



**SIMULASI PENGARUH VARIASI TEMPERATUR OPERASIONAL
TERHADAP DISTRIBUSI PEMBAWA MUATAN SEL SURYA
BERBASIS SILIKON c-Si, a-Si:H, DAN μ c-Si:H**

SKRIPSI

Oleh

**Fitri Wahyu Islamy
NIM 131810201056**

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



**SIMULASI PENGARUH VARIASI TEMPERATUR OPERASIONAL
TERHADAP DISTRIBUSI PEMBAWA MUATAN SEL SURYA
BERBASIS SILIKON c-Si, a-Si:H, DAN μ c-Si:H**

SKRIPSI

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

Oleh

**Fitri Wahyu Islamy
NIM 131810201056**

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

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan dengan rasa cinta, syukur, dan terima kasih yang sebesar-besarnya untuk:

1. Kedua orang tua Ibu Sutimah dan Ayah Sunoto tercinta, yang tidak pernah mengenal lelah memberi Ananda restu, dukungan, doa, dan nasehat di setiap langkah dalam perjalanan hidup serta pengorbanan dengan segenap kasih sayang demi masa depan Ananda;
2. Kakakku tersayang Muhammad Haris Affandi dan Muhammad Abdul Ghofur yang selalu memberi Ananda pula dukungan, semangat, dan motivasi;
3. Pradipta Wahyu Agung Utama sebagai penyemangat setia yang bersedia selalu mendengar keluh kesah serta memberi saran dan dukungan Ananda;
4. Guru-guruku sejak taman kanak-kanak hingga perguruan tinggi, serta teman-teman seperjuangan yang memberi motivasi dan dukungan;
5. Almamater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

MOTTO

“Sesungguhnya Allah tidak akan mengubah keadaan suatu kaum sampai mereka mengubah keadaan yang ada pada diri mereka sendiri”.

(Terjemahan Q.S. Ar-Ra’du, ayat 11) ¹⁾

“Dan apabila hamba-hamba-Ku bertanya kepadamu tentang Aku, maka (jawablah), bahwasanya Aku adalah dekat. Aku mengabulkan permohonan orang yang berdoa apabila ia memohon kepada-Ku, maka hendaklah mereka itu memenuhi (segala perintah)-Ku dan hendaklah mereka beriman kepada-Ku, agar mereka selalu berada dalam kebenaran”.

(Terjemahan Q.S. Al-Baqarah, ayat 186) ¹⁾

¹⁾ Departemen Agama Republik Indonesia. 2012. *Alquran dan Terjemahannya*. Surabaya: Mahkota.

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Fitri Wahyu Islamy

NIM : 131810201056

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Simulasi Pengaruh Variasi Temperatur Operasional Terhadap Distribusi Pembawa Muatan Sel Surya Berbasis Silikon c-Si, a-Si:H, dan μ c-Si:H” 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 yang 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, November 2018

Yang menyatakan

Fitri Wahyu Islamy

NIM 131810201056

SKRIPSI

**SIMULASI PENGARUH VARIASI TEMPERATUR OPERASIONAL
TERHADAP DISTRIBUSI PEMBAWA MUATAN SEL SURYA
BERBASIS SILIKON c-Si, a-Si:H, DAN μ c-Si:H**

Oleh

Fitri Wahyu Islamy
NIM 131810201056

Pembimbing

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

Dosen Pembimbing Anggota : Wenny Maulina, S.Si., M.Si.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Simulasi Pengaruh Variasi Temperatur Operasional Terhadap Distribusi Pembawa Muatan Sel Surya Berbasis Silikon c-Si, a-Si:H, dan μ -Si:H” 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

Wenny Maulina, S.Si, M.Si.
NIP. 198711042014042001

Anggota II,

Anggota III,

Dra. Arry Yuariatun Nurhayati M.Si.
NIP. 196109091986012001

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

Mengesahkan,

Dekan,

Drs. Sujito, Ph.D
NIP. 196102041987111001

RINGKASAN

Simulasi Pengaruh Variasi Temperatur Operasional Terhadap Distribusi Pembawa Muatan Sel Surya Berbasis Silikon c-Si, a-Si:H, dan μ c-Si:H, Fitri Wahyu Islamy, 131810201056; 2018; 147 halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

