari/Tanggal :

Tempat : Program Studi Magister Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Tim Penguji:

Ketua,

Sekretaris,

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

Prof. Agus Subekti, M.Sc., Ph.D
NIP 196008019401002

Anggota I,

Anggota II,

Dr. Sutisna, S.Pd., M.Si
NIP 197301152000031001

Bowo Eko Cahyono, S.Si., M.Si., Ph.D
NIP 197202101998021001

Mengesahkan

Dekan Fakultas MIPA,

Drs. Achmad Sjaifullah, M.Sc., Ph.D
NIP 195910091986021001

RINGKASAN

Analisis dan Investigasi Karakter Semikonduktor p^+ -GaAs/ n^+ -Si Heterojunction Untuk Persambungan Sel Surya Tandem Berbasis Si/GaAs Menggunakan Archimedes 2.0.1; Dita Puspita; 161820201001; 2020; 52 halaman; Program Studi Magister Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penelitian terhadap teknologi sel surya terus berkembang dan kini para peneliti berusaha meningkatkan efisiensi sel surya dengan mengoptimalkan kemampuan penyerapan spektrum cahaya matahari pada sel surya. Sel surya yang didesain memiliki kemampuan menyerap spektrum cahaya matahari yang sangat besar adalah sel surya tandem (*multijunction*), yang termasuk dalam sel surya generasi ketiga (Dimroth and Kurtz, 2007). Sel surya tandem (*multijunction*) merupakan desain sel surya di mana terdapat beberapa persambungan p-n yang dibuat dari material semikonduktor yang berbeda. Penggunaan material berbeda (*bandgap* berbeda) yang digunakan sebagai persambungan inilah yang ditujukan untuk mendapatkan maksimum foton dari spektrum cahaya matahari. Dalam proses fabrikasi sel surya tandem terdapat batasan mendasar terkait penggunaan material dengan mengoptimalkan *bandgap* yang memungkinkan tercapainya nilai efisiensi yang tinggi melalui rendahnya tingkat *defect*.

Di balik nilai efisiensi sel surya tandem yang sangat tinggi terdapat tantangan dalam proses fabrikasinya. Berbagai usaha telah dilakukan salah satunya yaitu optimasi persambungan p-n yang digunakan untuk menghubungkan sel satu dengan sel yang lainnya. Persambungan p-n memegang peran penting dan perhatian khusus untuk meningkatkan efisiensi sel surya tandem, hal ini dikarenakan persambungan memiliki pengaruh terhadap besar-kecilnya energi yang diteruskan hingga mampu menghasilkan energi listrik. Oleh karena itu dibutuhkan karakteristik persambungan p-n ideal yang diterapkan untuk menghubungkan antar sel sehingga diharapkan didapatkan energi cahaya yang

optimum untuk dikonversi dan menghasilkan energi listrik dalam jumlah yang besar.

Dengan memanfaatkan keunggulan pemodelan numerik berbasis metode beda hingga, respon berupa densitas dan potensial yang diperoleh dari solusi persamaan Poisson non-stasioner digunakan untuk investigasi semikonduktor p^+ -GaAs/ n^+ -Si *heterojunction* sebagai persambungan untuk sel surya tandem berbasis Si/GaAs. Peneliti bertujuan untuk mengetahui pengaruh ketebalan persambungan agar didaptasikan persambungan ideal yang diaplikasikan untuk sel surya tandem berbasis Si/GaAs.

Mengacu pada hasil dan analisis maka secara umum dapat disimpulkan bahwa pada semua variasi ketebalan yang dilakukan pada masing-masing lapisan, yakni Si dan GaAs, menunjukkan semakin berkurang ketebalan lapisan persambungan semakin besar rapat arus yang dihasilkan dan semakin rendah besarnya energi konduksi pembawa muatan. Hal ini menunjukkan bahwa pembawa muatan pada semikonduktor p^+ -GaAs/ n^+ -Si *heterojunction* semakin mudah menembus barrier saat ketebalan lapisan semakin tipis sehingga menghasilkan arus yang semakin besar. Rendahnya energi konduksi yang dihasilkan oleh persambungan p^+ -GaAs/ n^+ -Si *heterojunction* menunjukkan bahwa saat struktur ini digunakan untuk sambungan pada sel surya tandem berbasis Si/GaAs dapat mentransfer energi dengan baik tanpa banyak kehilangan listrik yang dihasilkan.

PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “*Analisis dan Investigasi Karakter Semikonduktor p^+ -GaAs/ n^+ -Si Heterojunction Untuk Persambungan Sel Surya Tandem Berbasis Si/GaAs Menggunakan Archimedes 2.0.1*”, sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan program strata dua (S2) Jurusan Magister Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Jember.

Penyusunan tesis ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama, Prof. Agus Subekti, M.Sc., Ph.D selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah bersedia meluangkan waktu, pikiran dan bimbingan dalam penulisan tesis ini;
2. Dr. Sutisna, S.Pd., M.Si, selaku Dosen Penguji I, Bowo Eko Cahyono, S.Si., M.Si., Ph.D, selaku Dosen Penguji II yang telah meluangkan waktu, pikiran, perhatian, bimbingan, saran dan kritik demi kesempurnaan tesis ini;
3. Drs. Sujito, Ph.D., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing penulis selama menjadi mahasiswa;
4. seluruh staf pengajar Program Studi Magister Fisika dan Fakultas MIPA Universitas Jember;

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

Jember, Juni 2020

Penulis

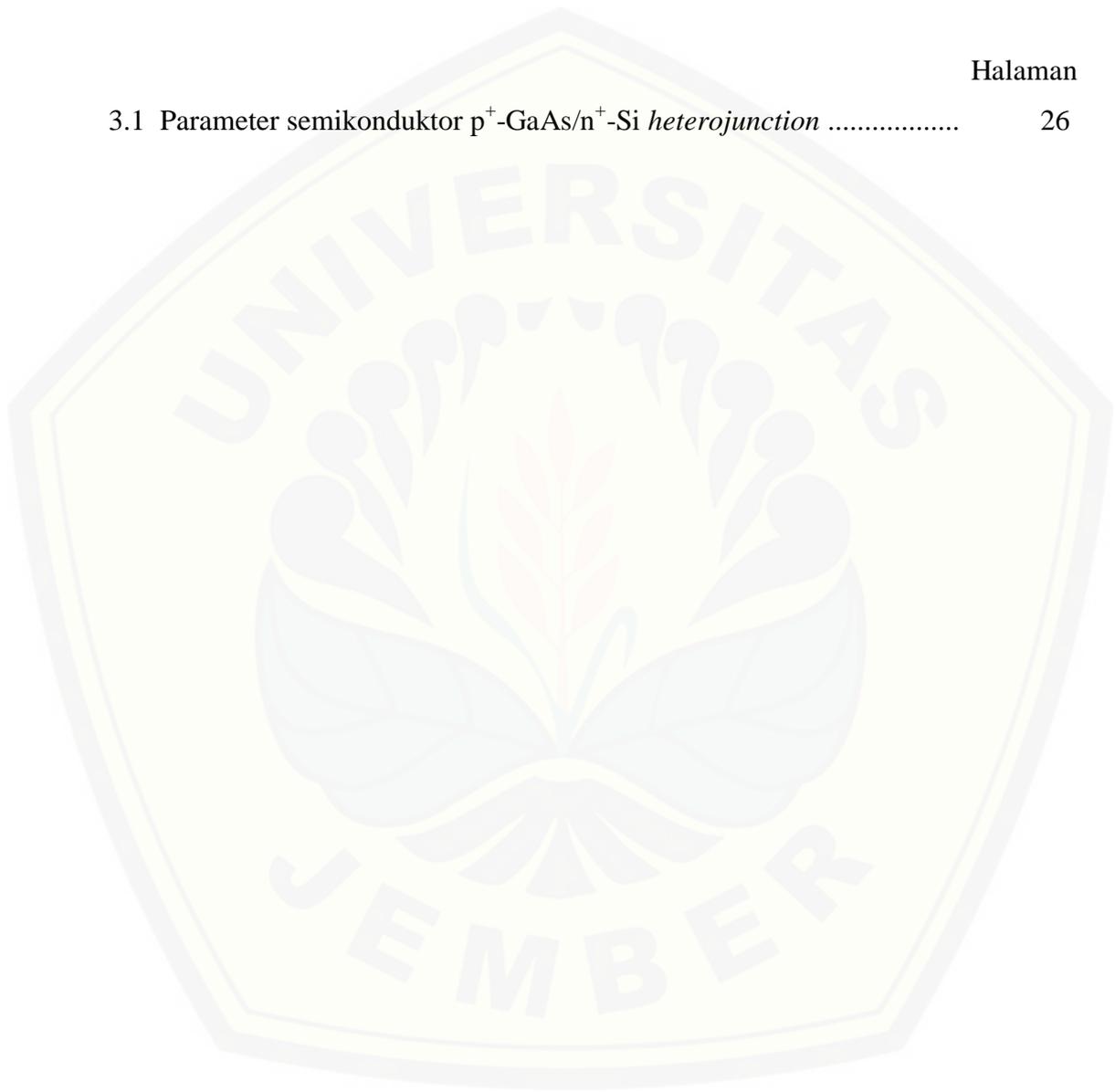
DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iii
HALAMAN MOTO	iv
HALAMAN PERNYATAAN	v
HALAMAN PEMBIMBINGAN	vi
HALAMAN PENGESAHAN	vii
RINGKASAN	viii
PRAKATA	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Batasan Masalah	7
1.4 Tujuan Penelitian	7
1.5 Manfaat Penelitian	7
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Sel Surya (<i>Solar Cell</i>)	8
2.2 Sel Surya Tandem (<i>Multijunction Solar Cell</i>)	9
2.3 Semikonduktor <i>Heterojunction</i>	11
2.4 Material Semikonduktor Silikon dan Gallium Arsenide .	15
2.4.1 Struktur Kristal Silikon dan Gallium Arsenide	15

2.4.2 Pita Energi dan Energi Gap	16
2.5 Konsep Model Fisika pada Archimedes 2.0.1	17
2.5.1 Metode Monte Carlo	18
2.5.2 Metode Monte Carlo dan Poisson non-Stasioner ...	20
BAB 3. METODE PENELITIAN	22
3.1 Rancangan Penelitian	22
3.2 Jenis dan Sumber Data	24
3.3 Definisi Operasional Variabel	24
3.4 Prosedur Penelitian	25
3.4.1 Pembuatan model penelitian	25
3.4.2 Metode analisa	27
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	30
4.1 Karakteristik I-V Semikonduktor p^+ -GaAs/ n^+ -Si <i>Heterojunction</i>	30
BAB 5. PENUTUP	41
5.1 Kesimpulan	41
5.2 Saran	41
DAFTAR PUSTAKA	43
LAMPIRAN	46

DAFTAR TABEL

	Halaman
3.1 Parameter semikonduktor p^+ -GaAs/ n^+ -Si <i>heterojunction</i>	26



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
1.1 Efisiensi absorpsi sel surya ideal beberapa material semikonduktor .	2
1.2 Perkembangan penelitian usaha meningkatkan efisiensi sel surya	3
2.1 Spektrum panjang gelombang radiasi matahari pada keadaan massa udara yang berbeda	9
2.2 Energi gap, konstanta kisi dan panjang gelombang beberapa material semikonduktor	10
2.3 Material sel surya tandem mengabsorpsi spektrum panjang gelombang radiasi matahari berbeda-beda	11
2.4 Dua material dengan ketidakcocokan kisi a_s dan a_e	12
2.5 Diagram pita energi semikonduktor p^+ -GaAs/ n^+ -Si <i>heterojunction</i> dengan energi gap berbeda	13
2.6 Struktur kristal Silikon dan Gallium Arsenide	15
2.7 Pita energi Silikon dan Gallium Arsenide terhadap fungsi temperatur	16
2.8 Struktur pita energi Silikon dan Gallium Arsenide	17
2.9 Diagram metode Monte Carlo	19
3.1 Diagram <i>fishbone</i> penelitian	22
3.2 Diagram prosedur penelitian	25
3.3 Geometri struktur 2D p^+ -GaAs/ n^+ -Si <i>heterojunction</i> dengan panjang dan lebar perangkat 525,4 μm dan 0,1 μm	26
3.4 Karakteristik I-V p^+ -GaAs/ n^+ -Si <i>heterojunction</i>	29
4.1 Hasil validasi karakteristik I-V hasil eksperimen dan simulasi dengan menggunakan aplikasi Archimedes 2.0.1	31
4.2 Karakteristik I-V semikonduktor p^+ -GaAs/ n^+ -Si <i>heterojunction</i> (a) ketebalan lapisan Si bervariasi dan ketebalan GaAs konstan pada	33