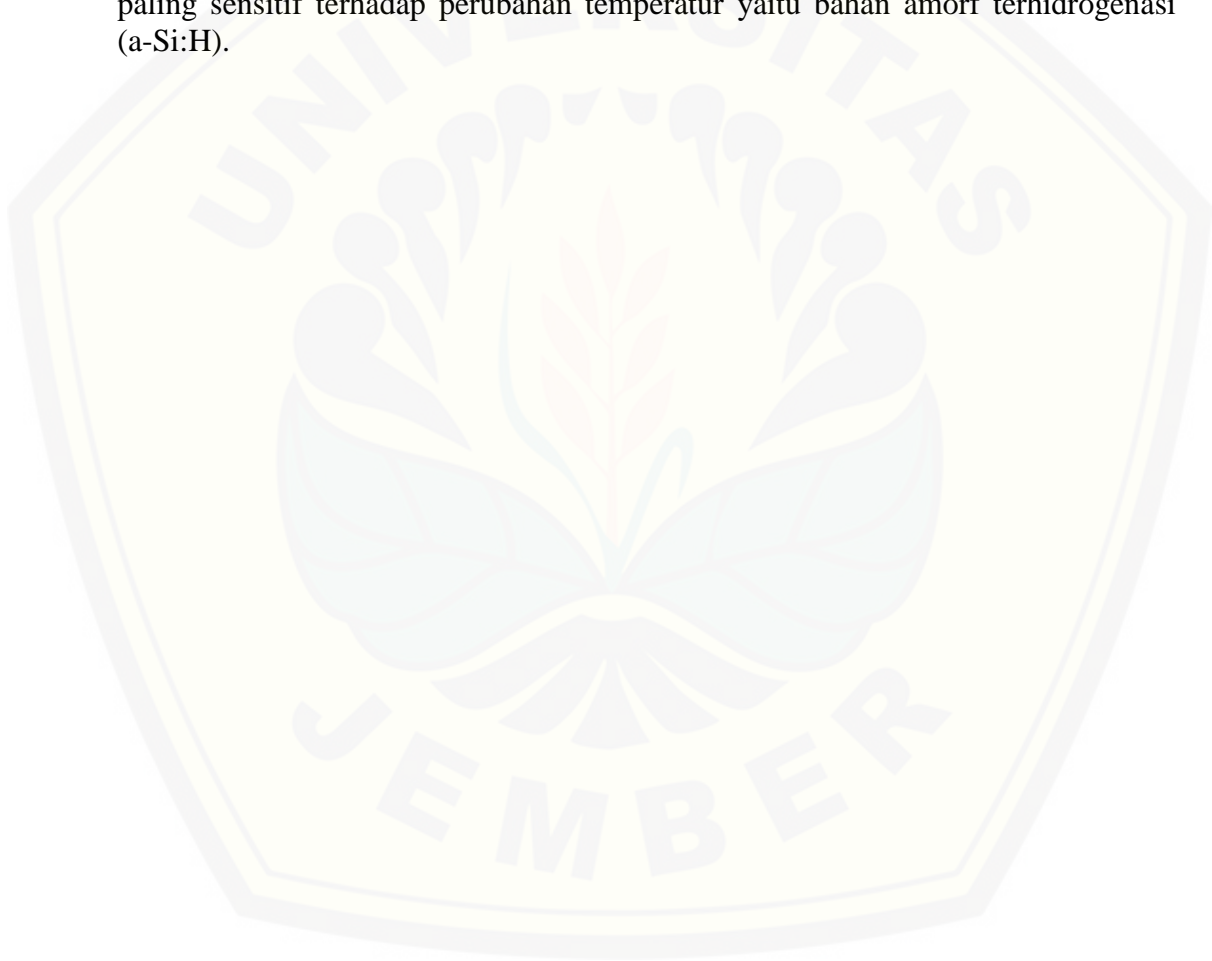
Kinerja sel surya diperoleh dari pengamatan terhadap karakteristik rapat arus-tegangan ($J-V$). Perhitungan rapat arus pada sel surya dilakukan berdasarkan analisis perubahan distribusi pembawa muatan (elektron dan *hole*). Salah satu faktor yang mempengaruhi jumlah distribusi pembawa muatan dalam suatu bahan yaitu temperatur operasional. Kaitannya dengan aplikasi sel surya selalu berhubungan erat dengan temperatur yang selalu berubah-ubah, sehingga perlu dilakukan analisis distribusi pembawa muatan terhadap variasi temperatur. Seiring perkembangannya, bahan yang digunakan untuk divais sel surya tidak hanya silikon kristal (c-Si), namun bahan silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) maupun mikrokristal terhidrogenasi (μ c-Si:H) yang relatif lebih murah biaya fabrikasinya. Oleh sebab itu, pada penelitian ini ketiga bahan tersebut menjadi obyek dalam penelitian dengan tujuan penelitian yaitu menganalisa distribusi pembawa muatan pada sel surya berbasis silikon untuk kristal (c-Si), amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan mikrokristal terhidrogenasi (μ c-Si:H) pada beberapa variasi temperatur operasional. Selanjutnya, berdasarkan hasil yang diperoleh, dianalisa pengaruh temperatur operasional terhadap distribusi pembawa muatan. Distribusi pembawa muatan tersebut merepresentasikan konsentrasi pembawa muatan (elektron dan *hole*) di dalam bahan.