0,4 μm (b) ketebalan lapisan GaAs bervariasi dan ketebalan Si konstan pada 525 μm	
4.3 Karakteristik I-V bias maju dan mundur semikonduktor $\text{p}^+\text{-GaAs/n}^+\text{-Si heterojunction}$ variasi ketebalan (a) lapisan Si (b) lapisan GaAs	35
4.4 Diagram pita semikonduktor $\text{p}^+\text{-GaAs/n}^+\text{-Si heterojunction}$	36
4.5 Karakteristik J-E semikonduktor $\text{p}^+\text{-GaAs/n}^+\text{-Si heterojunction}$ (a) ketebalan lapisan Si bervariasi dan ketebalan GaAs konstan pada 0,4 μm (b) ketebalan lapisan GaAs bervariasi dan ketebalan Si konstan pada 525 μm	38
A.1 Grafik hasil validasi karakteristik I-V semikonduktor $\text{p}^+\text{-GaAs/n}^+\text{-Si heterojunction}$ beserta nilai koefisien kelinierannya (R^2).....	47

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
A. Nilai rapat arus terhadap variasi ketebalan semikonduktor p^+ -GaAs/ n^+ -Si <i>heterojunction</i>	46
B. Karakteristik I-V bias maju dan bias mundur variasi ketebalan semikonduktor p^+ -GaAs/ n^+ -Si <i>heterojunction</i>	50
C. Nilai energi konduksi terhadap variasi ketebalan semikonduktor p^+ -GaAs/ n^+ -Si <i>heterojunction</i>	52

BAB 1. PENDAHULUAN

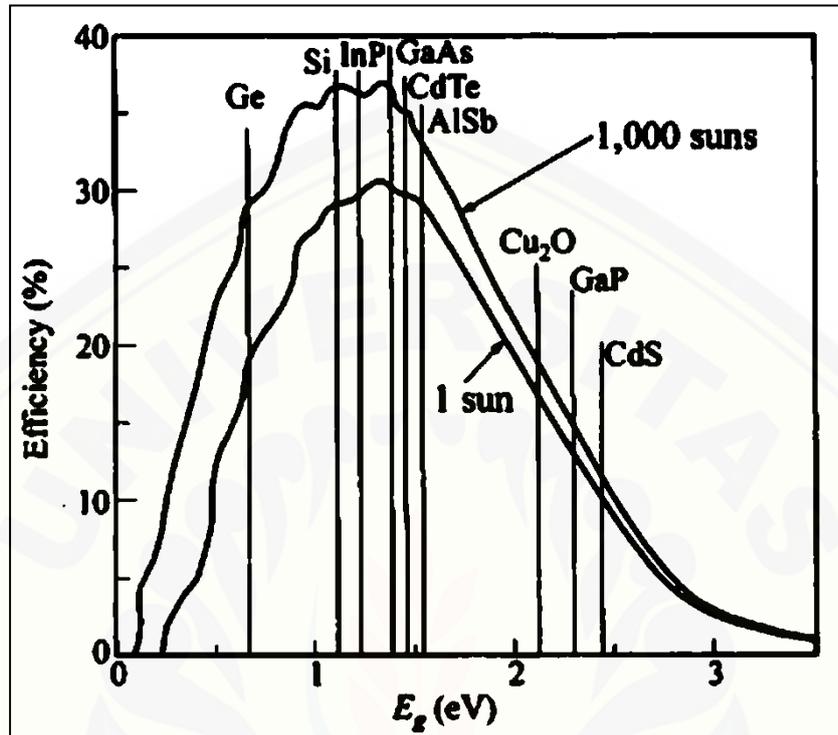
1.1 Latar Belakang

Energi matahari merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dan dapat diandalkan sebagai pasokan energi karena ketersediaan energi matahari yang sangat melimpah. Sekitar 120.000 TW radiasi energi matahari dipancarkan ke bumi, sekitar 0,16% terserap oleh atmosfer dan sekitar 10% mencapai bumi (setara dengan 20 TW), hal ini sama dengan satu kali konsumsi energi tiap tahun di dunia (Nathan S, 2005). Dengan melihat potensi energi matahari yang melimpah dan alasan ekologi, pemanfaatan teknologi sel surya (*photovoltaic*) menjadi salah satu alternatif yang dapat digunakan. Sel surya dapat mengkonversi cahaya matahari menjadi energi listrik dengan menggunakan efek fotolistrik, sehingga energi listrik yang dihasilkan dapat digunakan untuk berbagai hal. Sel surya (*photovoltaic*) ditemukan pada tahun 1839, ketika Edmund Becquerel melakukan penelitian mengenai efek *photovoltaic* di dalam larutan elektrolit (Fraas, 2014).

Hingga saat ini kemajuan teknologi sel surya telah berkembang begitu pesatnya. Parameter penting dalam sel surya yang menjadi acuan keberhasilan fabrikasi sel surya, yaitu kemampuan sel surya untuk dapat mengkonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik yang disebut dengan efisiensi. Ada beberapa faktor yang menentukan besarnya efisiensi sel surya, seperti pemilihan material semikonduktor (lebar *bandgap*, spektrum panjang gelombang dan konstanta kisi), konsentrasi optikal dan desain sel surya (Dobrzański *et al.*, 2006).

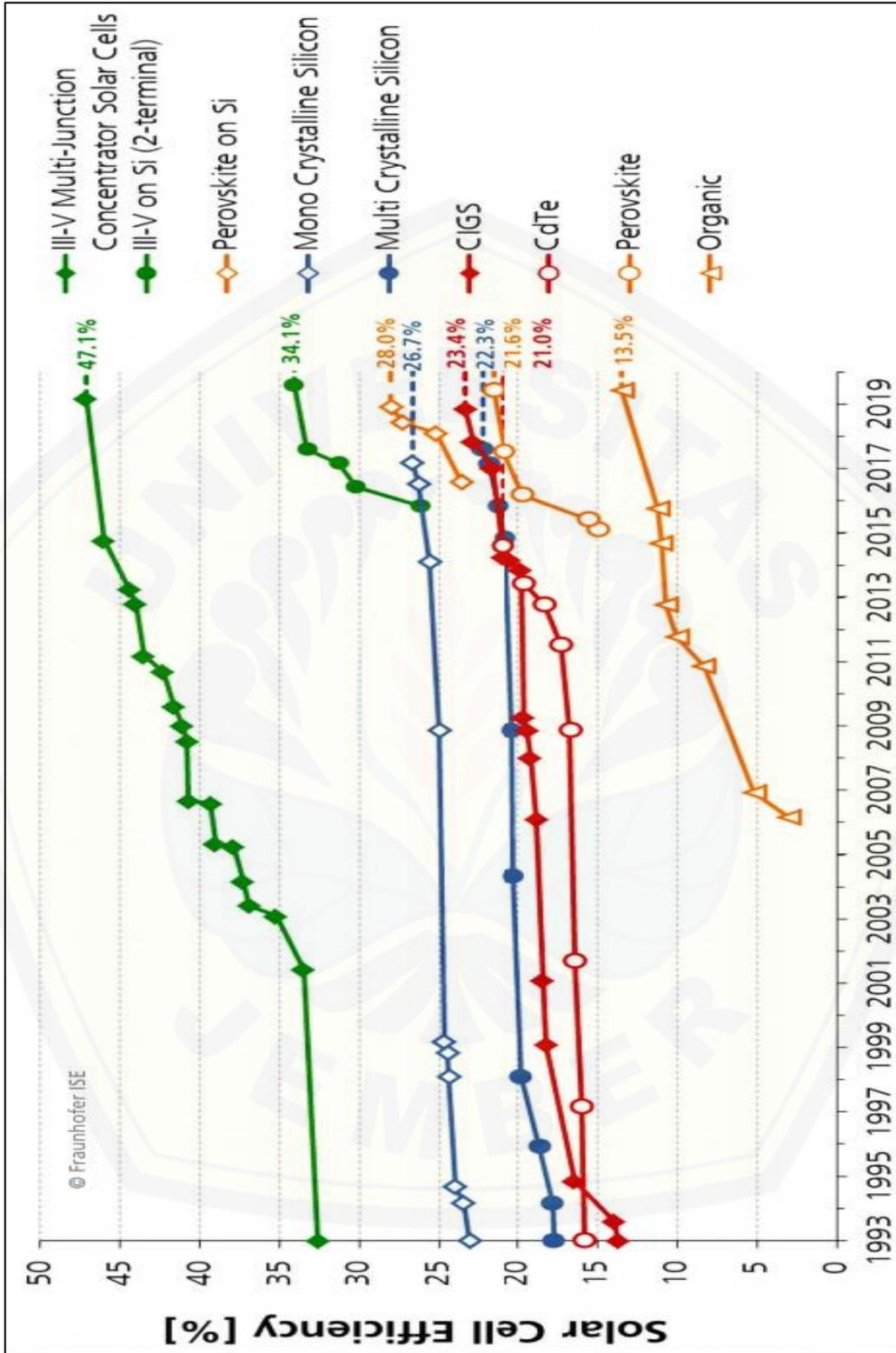
Di antara banyaknya material semikonduktor, material yang tak asing lagi dan sering digunakan untuk sel surya adalah Silikon (Si) dan Gallium Arsenide (GaAs). Hal ini dikarenakan kedua material ini memiliki sifat optik seperti kemampuan absorpsi spektrum panjang gelombang tertinggi di antara material lain, gambar 1.1. Material Si memiliki spektrum panjang gelombang 1,1 μm dengan efisiensi absorpsi spektrum cahaya matahari sekitar 37%, sedangkan untuk

material GaAs memiliki spektrum panjang gelombang 0,85 μm dengan efisiensi absorpsi cahaya matahari sekitar 38% (Sze, 2007).



Gambar 1.1 Efisiensi absorpsi sel surya ideal beberapa material semikonduktor (Sze, 2007)

Sel surya berbasis Si dan GaAs terus dieksplorasi untuk mendapatkan efisiensi sel surya tertinggi dan hingga saat ini sel surya berbasis Si telah mencapai efisiensi tertinggi sebesar 27,6% dengan berbagai upaya yang dilakukan seperti menggunakan Si *single crystal* dengan bervariasi konsentrasi dan desain sel surya, menggunakan Si *multicrystalline*, Si *heterostructures* hingga menggunakan kristal lapisan tipis. Hal yang serupa dilakukan untuk meningkatkan efisiensi sel surya berbasis GaAs, nilai nilai efisiensi tertinggi yang telah dicapai sel surya berbasis GaAs ini adalah sebesar 30,5%, gambar 1.2 (NREL, 2019).



Gambar 1.2 Perkembangan penelitian usaha meningkatkan efisiensi sel surya (Fraunhofer ISE, 2020)

Penelitian terhadap teknologi sel surya terus berkembang dan kini para peneliti berusaha meningkatkan efisiensi sel surya dengan mengoptimalkan kemampuan penyerapan spektrum cahaya matahari pada sel surya. Sel surya yang didesain memiliki kemampuan menyerap spektrum cahaya matahari yang sangat besar adalah sel surya tandem (*multijunction*), yang termasuk dalam sel surya generasi ketiga (Dimroth and Kurtz, 2007). Sel surya tandem (*multijunction*) merupakan desain sel surya di mana terdapat beberapa persambungan p-n yang dibuat dari material semikonduktor yang berbeda. Penggunaan material berbeda (*bandgap* berbeda) yang digunakan sebagai persambungan inilah yang ditujukan untuk mendapatkan maksimum foton dari spektrum cahaya matahari. Dalam proses fabrikasi sel surya tandem terdapat batasan mendasar terkait penggunaan material dengan mengoptimalkan *bandgap* yang memungkinkan tercapainya nilai efisiensi yang tinggi melalui rendahnya tingkat *defect*.

Sel surya tandem telah dipelajari sejak tahun 1960-an (Alapatt, Singh and Poole, 2012) dan sel surya tandem pertama kali didemonstrasikan awal tahun 1980 dengan keberhasilan sel surya tandem mengkonversi 16% energi cahaya matahari menjadi energi listrik (Luque and Hegedus, 2003). Pada tahun 1994, Fraunhofer ISE menghasilkan sel surya tandem hingga menembus nilai efisiensi 30%. Dan saat ini nilai efisiensi tertinggi sel surya tandem telah mencapai 47,1% (Fraunhofer ISE, 2020). Hal ini juga didukung dengan penggunaan material semikonduktor dari golongan III-IV, seperti Si dan GaAs. Sebagaimana keunggulan material ini memiliki massa yang ringan, *bandgap* yang lebar, memiliki koefisien absorpsi yang tinggi, memiliki sifat optoelektronik yang sangat baik dan mobilitas yang tinggi (Kurtz and Geisz, 2010).

Di balik nilai efisiensi yang tinggi yang dimiliki sel surya tandem membutuhkan teknologi dan biaya yang cukup besar untuk fabrikasinya. Namun, hal ini tidak menjadikan sel surya tandem menjadi kurang diminati. Sel surya tandem telah diaplikasikan untuk memenuhi pasokan energi untuk kepentingan perangkat luar angkasa dan kebumihan, seperti satelit dan pesawat luar angkasa. Hal ini sangat memungkinkan dengan melihat keunggulan dari sel surya tandem

sendiri dan penggunaan material semikonduktor dari golongan III-IV, seperti sel surya tandem berbasis Si/GaAs yang memiliki nilai efisiensi yang sangat tinggi dan memiliki massa yang ringan (Aberle *et al.*, 2014).