Proses simulasi diawali dengan memasukkan parameter *input* untuk masing-masing bahan diantaranya: bahan silikon kristal (c-Si), amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan mikrokristal terhidrogenasi (μ c-Si:H). Kemudian membuat geometri dalam bentuk 2D yang terdiri dari tiga lapisan yaitu lapisan-p, lapisan-i dan lapisan-n dengan ketebalan tiap-tiap lapisan p/i/n sebesar $150 \text{ \AA}/5500 \text{ \AA}/300 \text{ \AA}$. Tahapan selanjutnya adalah mengatur syarat batas dan memasukkan persamaan yang digunakan dalam simulasi, berupa persamaan poisson dan kontinuitas. Pada tahapan ini diperoleh hasil berupa distribusi pembawa muatan. Tahapan terakhir yaitu memberi perlakuan berupa variasi temperatur operasional, pada temperatur $300 \text{ K}, 315 \text{ K}, 330 \text{ K}, 345 \text{ K}$, dan 360 K dan variasi tegangan sebesar $0 - 0,4 \text{ volt}$ dengan kelipatan $0,1 \text{ volt}$. Hasil akhir yang diperoleh yaitu data nilai konsentrasi yang diamati pada enam titik yang berbeda dari masing-masing bahan tersebut.

Hasil yang diperoleh pada bahan silikon kristal (c-Si), amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan mikrokristal terhidrogenasi (μ c-Si:H) menunjukkan nilai konsentrasi elektron dari ketiga bahan tersebut, berada pada nilai konsentrasi paling rendah di lapisan-p. Hal ini dikarenakan elektron pada lapisan-p bertindak sebagai pembawa muatan minoritas elektron. Sedangkan konsentrasi elektron pada daerah lapisan-i relatif konstan, karena daerah tersebut merupakan daerah aktif sehingga jumlah

konsentrasi elektron dan *hole* relatif sama. Adapun konsentrasi elektron pada lapisan-n berada pada nilai konsentrasi paling tinggi, karena bertindak sebagai pembawa muatan mayoritas elektron. Hal ini berlaku sebaliknya, pada konsentrasi *hole* dikarenakan lapisan-p bertindak sebagai pembawa muatan mayoritas *hole*. Sedangkan lapisan-n bertindak sebagai pembawa muatan minoritas *hole*.

Hasil yang diperoleh juga memberikan informasi berupa adanya variasi temperatur operasional yang berdampak pada perubahan nilai konsentrasi elektron dan *hole*. Nilai konsentrasi elektron dan *hole* menunjukkan peningkatan seiring bertambahnya temperatur operasional pada semua keadaan tegangan *input* yang diberikan. Disamping itu, jika melihat perubahan konsentrasi elektron dan *hole* dari ketiga bahan tersebut, perubahan relatif cukup cepat nampak terjadi pada bahan amorf terhidrogenasi (a-Si:H), sehingga dapat diketahui bahwa bahan yang paling sensitif terhadap perubahan temperatur yaitu bahan amorf terhidrogenasi (a-Si:H).



PRAKATA

Sujud syukur dan segala puji bagi Allah SWT atas seluruh karunia dan nikmat yang telah diberikan oleh-Nya serta sholawat dan salam yang selalu tercurahkan kepada Rasul Tercinta Muhammad SAW, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Simulasi Pengaruh Variasi Temperatur Operasional Terhadap Distribusi Pembawa Muatan Sel Surya Berbasis Silikon c-Si, a-Si:H, dan μ c-Si:H” Skripsi ini disusun guna memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

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

1. Endhah Purwandari, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama (DPU) dan Wenny Maulina, S.Si, M.Si., selaku Dosen Pembimbing Anggota (DPA), yang telah meluangkan waktu, pikiran, tenaga, serta perhatian beliau dalam membantu dan membimbing penulis dari awal hingga terselesaikannya penelitian dan skripsi ini;
2. Dra. Arry Yuariatun Nurhayati, M.Si., selaku Dosen Penguji I dan Dr. Edy Supriyanto. S.Si, M.Si., selaku Dosen Penguji II atas segala masukan, kritik serta saran yang telah diberikan demi kesempurnaan penulisan skripsi ini;
3. Dr. Artoto Arkundato, S.Si, M.Si., selaku Dosen Pembimbing Akademik (DPA) yang telah membimbing dan mengarahkan selama masa perkuliahan;
4. Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si., selaku ketua Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember;
5. Sahabat-Sahabatku: Siti Mutma`inah, Lailiatul Muawanah, Imroatus Solihah, Dwi Indah Prabandari, Gutaminingsih, Siti Nur Kholifah, Umi Nadziroh, Laila Fitriani, Lailatul Badriyah, dan Darma Winhaler Gultom yang telah memberi semangat, dukungan, dan doanya selama ini;

6. Angkatan 2013 yang memberikan dukungan, semangat, pengalaman, dan motivasi;
7. Semua pihak yang membantu demi terselesaikannya skripsi ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Semoga Allah SWT membalas dengan kebahagiaan dan kebaikan atas seluruh dukungan, semangat, motivasi, dan doa yang telah diberikan kepada penulis. Kritik dan saran diharapkan dari semua pihak demi kesempurnaan penelitian yang tertulis dalam skripsi ini. Penulis berharap semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi disiplin ilmu Fisika serta semua pihak yang membaca tulisan ini.