Di balik nilai efisiensi sel surya tandem yang sangat tinggi terdapat tantangan dalam proses fabrikasinya. Berbagai usaha telah dilakukan salah satunya yaitu optimasi persambungan p-n yang digunakan untuk menghubungkan sel satu dengan sel yang lainnya. Persambungan p-n memegang peran penting dan perhatian khusus untuk meningkatkan efisiensi sel surya tandem, hal ini dikarenakan daerah persambungan memiliki pengaruh terhadap besar-kecilnya energi yang diteruskan hingga mampu menghasilkan energi listrik. Oleh karena itu dibutuhkan karakteristik persambungan p-n ideal yang diterapkan untuk menghubungkan antar sel sehingga diharapkan didapatkan energi cahaya yang optimum untuk dikonversi dan menghasilkan energi listrik dalam jumlah yang besar.

Penelitian terhadap material dan desain persambungan telah dilakukan oleh Morimoto *et al* pada tahun 2013 dan Liang *et al* pada tahun 2015 secara eksperimen. Penelitian yang dilakukan Morimoto *et al* dengan menggunakan semikonduktor Si/III-V *heterojunction* menunjukkan penggunaan *high dopped* pada material menunjukkan sifat ohmik. Hilangnya energi saat melewati persimpangan dapat berkurang secara signifikan dengan meningkatkan konsentrasi pengotor (Morimoto *et al.*, 2013). Sedangkan dalam penelitian yang telah dilakukan Liang *et al* dengan menggunakan material semikonduktor Si/GaAs *heterojunction* dengan variasi terhadap tipe persambungan. Tipe persambungan mempengaruhi sifat ohmik pada persambungan yang didesain dengan diberikan *high dopped* pada material yang digunakan, serta berpengaruh pula pada nilai resistansinya (Liang *et al.*, 2015).

Namun dalam kedua penelitian ini belum dilakukan variasi terhadap ketebalan. Dengan memanfaatkan keunggulan metode numerik dengan menggunakan aplikasi Archimedes 2.0.1 perlu dilakukan pengembangan terhadap pemodelan perangkat semikonduktor *heterojunction* agar didapatkan persambungan ideal yang diaplikasikan pada sel surya tandem. Dalam penelitian

ini semikonduktor p^+ -GaAs/ n^+ -Si *heterojunction* dipilih sebagai objek penelitian. Material Si/GaAs dipilih dalam penelitian ini dikarenakan material Si/GaAs memiliki efisiensi absorpsi cahaya matahari sebesar sekitar 37% untuk Si dan 38% untuk GaAs dibandingkan material semikonduktor lainnya, sehingga lebih sesuai diaplikasikan pada perangkat sel surya tandem (Sze, 2007). Di mana, konsep sel surya tandem adalah menyerap sebanyak-banyaknya sinar matahari agar memperoleh efisiensi yang tinggi. Selain itu keduanya memiliki mobilitas elektron yang tinggi dan teknologi fabrikasi yang telah mapan. Sehingga, diharapkan dengan menggunakan kedua material ini dapat menghasilkan perangkat dengan kualitas yang sangat baik.

Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari pengaruh ketebalan lapisan persambungan agar didapatkan persambungan ideal yang diaplikasikan untuk sel surya tandem berbasis Si/GaAs. Dengan bantuan aplikasi Archimedes 2.0.1 respon berupa densitas, energi dan potensial diperoleh berdasarkan solusi dari persamaan Poisson non-stasioner yang selanjutnya dilakukan analisa untuk dapat mengetahui pengaruh ketebalan lapisan persambungan. Diharapkan dari penelitian ini dapat memberikan kontribusi untuk pengembangan dan penyempurnaan dalam desain dan pemodelan perangkat semikonduktor, sehingga dapat memberikan informasi dan pemodelan yang sesuai dengan kondisi riil.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang kegiatan penelitian seperti yang telah diuraikan pada bagian sebelumnya, perumusan masalah yang ingin diselesaikan adalah bagaimanakah pengaruh variasi ketebalan terhadap karakteristik semikonduktor p^+ -GaAs/ n^+ -Si *heterojunction* untuk persambungan sel surya berbasis Si/GaAs yang diperoleh dari hasil simulasi menggunakan Archimedes 2.0.1.

1.3 Batasan Masalah

Adapun yang menjadi batasan masalah dalam kegiatan penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Objek yang diinvestigasi berupa semikonduktor p^+ -GaAs/ n^+ -Si *heterojunction* untuk persambungan sel surya tandem berbasis Si/GaAs;
- b. Simulasi yang dilakukan menggunakan aplikasi Archimedes 2.0.1, di mana menggunakan persamaan Poisson non-stasioner yang dikombinasikan dengan metode statistik Monte Carlo;
- c. Variasi ketebalan yang digunakan untuk Si adalah 80, 100, 125, 225, 325, 425 dan 525 μm . Sedangkan untuk epitaksi GaAs adalah 0.04, 0.08, 0.1, 0.2, 0.3, dan 0.4 μm .

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian dilaksanakan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh variasi ketebalan lapisan terhadap karakteristik semikonduktor p^+ -GaAs/ n^+ -Si *heterojunction* untuk diaplikasikan sebagai persambungan pada sel surya tandem berbasis Si/GaAs yang diperoleh dari hasil simulasi menggunakan Archimedes 2.0.1.

1.5 Manfaat Penelitian

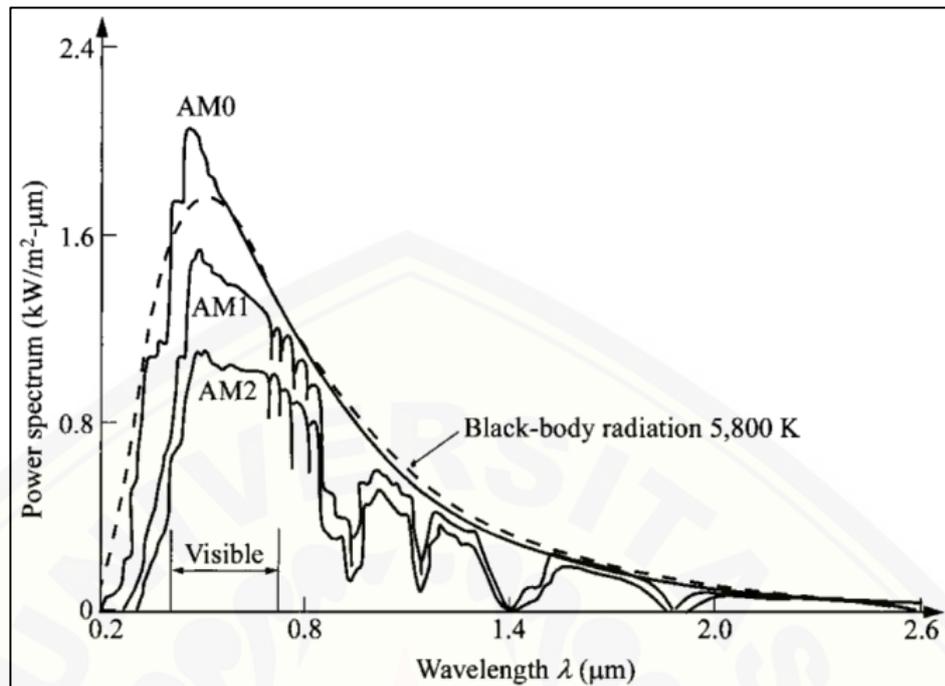
Manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian ini adalah untuk memberikan kontribusi di bidang ilmu fisika (material semikonduktor), khususnya di bidang pemodelan komputasi yang berkenaan dengan investigasi material dalam bentuk perangkat semikonduktor menggunakan Archimedes 2.0.1. Selain itu dapat digunakan untuk interpretasi awal dalam eksplorasi material semikonduktor sebelum dilakukan secara eksperimen.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sel Surya (*Solar Cell*)

Seiring dengan perkembangan kebutuhan akan energi di seluruh dunia terus bertambah, sumber energi konvensional seperti bahan bakar fosil lambat laun akan habis. Oleh karena itu dibutuhkan solusi alternatif sumber energi, yang merupakan sumber energi dari alam yang dimanfaatkan dalam jangka waktu yang panjang, yaitu matahari. Cahaya matahari merupakan sumber energi yang melimpah di bumi, dalam satu jam energi yang dipancarkan matahari ke bumi sekitar $4,3 \times 10^{20}$ J, sedangkan konsumsi energi di bumi dalam satu tahun sekitar $4,1 \times 10^{20}$ J. Selain itu, matahari merupakan sumber energi yang ramah lingkungan, terbarukan dan gratis. Untuk memanfaatkan potensi energi matahari yang begitu besar dibutuhkan perangkat yang khusus yang mampu menangkap radiasi sinar matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik, yaitu sel surya. Sel surya bekerja menggunakan prinsip fotovoltaik. Fenomena fotovoltaik ini pertama kali diamati oleh Edmund Becquerel pada tahun 1839. Foton dengan energi lebih besar dari energi gap dapat mengeksitasi elektron dari pita valensi menuju pita konduksi, di mana nantinya elektron-elektron tersebut dapat keluar dari perangkat dalam bentuk daya listrik.

Parameter penting yang berhubungan dengan sel surya adalah jumlah intensitas radiasi energi matahari. Intensitas radiasi energi matahari di luar angkasa pada jarak rata-rata dari matahari ke bumi sebesar 1.353 W/m^2 . Atmosfer melemahkan sinar matahari ketika mencapai permukaan bumi. Derajat pengaruh atmosfer terhadap sinar matahari saat mencapai permukaan bumi dinyatakan dalam besaran massa udara (AM) (Sze, 2007).



Gambar 2.1 Spektrum panjang gelombang radiasi matahari pada keadaan massa udara yang berbeda (Thekaekara, 1968)

Untuk mengkonversi panjang gelombang menjadi energi foton, digunakan hubungan

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{1,24}{h\nu (eV)} \mu\text{m} \quad (1.1)$$

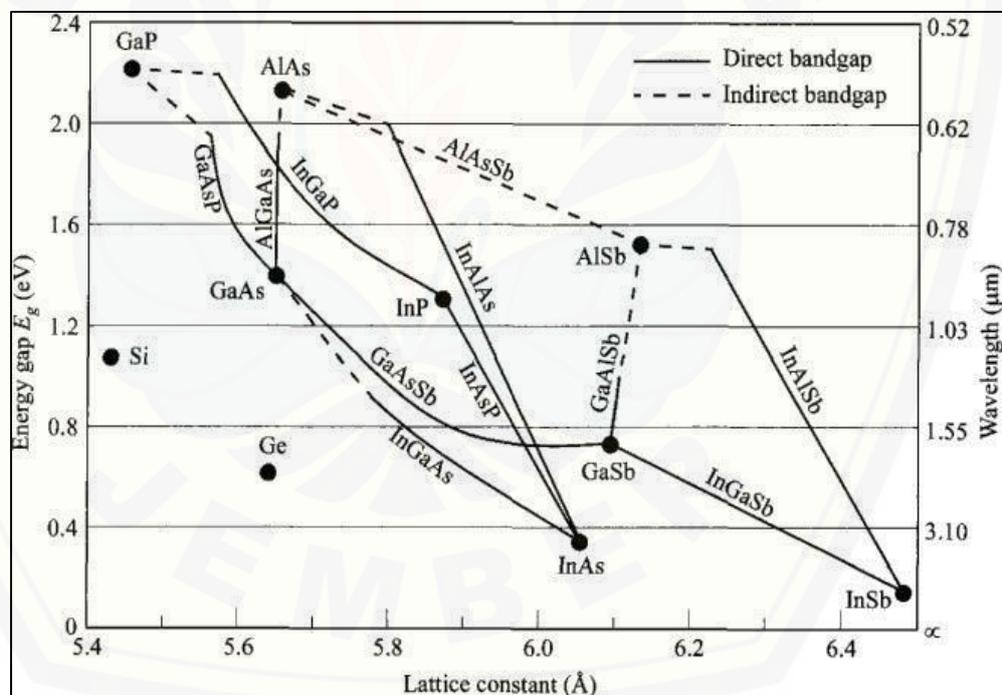
di mana, λ merupakan panjang gelombang (μm), c merupakan kecepatan cahaya dalam ruang hampa (m/s) dan h konstanta Plank ($6,626 \times 10^{-34}$ Js). Total daya untuk AM1.5 adalah 844 W/m^2 .

2.2 Sel Surya Tandem (Multijunction)

Sel surya konvensional, berjenis persambungan p-n dengan hanya memiliki satu energi *gap* E_g . Ketika sel ini dikenai spektrum radiasi matahari maka panjang gelombang diteruskan dalam lapisan sel dan hanya elektron dengan nilai energi tertentu yang akan tereksitasi. Sel surya konvensional memiliki kemampuan yang terbatas dalam mengabsorpsi foton, sehingga berdampak pada nilai efisiensinya. Berbagai upaya dilakukan agar sel surya memiliki kemampuan absorpsi foton

yang tinggi dengan memperkecil nilai rekombinasi dan refleksi serta memperbesar konduktivitas material yang digunakan sebagai sel surya.

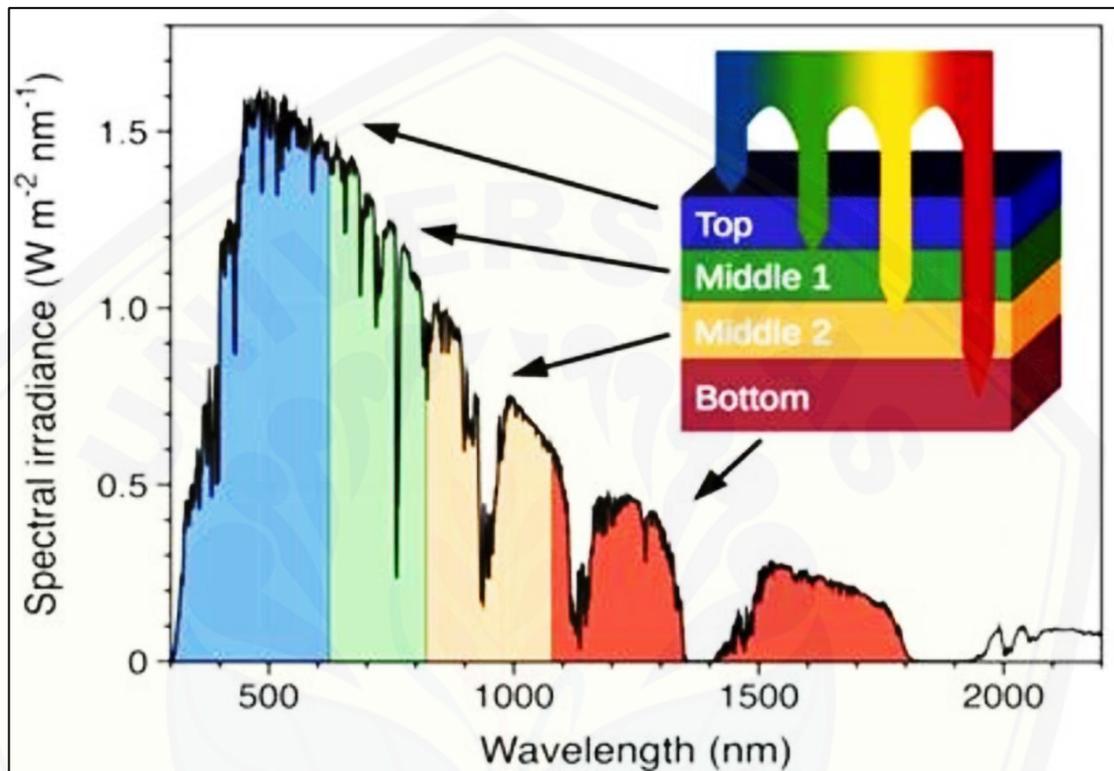
Salah satu bentuk upaya meningkatkan kemampuan absorpsi foton adalah dengan desain sel surya tandem. Sel surya tandem merupakan desain sel surya dengan beberapa persambungan p-n yang dibuat dari material semikonduktor yang berbeda. Ide dasar dari penggunaan material semikonduktor yang berbeda ditujukan untuk mendapatkan maksimum foton dari spektrum panjang gelombang radiasi matahari. Material semikonduktor sering dipilih untuk digunakan sebagai sel surya karena memiliki kemampuan untuk menyerap energi cahaya pada elektron dan *hole*-nya dan mengkonversinya menjadi arus listrik (Andreev, 2012). Gambar 2.2, menunjukkan beberapa material semikonduktor dengan energi gap berbeda.



Gambar 2.2 Energi gap, konstanta kisi dan panjang gelombang beberapa material semikonduktor

Upaya untuk mendapatkan optimal foton, maka absorber harus memiliki panjang gelombang yang lebar dengan energi gap yang kecil (Yang *et al.*, 2015). Sel surya tandem terdiri atas beberapa susunan persambungan p-n, di mana pada lapisan teratas adalah material yang memiliki energi gap yang terbesar agar dapat

mengabsorpsi radiasi matahari dengan panjang gelombang yang rendah. Lalu dilanjutkan dengan material yang memiliki energi gap yang lebih rendah dari lapisan pertama dengan tujuan mengabsorpsi radiasi matahari dengan panjang gelombang yang lebih besar (Kurtz and Geisz, 2010), lihat gambar 2.3.



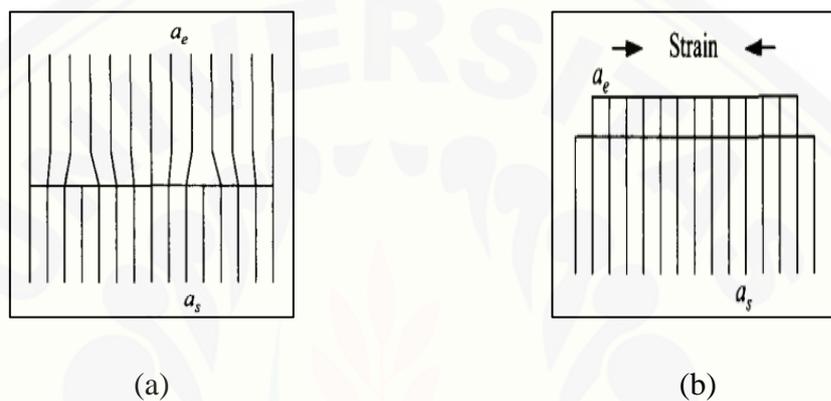
Gambar 2.3 Material sel surya tandem mengabsorpsi spektrum panjang gelombang radiasi matahari berbeda-beda (Kurtz and Geisz, 2010).

2.3 Semikonduktor Heterojunction

Pemilihan material tentunya menjadi sangat penting dalam desain sel surya tandem, selain meninjau energi gap material, konstanta kisi material juga perlu diperhatikan, hal ini dikarenakan berkaitan dengan persambungan p-n yang terbentuk. Sebagaimana ide dasar dari desain sel surya tandem dengan menggunakan material yang berbeda, maka di sinilah akan terbentuk persambungan p-n *heterojunction*.

Kombinasi yang baik untuk perangkat *heterojunction* adalah dua material semikonduktor dengan konstanta kisi yang sama tetapi memiliki energi gap yang berbeda. Konstanta kisi dari beberapa semikonduktor yang sering digunakan

ditunjukkan pada Gambar 2.2. Namun, meskipun material semikonduktor yang digunakan memiliki nilai konstanta kisi yang berbeda, persambungan *heterojunction* dengan kualitas yang baik masih dapat dihasilkan, dengan syarat ketebalan lapisan haruslah cukup tipis. Secara fisik lapisan dengan ketebalan tipis memiliki derajat meregang yang cukup tinggi, sehingga konstanta kisi menjadi sama dengan konstanta substrat dan ketika hal ini terjadi dislokasi dapat dihilangkan, lihat gambar 2.4.



Gambar 2.4 Dua material dengan ketidakcocokan konstanta kisi a_s dan a_e (a) ketebalan lapisan sangat tebal, memiliki dislokasi antar muka (b) ketebalan lapisan tipis, peregangan terjadi sehingga tidak terjadi dislokasi (Sze, 2007).

Ketidakcocokan kisi (*lattice mismatched*) menjadi perlu diperhatikan agar tidak terjadi dislokasi karena adanya *trap* yang terbentuk. Dislokasi akan mempengaruhi distribusi elektron dalam perangkat. Ketidakcocokan kisi (Δ) dapat didefinisikan sebagai

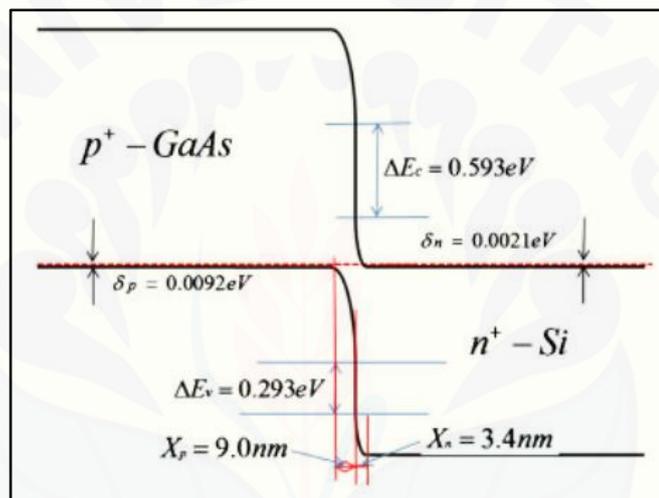
$$\Delta \equiv \frac{|a_e - a_s|}{a_e} \quad (2.2)$$

a_e dan a_s merupakan konstanta kisi lapisan epitaksi dan substrat. Sehingga, ketebalan kritis dapat dituliskan dengan persamaan berikut

$$t_c \approx \frac{a_e}{2\Delta} \approx \frac{a_e^2}{2|a_e - a_s|} \quad (2.3)$$

(Sze, 2007).

Ketika persambungan terbentuk antara dua material semikonduktor yang berbeda, pita energi dapat terbentuk. Elektron akan mengalir dari semikonduktor dengan konsentrasi tinggi menuju semikonduktor dengan konsentrasi rendah. Sedangkan *hole* berlaku sebaliknya. Aliran elektron meninggalkan muatan positif, sedangkan aliran *hole* meninggalkan muatan negatif pada daerah antarmuka. Semakin banyak elektron dan *hole* yang berdifusi, kekuatan medan listrik meningkat hingga komponen arus elektron dan *hole* persis sama dan berlawanan dengan masing-masing komponen difusi. Ketika ini terjadi, persambungan berada dalam keseimbangan.



Gambar 2.5 Diagram pita energi semikonduktor p^+ -GaAs/ n^+ -Si *heterojunction* dengan energi gap berbeda (Liang *et al.*, 2015).

Keberadaan medan listrik dan potensial elektrostatik ditunjukkan dengan terjadinya pita bending pada daerah deplesi. Perhatikan juga bahwa tingkat Fermi dalam keseimbangan adalah rata dan konstan di seluruh perangkat. Tingkat vakum juga mengalami perubahan (pembengkokan), menanggapi medan listrik, seperti yang ditunjukkan Gambar 2.5.

Perbedaan potensial pada level Fermi antara semikonduktor tipe-p dan tipe-n disebut potensial barrier (ψ_{bi}). Potensial barrier merupakan penjumlahan secara parsial dari potensial barrier ($\psi_1 + \psi_2$), di mana ψ_1 dan ψ_2 adalah potensial elektrostatik semikonduktor 1 dan semikonduktor 2 dalam keadaan setimbang, gambar 2.5. Persamaan dapat dituliskan secara umum sebagai berikut

$$q\psi_{bi} = kT \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (2.4)$$

(Lundstrom, 2013).

Lebar daerah persambungan yang terbentuk dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan Poisson dengan syarat batas kontinuitas dari pergeseran listrik, di mana $\mathcal{D}_1 = \mathcal{D}_2 = \varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2$ pada daerah antarmuka

$$W_{D1} = \left[\frac{2N_{A2}\varepsilon_{s1}\varepsilon_{s2}(\phi_{bi} - V)}{qN_{D1}(\varepsilon_{s1}N_{D1} + \varepsilon_{s2}N_{A2})} \right]^{1/2} \quad (2.5)$$

$$W_{D2} = \left[\frac{2N_{D1}\varepsilon_{s1}\varepsilon_{s2}(\phi_{bi} - V)}{qN_{A2}(\varepsilon_{s1}N_{D1} + \varepsilon_{s2}N_{A2})} \right]^{1/2} \quad (2.6)$$

di mana, k adalah konstanta Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K), T temperatur (K), n_i konsentrasi intrinsik pembawa muatan (cm^{-3}), ε_{s1} dan ε_{s2} permitivitas semikonduktor 1 dan permitivitas semikonduktor 2 (F/cm), N_A konsentrasi akseptor (cm^{-3}), N_D konsentrasi donor (cm^{-3}) dan V potensial aplikasi (volt) (Sze, 2007).

Dengan mengingat arus yang mengalir, gambar 2.5, menunjukkan pita konduksi meningkat secara monoton meskipun pada pita valensi melewati beberapa puncak di dekat persambungan. Arus total (J) diperoleh

$$J = J_n + J_p = \left(\frac{qD_{n2}n_{i2}^2}{L_{n2}N_{A2}} + \frac{qD_{p1}n_{i1}^2}{L_{p1}N_{D1}} \right) \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.7)$$

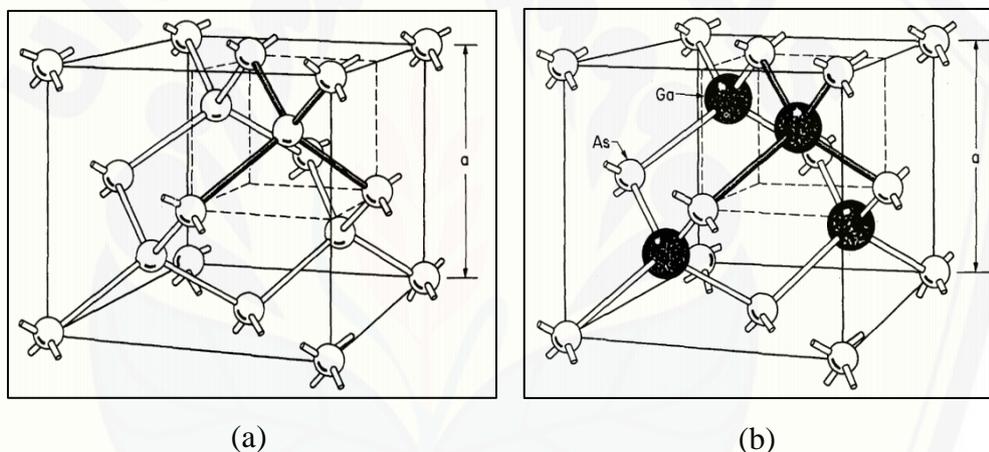
(Sze, 2007).