Jember, November 2018

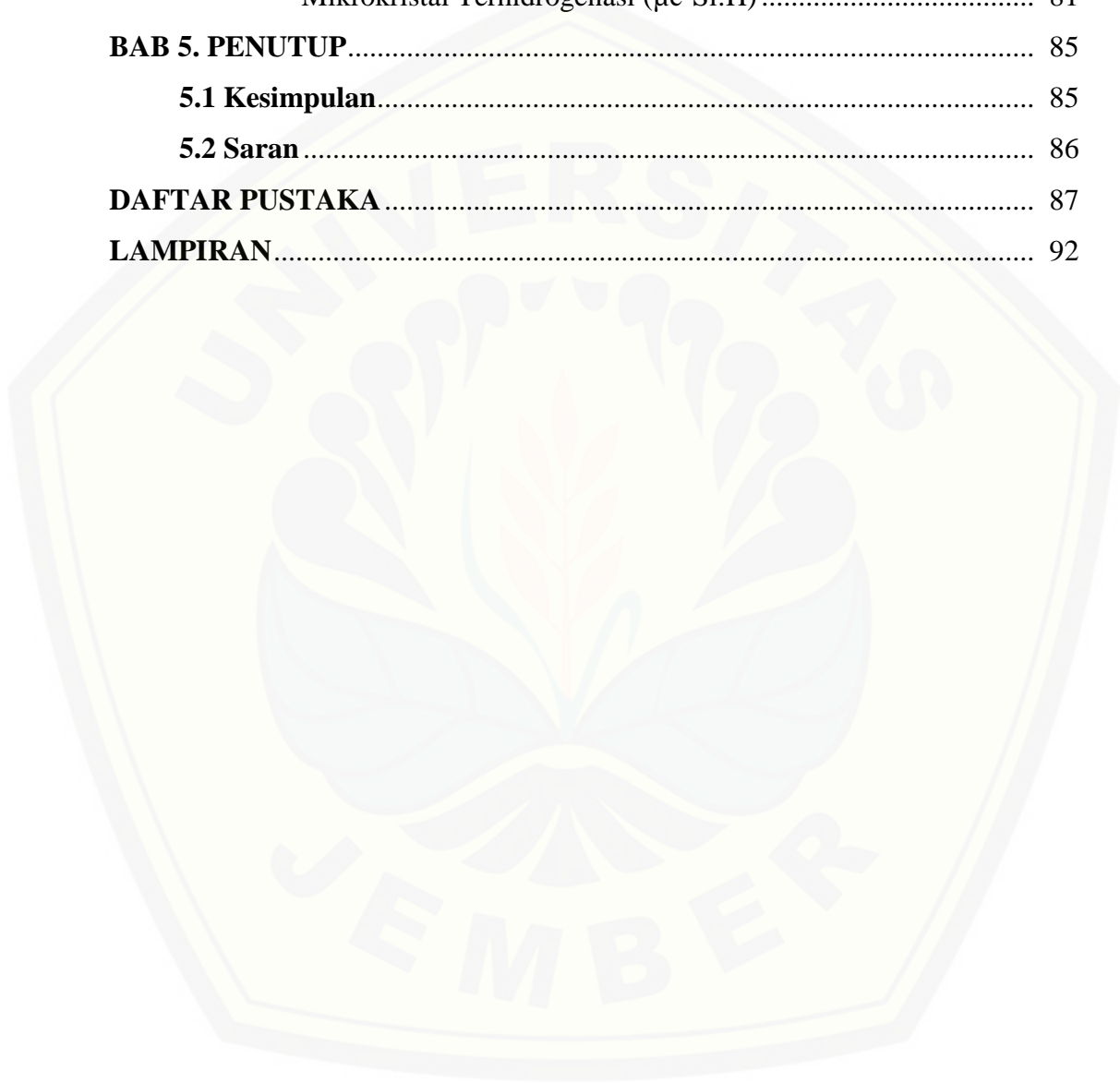
Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	iii
HALAMAN MOTTO	iv
HALAMAN PERNYATAAN.....	v
HALAMAN PEMBIMBINGAN.....	vi
HALAMAN PENGESAHAN.....	vii
RINGKASAN	viii
PRAKATA	x
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xx
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan	4
1.5 Manfaat	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Sel Surya.....	6
2.1.1 Sel Surya Berbasis Silikon Kristal (c-Si).....	7
2.1.2 Sel Surya Berbasis Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H).....	8
2.1.3 Sel Surya Berbasis Silikon Mikrokrystal Terhidrogenasi (μ - Si:H).....	9
2.2 Pengaruh Temperatur pada Bahan Semikonduktor	11
2.3 Tipe Persambungan p-i-n Sel Surya.....	12
2.4 Persamaan Dasar Bahan Semikonduktor	14

2.4.1 Persamaan Poisson dan Kontinuitas pada Bahan Berstruktur Kristal (c-Si).....	16
2.4.2 Persamaan Poisson dan Kontinuitas pada Bahan Berstruktur Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H).....	17
2.4.3 Persamaan Poisson dan Kontinuitas pada Bahan Berstruktur Mikrokrystal Terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$).....	20
2.4.4 Persamaan Rapat Arus pada Bahan Semikonduktor.....	23
2.5 Metode Elemen Hingga.....	25
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	27
3.1 Rancangan Kegiatan Penelitian.....	27
3.2 Jenis dan Sumber Data Penelitian.....	28
3.3 Variabel Penelitian.....	28
3.4 Kerangka Pemecahan Masalah.....	28
3.4.1 Kajian Pustaka.....	28
3.4.2 Mekanisme Simulasi.....	29
3.5 Metode Analisis Data.....	40
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	42
4.1 Hasil Simulasi Distribusi Elektron.....	42
4.1.1 Variasi Temperatur pada Bahan Silikon Kristal (c-Si).....	42
4.1.2 Variasi Temperatur pada Bahan Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H).....	48
4.1.3 Variasi Temperatur Bahan Silikon Mikrokrystal Terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$).....	54
4.1.4 Perbandingan Konsentrasi Elektron pada bahan Silikon Kristal (c-Si), Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H), dan Mikrokrystal Terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$).....	60
4.2 Hasil Simulasi Distribusi Hole.....	65
4.2.1 Variasi Temperatur pada Bahan Silikon Kristal (c-Si).....	65
4.2.2 Variasi Temperatur pada Bahan Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H).....	71

4.2.3 Variasi Temperatur Bahan Silikon Mikrokrystal Terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$).....	76
4.2.4 Perbandingan Konsentrasi Elektron pada Bahan Silikon Kristal (c-Si), Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H), dan Mikrokrystal Terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$).....	81
BAB 5. PENUTUP	85
5.1 Kesimpulan	85
5.2 Saran	86
DAFTAR PUSTAKA	87
LAMPIRAN	92



DAFTAR TABEL

	Halaman
3.1 Parameter <i>input</i> silikon kristal (c-Si).....	32
3.2 Parameter <i>input</i> silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H)	33
3.3 Parameter <i>input</i> silikon mikrokristal terhidrogenasi (μ c-Si:H)	33
3.4 Parameter yang disetarakan	35
4.1 Konsentrasi elektron di titik A (0,000166 ; 0,3) pada daerah lapisan-p saat $V_a = 0$ volt untuk bahan c-Si, a-Si:H, dan μ c-Si:H.....	60
4.2 Konsentrasi elektron di titik B (0,0141 ; 0,3) pada daerah persambungan p-i saat $V_a = 0$ volt untuk bahan c-Si, a-Si:H, dan μ c-Si:H.....	61
4.3 Konsentrasi elektron di titik C (0,2 ; 0,3) pada daerah lapisan-i saat $V_a = 0$ volt untuk bahan c-Si, a-Si:H, dan μ c-Si:H.....	61
4.4 Konsentrasi elektron di titik D (0,4 ; 0,3) pada daerah lapisan-i saat $V_a = 0$ volt untuk bahan c-Si, a-Si:H, dan μ c-Si:H.....	61
4.5 Konsentrasi elektron di titik E (0,568 ; 0,3) pada daerah persambungan i-n saat $V_a = 0$ volt untuk bahan c-Si, a-Si:H, dan μ c-Si:H.....	61
4.6 Konsentrasi elektron di titik F (0,588 ; 0,3) pada daerah lapisan-n saat $V_a = 0$ volt untuk bahan c-Si, a-Si:H, dan μ c-Si:H	61
4.7 Konsentrasi <i>hole</i> di titik A (0,000166 ; 0,3) pada daerah lapisan-p saat $V_a = 0$ volt untuk bahan c-Si, a-Si:H, dan μ c-Si:H	81
4.8 Konsentrasi <i>hole</i> di titik B (0,0141 ; 0,3) pada daerah persambungan p-i saat $V_a = 0$ volt untuk bahan c-Si, a-Si:H, dan μ c-Si:H.....	81
4.9 Konsentrasi <i>hole</i> di titik C (0,2 ; 0,3) pada daerah lapisan-i saat $V_a = 0$ volt untuk bahan c-Si, a-Si:H, dan μ c-Si:H.....	81
4.10 Konsentrasi <i>hole</i> di titik D (0,4 ; 0,3) pada daerah lapisan-i saat $V_a = 0$ volt untuk bahan c-Si, a-Si:H, dan μ c-Si:H.....	81

- 4.11 Konsentrasi *hole* di titik E (0,568 ; 0,3) pada daerah persambungan i-n saat $V_a = 0$ volt untuk bahan c-Si, a-Si:H, dan μ c-Si:H..... 82
- 4.12 Konsentrasi *hole* di titik F (0,588 ; 0,3) pada daerah lapisan-n saat $V_a = 0$ volt untuk bahan c-Si, a-Si:H, dan μ c-Si:H..... 82