2.4 Material Semikonduktor Silikon (Si) dan Gallium Arsenide (GaAs)

Silikon dan Gallium Arsenide merupakan material semikonduktor yang sangat penting dan sering digunakan pada perangkat elektronik dan *integrated circuits*. Hal ini bukan tanpa alasan, dengan meninjau sifat-sifat materialnya dan kemapanan teknologinya kedua material ini layak dikelompokkan sebagai material unggul daripada material semikonduktor lainnya.

2.4.1 Struktur Kristal Silikon (Si) dan Gallium Arsenide (GaAs)

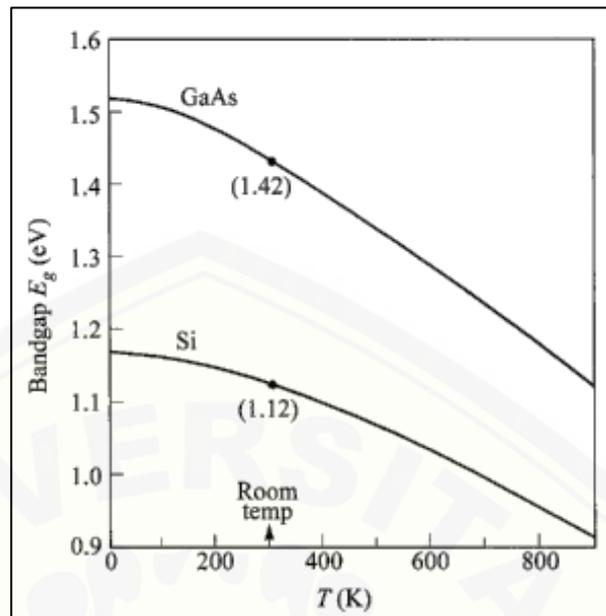
Struktur kristal ditandai dengan penempatan atom secara berkala dan terstruktur dengan baik. Beberapa semikonduktor penting memiliki struktur kristal *diamond* atau *zincblende*, yang termasuk dalam fase tetrahedral, di mana setiap atom dikelilingi oleh empat tetangga terdekat berjarak sama yang terletak pada sudut tetrahedron. Si memiliki struktur kristal *diamond*, gambar 2.6(a), tersusun atas atom yang sama. Sedangkan material semikonduktor paduan seperti GaAs memiliki struktur kristal *zincblende* (Willardson and Beer, 1966), tersusun atas atom Ga pada salah satu dari sub-kisinya dan pada sub-kisi lainnya tersusun atas atom As, gambar 2.6(b).



Gambar 2.6 Struktur kristal (a) diamond (b) *zincblende* (Sze, 2007).

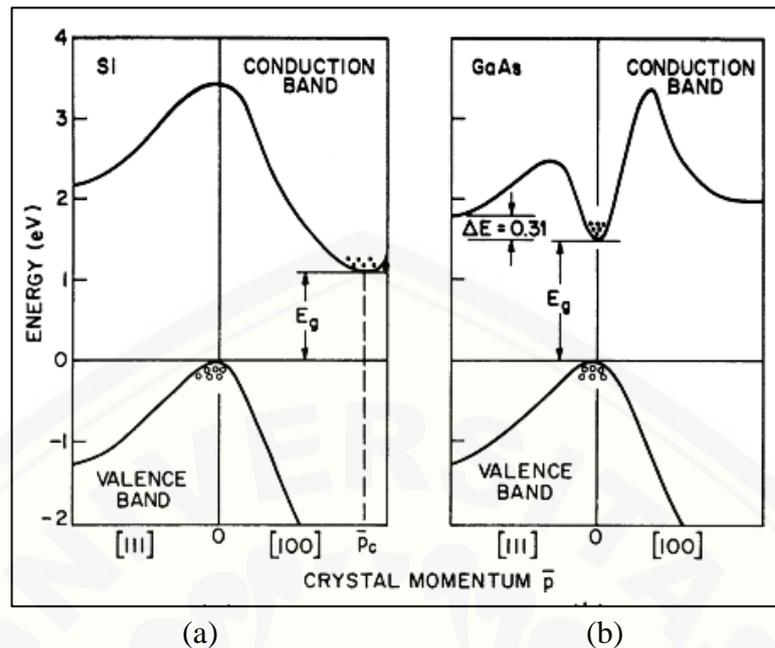
2.4.2 Pita Energi dan Energi Gap

Pita energi terbagi menjadi dua bagian yaitu pita valensi dan pita konduksi, sedangkan daerah yang memisahkan pita valensi dan pita konduksi disebut *bandgap*, E_g . Pada semikonduktor memiliki *bandgap* lebih kecil daripada insulator dan energi termal dapat mengeksitasi elektron ke pita konduksi. Bandgap pada semikonduktor dipengaruhi oleh temperatur, semakin tinggi temperatur semakin kecil *bandgap*-nya, Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Pita energi Silikon dan GaAs terhadap fungsi temperatur

Struktur pita energi pada Si, gambar 2.8(a), memiliki minimum pita konduksi dan maksimum pita valensi dengan momen kristal yang berbeda disebut *indirect bandgap*. Hal ini dikarenakan, diperlukan perubahan momentum kristal untuk transisi elektron antara pita valensi dan pita konduksi. Berbeda dengan GaAs yang memiliki struktur pita *direct*, untuk transisi elektron tidak memerlukan perubahan momentum kristal sehingga lebih efisien (Thurmond, 1975), gambar 2.8(b).



Gambar 2.8 Struktur pita energi (a) Si (b) GaAs (Thurmond, 1975)

2.5 Konsep Model Fisika pada Archimedes

Paket GNU Archimedes merupakan simulator 2D Monte Carlo untuk perangkat semikonduktor dalam skala submikron hingga skala nano. Simulator ini dapat mensimulasikan transport *elektron* dan *hole* pada Silikon (Si), Gallium Arsenid (GaAs), Germanium (Ge), InSb, AlAs, $\text{Al}_x\text{In}_x\text{Sb}$, $\text{Al}_x\text{In}_{(1-x)}\text{Sb}$, InP dan GaP. Dinamika partikel dipasangkan dengan potensial elektrostatik dengan cara mensimulasikan persamaan Poisson non-stasioner. Solusi dari persamaan ini diperoleh dengan sederhana tapi sangat baik hasilnya dengan pendekatan metode beda hingga (*finite different*).

Penyelesaian antara transport elektron dan komputasi medan listrik dari distribusi *elektron-hole* menjadi sangat penting. Hal ini dikarenakan transport muatan di dalam perangkat semikonduktor sangat bergantung pada medan listrik, sehingga jika medan listrik yang dipasangkan dengan dinamika muatan tidak benar, maka semua hasil simulasi akan menjadi tidak berguna. Simulator-simulator yang sangat tepat dan prediktif untuk mensimulasikan fenomena ini hampir selalu menggunakan sistem Schrodinger-Poisson. Namun, hal ini memiliki permasalahan penting yang perlu diperhatikan, yakni dalam pengaplikasian syarat batas untuk persamaan Schrodinger dan hal ini sangat sulit, untuk beberapa

proses, tidak memungkinkan untuk memperhitungkan semua kejadian hamburan yang relevan. Selain itu, penyelesaian solusi sistem Schrodinger-Poisson merupakan tugas yang sangat sulit baik secara analitik maupun dari sisi numeriknya. Hal ini juga akan membutuhkan memori komputer yang sangat besar.

2.5.1 Metode Monte Carlo

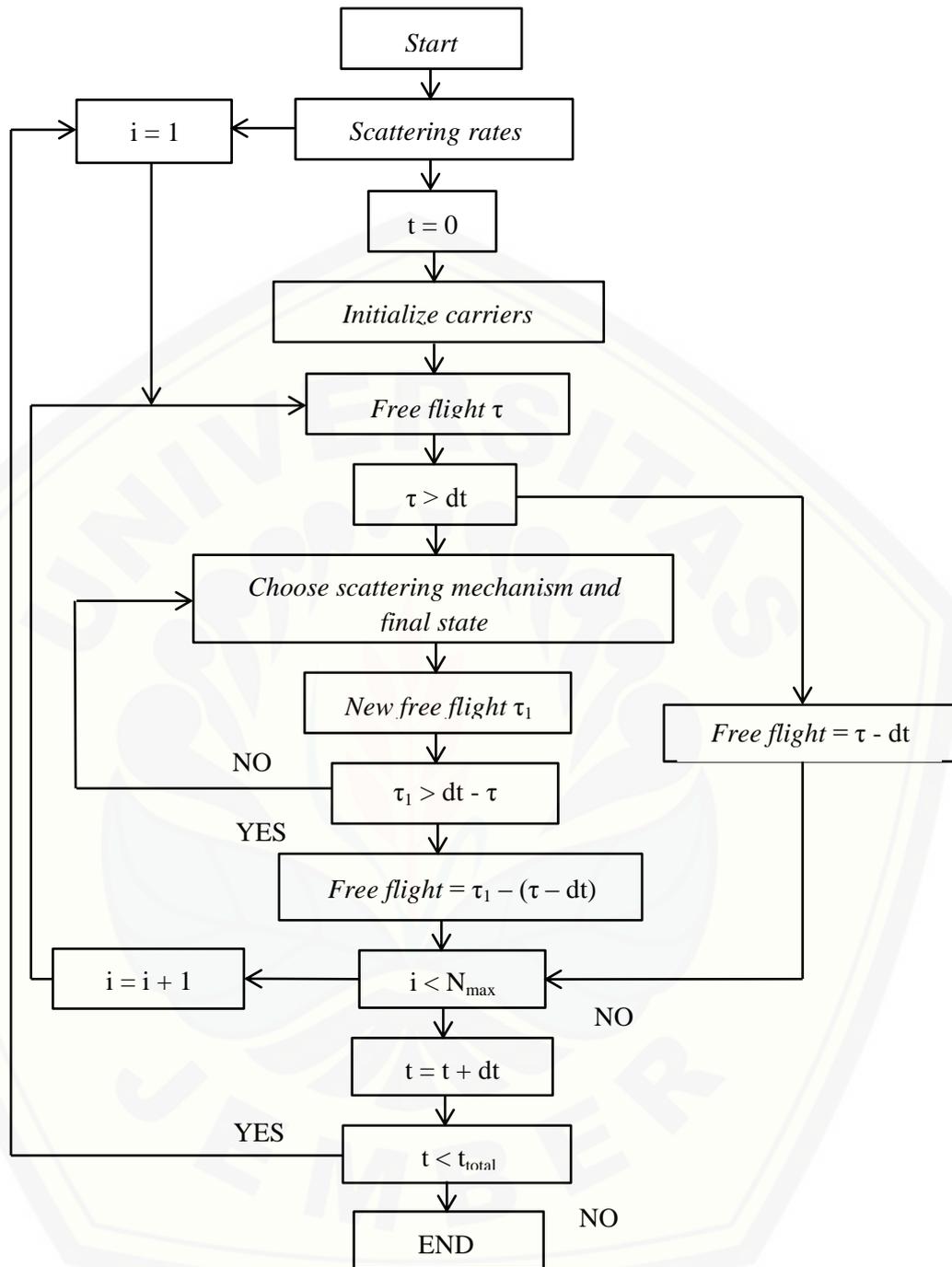
Archimedes menggunakan metode Monte Carlo untuk menyelesaikan permasalahan transport elektron dalam simulasinya. Metode ini didasarkan pada perhitungan simultan dari beberapa partikel dinamik selama interval waktu tertentu. Metode ini dapat digunakan untuk mendapatkan solusi stasioner dan transien dari persamaan transport Boltzmann yang diaplikasikan pada perangkat semikonduktor (Jacoboni and Reggiani, 1983). Metode Monte Carlo dapat dipandang sebagai metode statistik semi-klasik. Klasik, karena partikel diperlakukan sebagai partikel klasik yang terhambur dari pusat hamburan. Semi-klasik, karena menggunakan probabilitas hamburan yang dihitung secara kuantum (*Fermi golden rule*). *Flow chart* Monte Carlo pada Gambar 2.9.