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Struktur pita sebuah semikonduktor	6
2.2 Struktur 2D ikatan atom pada silikon kristal (c-Si)	8
2.3 Struktur 2D ikatan atom pada silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H).....	9
2.4 Struktur 2D ikatan atom pada silikon mikrokristal terhidrogenasi (μ -Si:H).....	10
2.5 Diagram pita energi persambungan p-i-n sel surya	12
2.6 Struktur dasar sel surya persambungan p-i-n	14
3.1 Diagram alur rancangan kegiatan penelitian.	27
3.2 Diagram alir kegiatan simulasi	30
3.3 Geometri 2D pada divais sel surya persambungan p-i-n	31
3.4 Pembagian geometri 2D pada divais sel surya persambungan p-i-n	32
4.1 Distribusi pembawa muatan elektron pada bahan silikon kristal (c-Si) untuk temperatur 300 K saat tegangan <i>input</i> 0 volt.....	43
4.2 Grafik hubungan variasi temperatur operasional terhadap konsentrasi elektron pada bahan silikon kristal (c-Si) (a) di titik A (0,000166 ; 0,3) pada daerah lapisan-p dan (b) di titik B (0,0141 ; 0,3) pada daerah persambungan p-i.....	44
4.3 Grafik hubungan variasi temperatur operasional terhadap konsentrasi elektron pada bahan silikon kristal (c-Si) (a) di titik C (0,2 ; 0,3) pada daerah lapisan-i, (b) di titik D (0,4 ; 0,3) pada daerah lapisan-i, (c) di titik E (0,568 ; 0,3) pada daerah persambungan i-n, dan (d) di titik F (0,588 ; 0,3) pada daerah lapisan-n.....	45
4.4 Distribusi pembawa muatan elektron pada bahan silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) untuk temperatur 300 K saat tegangan <i>input</i> 0 volt.....	49
4.5 Grafik hubungan variasi temperatur operasional terhadap konsentrasi elektron pada bahan silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) (a) di titik A	

	(0,000166 ; 0,3) pada daerah lapisan-p dan (b) di titik B (0,0141 ; 0,3) pada daerah persambungan p-i	50
4.6	Grafik hubungan variasi temperatur operasional terhadap konsentrasi elektron pada bahan silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) (a) di titik C (0,2 ; 0,3) pada daerah lapisan-i, (b) di titik D (0,4 ; 0,3) pada daerah lapisan-i, (c) di titik E (0,568 ; 0,3) pada daerah persambungan i-n, dan (d) di titik F (0,588 ; 0,3) pada daerah lapisan-n	51
4.7	Distribusi pembawa muatan elektron pada bahan silikon mikrokrystal terhidrogenasi (μ c-Si:H) untuk temperatur 300 K saat tegangan <i>input</i> 0 volt	55
4.8	Grafik hubungan variasi temperatur operasional terhadap konsentrasi elektron pada bahan silikon mikrokrystal terhidrogenasi (μ c-Si:H) (a) di titik A (0,000166 ; 0,3) pada daerah lapisan-p dan (b) di titik B (0,0141 ; 0,3) pada daerah persambungan p-i	56
4.9	Grafik hubungan variasi temperatur operasional terhadap konsentrasi elektron pada bahan silikon mikrokrystal terhidrogenasi (μ c-Si:H) (a) di titik C (0,2 ; 0,3) pada daerah lapisan-i, (b) di titik D (0,4 ; 0,3) pada daerah lapisan-i, (c) di titik E (0,568 ; 0,3) pada daerah persambungan i-n, dan (d) di titik F (0,588 ; 0,3) pada daerah lapisan-n	57
4.10	Distribusi pembawa muatan <i>hole</i> pada bahan silikon kristal (c-Si) untuk temperatur 300 K saat tegangan <i>input</i> 0 volt	66
4.11	Grafik hubungan variasi temperatur operasional terhadap konsentrasi <i>hole</i> pada bahan silikon kristal (c-Si) (a) di titik A (0,000166 ; 0,3) pada daerah lapisan-p dan (b) di titik B (0,0141 ; 0,3) pada daerah persambungan p-i	67
4.12	Grafik hubungan variasi temperatur operasional terhadap konsentrasi <i>hole</i> pada bahan silikon kristal (c-Si) (a) di titik C (0,2 ; 0,3) pada daerah lapisan-i, (b) di titik D (0,4 ; 0,3) pada daerah lapisan-i, (c) di titik E (0,568 ; 0,3) pada daerah persambungan i-n, dan (d) di titik F (0,588 ; 0,3) pada daerah lapisan-n	68