Metode Monte Carlo digunakan untuk menyelesaikan transport elektron dengan menganggap gerak dari elektron dideskripsikan oleh dua kuantitas yang merupakan variabel yang kontinyu, yakni vektor posisi dan vektor *pseudo-wave*. Persamaan berikut mendeskripsikan evolusi kedua kuantitas ini dalam ruang dan waktu sebagai

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = \frac{1}{\hbar} \nabla_{\bar{k}} \varepsilon(\bar{k}) \quad (2.8)$$

$$\frac{d\bar{k}}{dt} = \frac{q\bar{E}}{\hbar} \quad (2.9)$$

di mana, \hbar konstanta Planck dan \bar{E} medan listrik. Bagian dari metode Monte Carlo ini dikenal sebagai proses *drift* (Sellier, 2007).



Gambar 2.9 Diagram metode Monte Carlo (Sellier, 2007).

2.5.2 Metode Monte Carlo dan Poisson Non-Stasioner

Sebagaimana yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa Archimedes menggunakan metode Monte Carlo dalam simulasinya, di mana hal ini dapat mensimulasikan solusi dalam keadaan *transient* dan *steady state*. Dinamika partikel dipasangkan terhadap potensial elektrostatik dengan cara mensimulasikan persamaan Poisson non-stasioner. Persamaan Poisson non-stasioner sangat mudah diimplementasikan dibandingkan dengan persamaan Poisson stasioner. Hal ini dikarenakan solusi persamaan Poisson stasioner menjadi sangat rumit penyelesaiannya disebabkan syarat batas yang sulit diimplementasikan dalam simulator secara umum, selain itu sistem aljabarnya membutuhkan konsumsi memori komputer yang sangat besar. Persamaan Poisson non-stasioner dituliskan sebagai berikut

$$\frac{1}{k_s} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot [\epsilon(x) \nabla \phi(x, t)] = -q [N_D(x) - N_A(x) - n(x, t) + p(x, t)] \quad (2.10)$$

di mana, k_s merupakan konstanta untuk memberikan dimensi yang tepat dari $\frac{\partial \phi}{\partial t}$. Solusi dari persamaan Poisson non-stasioner ini didapatkan dengan menggunakan pendekatan beda hingga (*finite difference*). Dalam konteks pendekatan beda hingga dapat dituliskan sebagai berikut

$$\frac{\partial \phi}{\partial t}(x_i, y_j) = \frac{\phi_{i,j}^{n+1} - \phi_{i,j}^n}{\Delta t} \quad (2.11)$$

$$\nabla^2 \phi(x_i, y_j, t^n) = \frac{\phi_{i+1,j}^n - 2\phi_{i,j}^n + \phi_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + \frac{\phi_{i,j+1}^n + 2\phi_{i,j}^n + \phi_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} \quad (2.12)$$

di mana, $\phi_{i,j}^n$ adalah potensial yang dikomputasikan pada waktu $t^n = t_i + n\Delta t$ pada titik (x_i, y_j) . Dengan menggunakan pendekatan ini terhadap persamaan (2.12) didapatkan

$$\begin{aligned} \phi_{i,j}^{n+1} = \phi_{i,j}^n + \Delta t (-\epsilon_{i,j} & \left(\frac{\phi_{i+1,j}^n - 2\phi_{i,j}^n + \phi_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + \frac{\phi_{i,j+1}^n + 2\phi_{i,j}^n + \phi_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} \right) \\ & - q [N_{Di,j} - N_{Ai,j} - n_{i,j}^n + p_{i,j}^n]) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Setelah mendapatkan solusi dari persamaan Poisson non-stasioner medan listrik menjadi lebih mudah untuk dikomputasikan, dengan mendefinisikan medan listrik

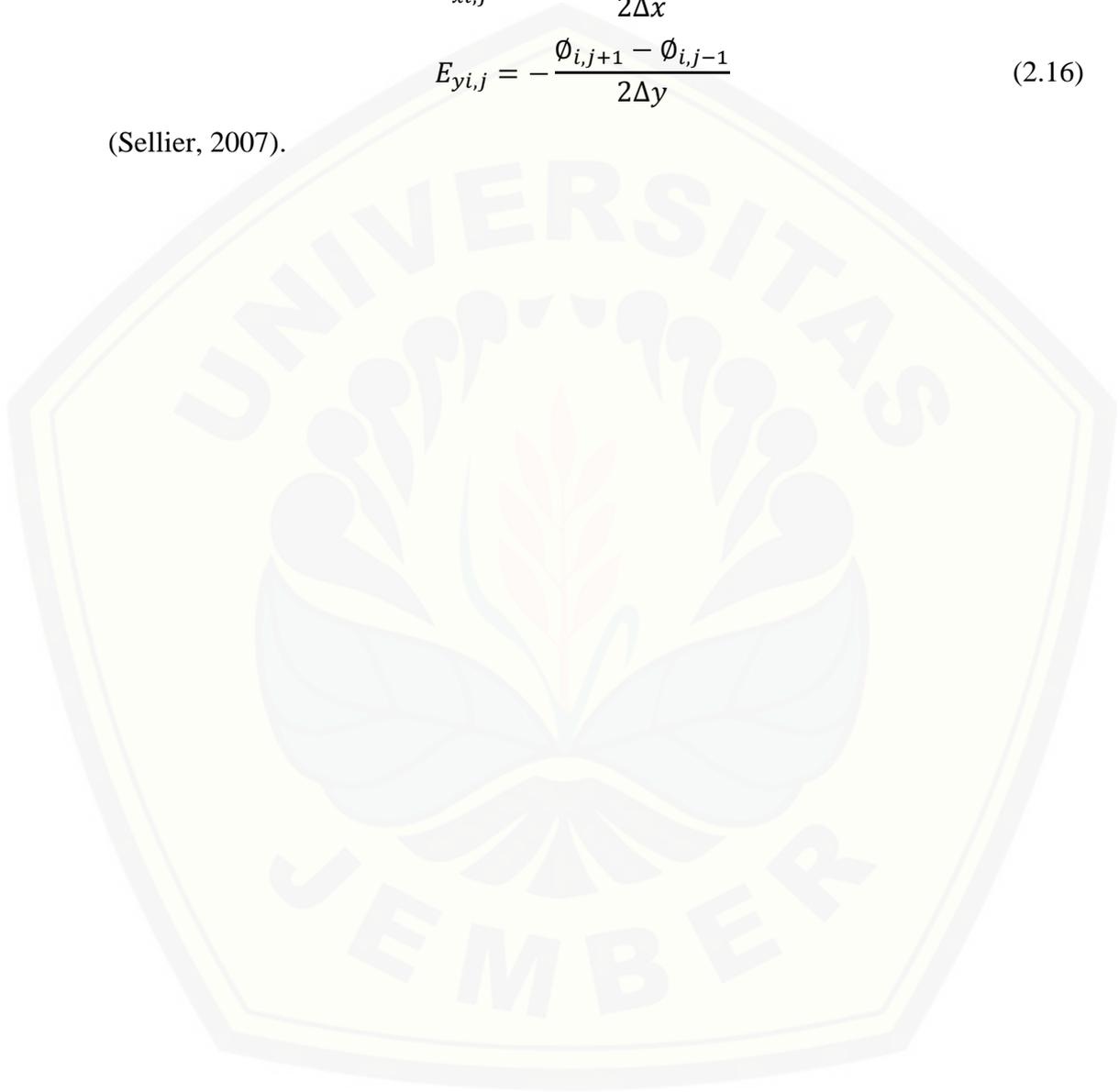
$$E(x, y) = -\nabla\phi(x, y) \quad (2.14)$$

Sehingga, pada pendekatan beda hingga, mengkomputasikan medan listrik pada berbagai sel dari grid

$$E_{xi,j} = -\frac{\phi_{i+1,j} - \phi_{i-1,j}}{2\Delta x} \quad (2.15)$$

$$E_{yi,j} = -\frac{\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j-1}}{2\Delta y} \quad (2.16)$$

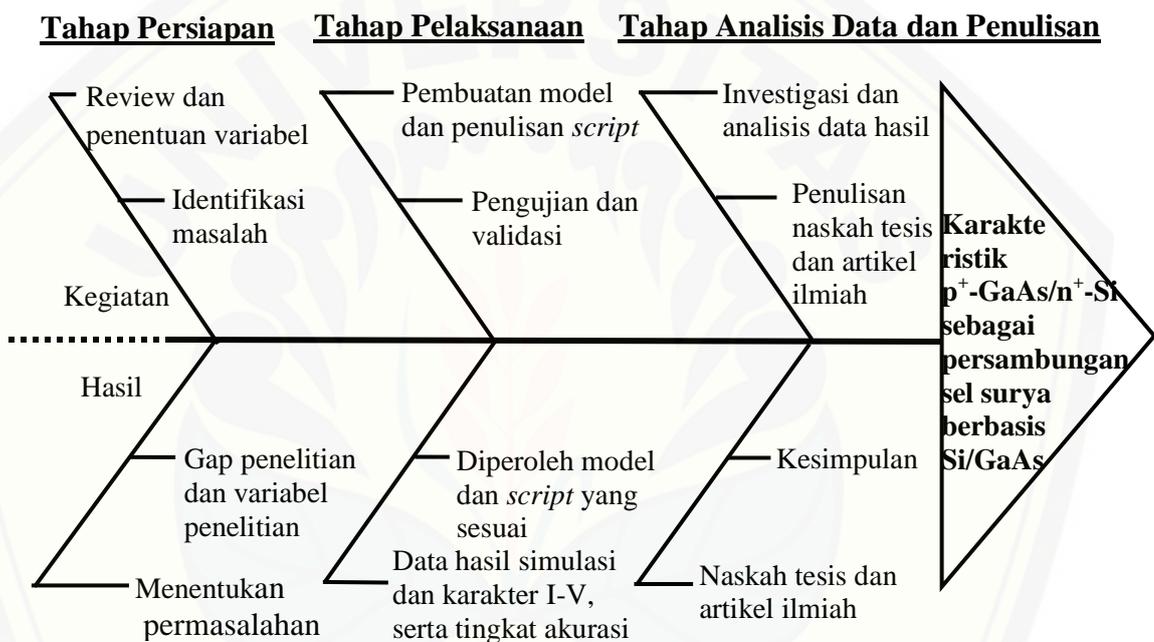
(Sellier, 2007).



BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Di dalam penelitian ini terdapat tiga tahapan yang harus dilakukan, yakni tahap persiapan, tahap pelaksanaan dan tahap analisa, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram *fishbone* penelitian

Tahapan pertama yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu melakukan *review* terhadap publikasi pada jurnal untuk menemukan *gap* penelitian yang kemudian digunakan sebagai topik dalam penelitian ini. Langkah menentukan variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian. Langkah terakhir dari tahap persiapan ini adalah identifikasi masalah yang kemudian digunakan untuk memperoleh permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini.

Tahap kedua, penelitian berupa pembuatan model dan penulisan *script*. Pada aplikasi Archimedes 2.0.1 pembuatan model perangkat seperti menentukan geometri struktur perangkat p^+-GaAs/n^+-Si *heterostructures* dilakukan hanya

dengan mendeskripsikannya melalui penulisan *script*. Seperti panjang dan lebar perangkat, pendefinisian daerah tipe-p dan tipe-n melalui batas geometri, penentuan material dan konsentrasi pembawa muatan, pendefinisian variasi kontak yang digunakan dan temperatur yang digunakan. Setelah pembuatan model dan penulisan *script* telah dilakukan, maka langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian. Hasil simulasi yang diperoleh, berupa densitas elektron dan potensial yang kemudian dianalisa. Data densitas elektron akan digunakan untuk menentukan daerah deplesi perangkat, yang kemudian digunakan untuk menentukan nilai potensial pada daerah deplesi. Dengan menggunakan persamaan 2.7 yang disederhanakan menjadi

$$J = J_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (3.1)$$

di mana, J merupakan rapat arus (A/cm^2), J_0 merupakan rapat arus saturasi (A/cm^2), q merupakan muatan ($1,6 \times 10^{-19}$ C), V merupakan potensial (volt), k merupakan konstanta Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K) dan T temperatur (K) (Puri and Babbar, 2000). Sehingga, karakteristik I-V didapatkan. Validasi dilakukan terhadap karakteristik I-V hasil simulasi dan hasil eksperimen yang dilakukan oleh (Liang *et al.*, 2015) dan didapatkan keakurasiannya.

Tahap ketiga penelitian berupa tahap analisa dan penulisan hasil. Pada tahap ini dilakukan analisa lebih dalam terhadap hasil simulasi yang didapatkan yang mengarah pada pengaplikasian p^+ -GaAs/ n^+ -Si *heterostructures* sebagai persambungan p-n. Dari tahap analisa diperoleh informasi mengenai potensi p^+ -GaAs/ n^+ -Si *heterostructures* sebagai persambungan p-n melalui distribusi pembawa muatan, potensial barrier dan energi. Selanjutnya, penarikan kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan yang kemudian disajikan dalam bentuk laporan akhir, naskah tesis dan artikel ilmiah.

3.2 Jenis dan Sumber Data

Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini bersifat kuantitatif, hal ini dikarenakan data disimulasikan dan dianalisa secara langsung yang kemudian dinyatakan dalam bentuk gambar dan grafik oleh peneliti. Data hasil penelitian ini merupakan data yang diperoleh dari hasil simulasi perangkat semikonduktor, Archimedes 2.0.1 dan analisis visualisasi gambar dan grafik.

Sumber data yang diperoleh dari penelitian ini berasal dari hasil penelitian secara objektif dan termasuk data sekunder. Data penelitian ini langsung dikumpulkan oleh peneliti dari hasil simulasi dan analisis gambar dan grafik.

3.3 Definisi Operasional Variabel

Terdapat 3 macam variabel yang digunakan dalam penelitian ini yaitu variabel bebas, variabel terikat dan variabel kontrol yang masing-masing dijelaskan sebagai berikut.

a. Variabel Bebas

Variabel bebas dalam penelitian dapat mempengaruhi terjadinya perubahan pada variabel terikat. Dalam penelitian ini variabel bebas adalah variasi ketebalan lapisan GaAs (0.04, 0.08, 0.1, 0.2, 0.3 dan 0.4 μm), ketebalan Si (80, 100, 125, 225, 325, 425 dan 525 μm).

b. Variabel Terikat

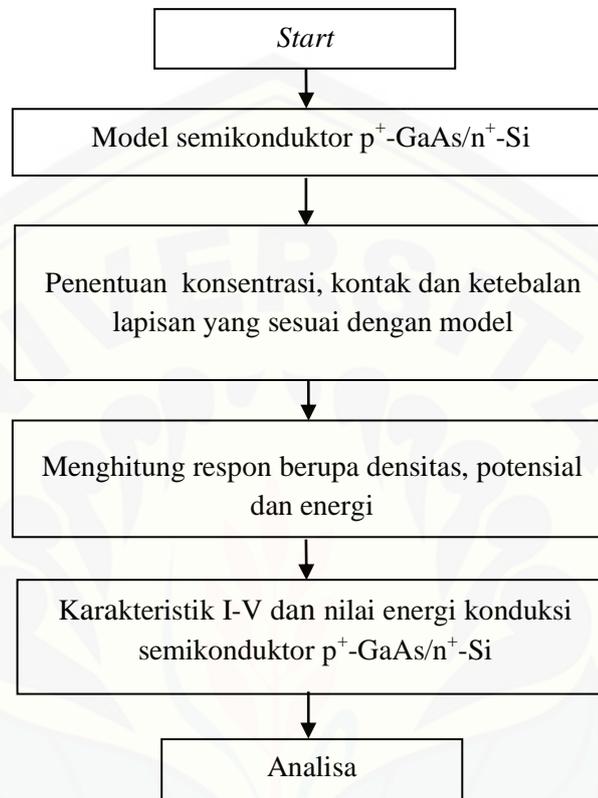
Variabel terikat merupakan variabel dalam penelitian yang diamati dan dianalisa dalam penelitian ini untuk menentukan ada tidaknya pengaruh dari variabel bebas. Densitas, potensial barrier dan energi pada perangkat adalah variabel dalam penelitian ini.

c. Variabel Kontrol

Temperatur sebagai variabel kontrol dalam penelitian ini, di mana dijadikan acuan untuk menentukan ada tidaknya pengaruh variabel bebas dan variabel terikat.

3.4 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan mengikuti diagram alir penelitian sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram prosedur penelitian

3.4.1 Pembuatan model penelitian

Dalam penelitian ini, kegiatan simulasi terhadap struktur *heterostructures* dilakukan dengan menggunakan Archimedes 2.0.1. Model akan memberikan respon yang berbeda-beda jika parameter divariasikan dan hubungan tersebut dapat dinyatakan secara matematis dalam bentuk persamaan diferensial. Adapun parameter yang menjadi input pemodelan berupa domain geometri, nilai konsentrasi pembawa muatan dan ketebalan lapisan persambungan p-n.

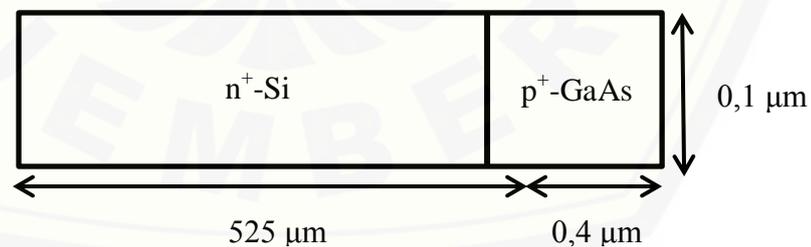
Prosedur awal dalam penelitian ini dilakukan dengan mengatur *axis* dan parameter input yang digunakan dalam kegiatan simulasi. Adapun parameter input yang digunakan dalam kegiatan simulasi ditunjukkan pada Tabel 3.1. Data dalam

tabel parameter input tersebut diperoleh dari penelitian sebelumnya secara eksperimen oleh (Liang *et al.*, 2015) sebagai acuan. Pada tabel 3.1 tersebut menunjukkan karakteristik semikonduktor p^+ -GaAs/ n^+ -Si *heterojunction*. Tahap selanjutnya adalah menggambarkan geometri pada perangkat p^+ -GaAs/ n^+ -Si *heterojunction* dalam struktur 2D. Struktur tersebut terdiri atas lapisan-p dan lapisan-n, dengan nilai konsentrasi dan ketebalan diatur sesuai tinjauan yang dilakukan.

Tabel 3.1 Parameter semikonduktor p^+ -GaAs/ n^+ -Si *heterostructures* (Liang *et al.*, 2015)

Parameter	Nilai
Panjang (p) x lebar (l) perangkat	525,4 x 0,1 μm
Ketebalan n^+ -Si (substrat)	525 μm
Ketebalan p^+ -GaAs (lapisan epitaksi)	0,4 μm
Konsentrasi pembawa muatan n^+ -Si	$2,61 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Konsentrasi pembawa muatan p^+ -GaAs	$1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

Pada gambar 3.3 dapat diamati bahwa lapisan-n menggunakan material Si dengan ketebalan 525 μm dan konsentrasi elektron $2,61 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, sedangkan material GaAs merupakan lapisan-p dengan ketebalan 0,4 μm konsentrasi elektron $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.



Gambar 3.3 Geometri struktur 2D dari p^+ -GaAs/ n^+ -Si *heterojunction* dengan panjang dan lebar perangkat 525,4 μm dan 0,1 μm .

Langkah selanjutnya adalah menentukan kontak perangkat, pada kode Archimedes kita menggambarkan kontak atau batas sebagai garis tepi pada

perangkat. Terdapat dua kontak yang digunakan pada penelitian ini, yaitu kontak ohmik dan insulator.

Setelah menentukan kontak pada perangkat, selanjutnya adalah didefinisikan dan diselesaikan persamaan dasar yang digunakan pada aplikasi Archimedes 2.0.1, yaitu persamaan Poisson non-stasioner. Solusi yang didapatkan dari persamaan dasar tersebut berupa distribusi konsentrasi pembawa muatan elektron, nilai potensial dan energi yang kemudian dilakukan analisa terhadap ketiga data tersebut, sehingga dapat diketahui karakteristik p^+ -GaAs/ n^+ -Si *heterojunction* terhadap variasi ketebalan Si dan GaAs, serta variasi konsentrasi pembawa muatannya. Dari hasil analisa yang diperoleh dapat ditentukan desain persambungan ideal yang diaplikasikan untuk sel surya tandem berbasis Si/GaAs.

3.4.2 Metode analisa

Tahapan analisa pada penelitian ini dibagi menjadi 4 langkah penting yang dijelaskan sebagai berikut:

- a. Analisa data simulasi digunakan untuk menentukan grafik densitas yang hubungan antara x-spasial terhadap densitas pada p^+ -GaAs/ n^+ -Si *heterojunction*.

Simulasi yang dilakukan menggunakan Archimedes 2.0.1 menghasilkan *file output* yang kemudian dianalisis dengan menggunakan software Origin. Analisis dilakukan untuk membuat grafik densitas agar dapat menentukan daerah deplesi p^+ -GaAs/ n^+ -Si *heterojunction* pada variasi ketebalan persambungan p-n.

- b. Analisis data simulasi digunakan untuk menentukan grafik hubungan antara x-spasial terhadap potensial pada variasi ketebalan persambungan p-n p^+ -GaAs/ n^+ -Si *heterojunction*.

File *output* dari hasil simulasi menggunakan Archimedes 2.0.1 juga menghasilkan nilai potensial yang kemudian dianalisa menggunakan software Origin. Analisis ini dilakukan untuk membuat grafik hubungan antara x-spasial

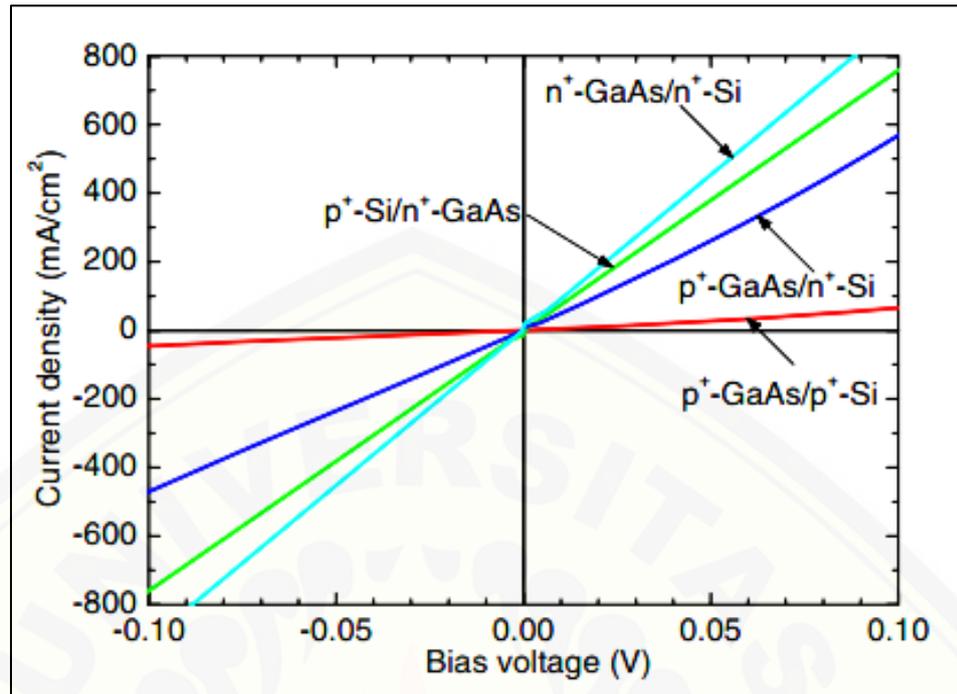
terhadap potensial pada variasi ketebalan persambungan p-n. Dengan menggunakan hasil analisis grafik densitas, nilai daerah deplesi pada variasi ketebalan dapat digunakan untuk menentukan nilai potensial di daerah persambungan.

- c. Analisis data simulasi digunakan untuk menentukan nilai energi p^+ -GaAs/ n^+ -Si *heterojunction* terhadap x-spasial sebagai persambungan p-n terhadap variasi ketebalannya.

File *output* dari hasil simulasi menggunakan Archimedes 2.0.1 juga menghasilkan nilai energi yang kemudian dianalisa menggunakan software Origin. Energi dalam Archimedes 2.0.1 merupakan energi konduksi atau energi barrier yang dihasilkan oleh gaya-gaya Coulomb dan diasosiasikan dengan konfigurasi sejumlah muatan-muatan dalam sistem yang didefinisikan. Dengan kata lain, dalam kasus penelitian ini energi di sini merupakan energi minimum yang dibutuhkan muatan untuk dapat menembus daerah persambungan. Sehingga, energi foton akan berkurang sebesar energi dalam persambungan tersebut dan sisanya dapat diteruskan pada sistem selanjutnya untuk dapat dikonversi menjadi energi listrik. Analisis ini dilakukan untuk membuat grafik hubungan antara x-spasial terhadap energi pada variasi ketebalan persambungan p-n. Dengan menggunakan hasil analisis grafik densitas, nilai daerah persambungan pada variasi ketebalan dapat digunakan untuk menentukan nilai energi di daerah persambungan.

- d. Analisis data simulasi digunakan untuk menentukan karakteristik I-V persambungan p-n, p^+ -GaAs/ n^+ -Si *heterojunction*.

Dari hasil analisa grafik densitas dan potensial akan didapatkan karakteristik I-V yang kemudian dengan menggunakan persamaan 3.1 akan didapatkan karakteristik I-V p^+ -GaAs/ n^+ -Si *heterojunction*. Profil grafik karakteristik I-V digambarkan pada gambar 3.4, merupakan hasil eksperimen yang telah dilakukan Liang *et al* pada tahun 2015. Hasil eksperimen tersebut digunakan sebagai acuan validasi hasil simulasi menggunakan Archimedes 2.0.1.



Gambar 3.4 Karakteristik I-V p⁺-GaAs/n⁺-Si heterojunction (Liang *et al.*, 2015)

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Pada penelitian ini telah dilakukan analisa dan investigasi terhadap hasil simulasi 2D menggunakan Archimedes 2.0.1 untuk mengetahui potensi $p^+ - Si/n^+ - GaAs$ *heterojunction* sebagai persambungan sel surya tandem. Analisa dan investigasi dilakukan lebih dalam terhadap pengaruh ketebalan lapisan epitaksi terhadap nilai rapat arus dan energi konduksi yang dihasilkan oleh persambungan $p^+ - Si/n^+ - GaAs$ *heterojunction*. Variasi ketebalan lapisan epitaksi memberikan respon yang berbeda terhadap nilai rapat arus dan energi konduksi yang dihasilkan. Berdasarkan analisa grafik karakteristik I-V dan energi konduksi, pembawa muatan pada semikonduktor $p^+ - GaAs/n^+ - Si$ *heterojunction* semakin mudah menembus barrier saat ketebalan lapisan semakin tipis sehingga menghasilkan arus yang semakin besar. Rendahnya energi konduksi pada persambungan $p^+ - GaAs/n^+ - Si$ *heterojunction* ini menunjukkan bahwa saat diaplikasikan pada sel surya tandem berbasis Si/GaAs dapat mentransfer energi dengan baik tanpa harus kehilangan banyak energi listrik.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari hasil analisa dan investigasi terhadap hasil simulasi menggunakan Archimedes 2.0.1 untuk mengetahui potensi semikonduktor $p^+ - GaAs/n^+ - Si$ *heterojunction* sebagai persambungan pada sel surya tandem, sebagai berikut :

- a. Penggunaan aplikasi Archimedes 2.0.1 dapat digunakan lebih dalam lagi untuk analisa perangkat semikonduktor seperti dioda, MOSFET dan MESFET.
- b. Perlu dilakukan pemilihan material lebih luas lagi untuk diaplikasikan, sehingga dapat mengetahui respon dan karakteristik suatu perangkat serta dapat memberikan informasi penggunaan material tertentu yang dapat menghasilkan kinerja terbaiknya pada perangkat semikonduktor tertentu.

- c. Penelitian terhadap pengaruh ketebalan lapisan, di mana variabel ketebalan material sama-sama diubah dapat dilakukan untuk dapat memperkirakan ketebalan optimumnya, sehingga didapatkan ketebalan yang sesuai untuk diaplikasikan pada sel surya agar mendapatkan efisiensi terbaiknya.



DAFTAR PUSTAKA

Buku

- Luque, A. dan Hegedus, S. (2003). *Handbook of Photovoltaic Science*. England: John Wiley & Sons Ltd.
- Sze, S. M. dan Ng, Kwok. K. (2007). *Physics of Semiconductor Devices Third Edition*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Willardson, R. K. dan Beer, A. C. (1966). *Semiconductors and Semimetals*. New York & London: Academic Press.
- Puri, R. K. dan Babbar, V. K. (2000). *Solid State Physics 1st Edition*. New Delhi: S.Chand&Company LTD.

Jurnal

- Aberle, A. G. *et al.* (2014). Design Criteria of GaAs on Silicon Tandem Solar Cells for Terrestrial Applications. *Light, Energy and Environment*, pp. 5–7.
- Alapatt, G. F., Singh, R. dan Poole, K. F. (2012). Fundamental Issues in Manufacturing Photovoltaic Modules Beyond The Current Generation of Materials. *Hindawi Publishing Corporation: Advances in OptoElectronics*. 2012, pp. 1-10.
- Andreev, V. M. (2012). GaAs and High Efficiency Space Cells, Practical Handbook of Photovoltaics. *Elsevier Ltd*. 397-416.
- Dimroth, F. dan Kurtz, S. (2007). High Efficiency Multijunction Solar Cells. *MRS Bulletin*. 32(March), pp. 230–235.
- Dobrzański, L. A. *et al.* (2006). Comparison of Electrical Characteristics of Silicon Solar Cells. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 18(1-2), pp. 215–218.
- Fraas, L. M. (2014). History of Solar Cell Development. *Springer International Publishing Switzerland*., pp. 1–12.
- Fraunhofer ISE. (2020). Solar Cell Table (Versions 1 to 55). Progress in Photovoltaics: Research and Application, 1993-2020.
- Foster, S. dan John, S. (2016). Light Trapping Design for Thin Film Silicon-Perovskite Tandem Solar Cells. *Journal Applied Physics*. 120(10).

- Jacoboni, C. dan Reggiani, L. (1983). The Monte Carlo Method For The Solution of Charge Transport in Semiconductors With Applications to Covalent Materials. *Reviews of Modern Physics*, 55(3), pp. 645–705.
- Kurtz, S. dan Geisz, J. (2010). Multijunction Solar Cells for Conversion of Concentrated Sunlight to Electricity. *National Center for Photovoltaic, National Renewable Energy Laboratory*. USA. 18(April), pp. 73–78.
- Liang, J. *et al.* (2013). Surface Activated Bonding Based Low Resistance Si/III-V Junctions. *Electronics Letters*. 49, pp. 830-832.
- Liang, J. *et al.* (2015). Investigation On The Interface Resistance of Si/GaAs Heterojunctions Fabricated by Surface Activated Bonding. *Japanese Journal of Applied Sciences*. 54, pp. 1-5.
- Lundstrom, M. (2013). Heterostructure Fundamentals. *School of Electrical and Computer Engineering and The NSF MRSEC for Technology-Enabling Heterostructures Purdue University*. 1995, pp. 1–43.
- Morimoto, M. *et al.* (2013). Surface Activated Bonding Based Low resistance Si/III-V Junctions. *Electronics Letters*. 49(13), pp. 830–832.
- Nathan S, L. (2005). Basic Research Needs for Solar Energy Utilisation. *Argonne National Laboratory*.
- NREL (2019). Best Research Solar Cell Efficiencies. *NREL*.
- Renard, C. *et al.* (2013). Dislocation And Antiphase Domain Free Microscale GaAs Crystals Grown On SiO₂ From (001) Si Nano-areas. *Applied Physics Letters*. 102, pp 1-5.
- Sellier, J. M. (2007). Archimedes , The Free 2D Semiconductor Device Simulator. *Brick and NCN Publication*, pp.1-89.
- S. Bengtsson dan O. Engstrom. (1989). *Japanese Journal of Applied Physics*. 66.
- Thekaekara, M. (1968). Solar Irradiance Curves And Absorptance Of Satellite Coating. *Solar Energy*. 12, pp. 205–215.
- Thurmond, C. D. (1975). The Standard Thermodynamic Functions for the Formation of Electrons and Holes in Ge , Si , GaAs , and GaP. *Journal Of The Electrochemical Society*. 122, pp. 1133-1141.
- Yang, L. M. *et al.* (2015). Optics And Laser Technology Antireflection Sub-Wavelength Structures Design for InGaN Based Solar Cells Performed by

The Finite Difference Time Domain (FDTD) Simulation Method. *Elsevier*. 67, pp. 72–77.

Xu, Sue *et al.* (2017). Simulation and Optimazion Characteristics of Novel MoS₂/c-Si HIT Solar Cell. *Journal of Materials Characterization and Engineering*. 5, pp. 323-338.

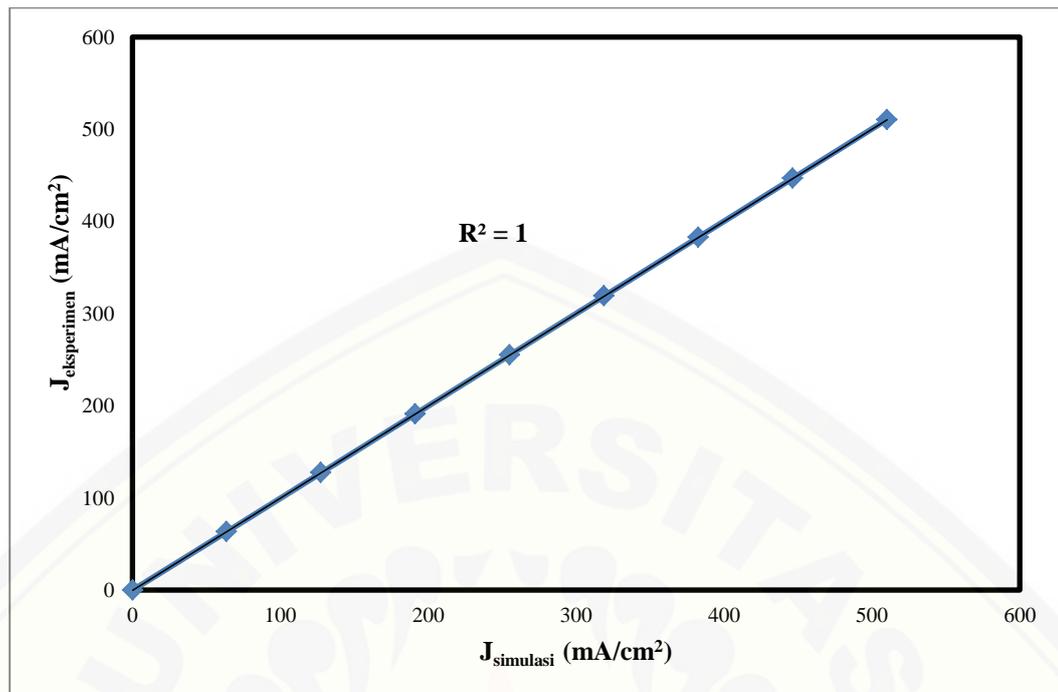


LAMPIRAN A. NILAI RAPAT ARUS TERHADAP VARIASI KETEBALAN SEMIKONDUKTOR p⁺-GaAs/n⁺-Si HETEROJUNCTION

A.1 Tabel Nilai Rapat Arus Terhadap Tegangan Bias Hasil Validasi

Tegangan Bias (V)	J _{eksperimen} (mA/cm ²)	J _{simulasi} (mA/cm ²)
0	0	0,06751
0,0125	63,77551	63,46130
0,025	127,55102	127,32062
0,0375	191,32653	191,18011
0,05	255,10204	255,04419
0,0625	318,87755	318,90976
0,075	382,65306	382,77682
0,0875	446,42857	446,64582
0,1	510,20408	510,52074

Dari tabel A.1 di atas, akurasi nilai rapat arus hasil simulasi terhadap hasil eksperimen adalah 99,9% seperti ditunjukkan oleh nilai koefisien kelinieran (R^2) pada gambar A.1 berikut.



Gambar A.1. Grafik hasil validasi karakteristik I-V semikonduktor p⁺-GaAs/n⁺-Si *heterojunction* beserta nilai koefisien kelinierannya (R^2).

A.2 Tabel Nilai Rapat Arus Terhadap Variasi Ketebalan Lapisan Si

Pada Tegangan Bias 0,0125 V

Ketebalan Lapisan Si (μm)	Rapat Arus x 10^4 (A/m^2)
80	0,42
100	0,39
125	0,35
225	0,22
325	0,14
425	0,09
525	0,06

Pada Tegangan Bias 0,05 V

Ketebalan Lapisan Si (μm)	Rapat Arus x 10^4 (A/m^2)
80	1,70
100	1,57
125	1,42
225	0,89
325	0,56
425	0,37
525	0,26

Pada Tegangan Bias 0,1 V

Ketebalan Lapisan Si (μm)	Rapat Arus x 10^4 (A/m^2)
80	3,39
100	3,14
125	2,84
225	1,78
325	1,11
425	0,73
525	0,51

A.3 Tabel Nilai Rapat Arus Terhadap Variasi Ketebalan Lapisan GaAs

Pada Tegangan Bias 0,0125 V

Ketebalan Lapisan GaAs (μm)	Rapat Arus x 10^4 (A/m^2)
0,04	0,06348
0,08	0,06347
0,1	0,06346
0,2	0,06344
0,3	0,06342
0,4	0,0633

Pada Tegangan Bias 0,05 V

Ketebalan Lapisan GaAs (μm)	Rapat Arus x 10^4 (A/m^2)
0,04	0,2551
0,08	0,25508
0,1	0,25506
0,2	0,2550
0,3	0,2549
0,4	0,2547

Pada Tegangan Bias 0,1 V

Ketebalan Lapisan GaAs (μm)	Rapat Arus x 10^4 (A/m^2)
0,04	0,5107
0,08	0,5106
0,1	0,5104
0,2	0,5102
0,3	0,5101
0,4	0,51

LAMPIRAN C. NILAI ENERGI KONDUKSI TERHADAP VARIASI KETEBALAN SEMIKONDUKTOR p^+ -GaAs/ n^+ -Si HETEROJUNCTION

C.1 Tabel Nilai Energi Konduksi Terhadap Variasi Ketebalan Lapisan Si

Ketebalan Lapisan Si (μm)	Energi Konduksi (eV)
80	0,0509
100	0,051
125	0,05129
225	0,052
325	0,05292
425	0,05494
525	0,0584

C.2 Tabel Nilai Energi Konduksi Terhadap Variasi Ketebalan Lapisan GaAs

Ketebalan Lapisan GaAs (μm)	Energi Konduksi (eV)
0,04	0,05753
0,08	0,05755
0,1	0,05763
0,2	0,05776
0,3	0,05793
0,4	0,05843