4.13	Distribusi pembawa muatan <i>hole</i> pada bahan silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) untuk temperatur 300 K saat tegangan <i>input</i> 0 volt.....	71
4.14	Grafik hubungan variasi temperatur operasional terhadap konsentrasi <i>hole</i> pada bahan silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) (a) di titik A (0,000166 ; 0,3) pada daerah lapisan-p dan (b) di titik B (0,0141 ; 0,3) pada daerah persambungan p-i	72
4.15	Grafik hubungan variasi temperatur operasional terhadap konsentrasi <i>hole</i> pada bahan silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) (a) di titik C (0,2 ; 0,3) pada daerah lapisan-i, (b) di titik D (0,4 ; 0,3) pada daerah lapisan-i, (c) di titik E (0,568 ; 0,3) pada daerah persambungan i-n, dan (d) di titik F (0,588 ; 0,3) pada daerah lapisan-n	73
4.16	Distribusi pembawa muatan <i>hole</i> pada bahan silikon mikrokrystal terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$) untuk temperatur 300 K saat tegangan <i>input</i> 0 volt.....	76
4.17	Grafik hubungan variasi temperatur operasional terhadap konsentrasi <i>hole</i> pada bahan silikon mikrokrystal terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$) (a) di titik A (0,000166 ; 0,3) pada daerah lapisan-p dan (b) di titik B (0,0141 ; 0,3) pada daerah persambungan p-i.....	77
4.18	Grafik hubungan variasi temperatur operasional terhadap konsentrasi <i>hole</i> pada bahan silikon mikrokrystal terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$) (a) di titik C (0,2 ; 0,3) pada daerah lapisan-i, (b) di titik D (0,4 ; 0,3) pada daerah lapisan-i, (c) di titik E (0,568 ; 0,3) pada daerah persambungan i-n, dan (d) di titik F (0,588 ; 0,3) pada daerah lapisan-n	78

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
4.1 Distribusi Pembawa Muatan Elektron.....	92
4.1.a Distribusi Pembawa Muatan Elektron Silikon Kristal (c-Si)	92
4.1.b Distribusi Pembawa Muatan Elektron Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H)	97
4.1.c Distribusi Pembawa Muatan Elektron Silikon Mikrokrystal Terhidrogenasi (μ c-Si:H).....	102
4.2 Distribusi Pembawa Muatan <i>Hole</i>	107
4.2.a Distribusi Pembawa Muatan <i>Hole</i> Silikon Kristal (c-Si)	107
4.2.b Distribusi Pembawa Muatan <i>Hole</i> Silikon Amorf Terhidrogenasi a- Si:H.....	112
4.2.c Distribusi Pembawa Muatan <i>Hole</i> Silikon Mikrokrystal Terhidrogenasi (μ c-Si:H).....	117
4.3 Nilai Konsentrasi Pembawa Muatan Elektron dan <i>Hole</i>	122
4.3.a Konsentrasi Elektron dan <i>Hole</i> Silikon Kristal (c-Si)	122
4.3.b Konsentrasi Elektron dan <i>Hole</i> Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H)	130
4.3.c Konsentrasi Elektron dan <i>Hole</i> Silikon Mikrokrystal Terhidrogenasi (μ c-Si:H).....	139

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sel surya merupakan divais yang mengkonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik melalui mekanisme efek fotovoltaiik (Usman, 2006). Saat ini teknologi sel surya didominasi oleh sel surya berbasis silikon amorf (a-Si) maupun kristal (c-Si), yakni bahan yang banyak dipakai karena merupakan unsur yang banyak terdapat di alam (Jasruddin dan Momang, 2009a). Namun seiring perkembangannya, sejumlah peneliti memfokuskan kajiannya pada sel surya berbasis silikon mikrokristal ($\mu\text{c-Si}$) dikarenakan biaya fabrikasi untuk sel surya berbasis silikon kristal (c-Si) yang relatif mahal (Siregar, 2011). Adapun untuk biaya fabrikasi sel surya berbasis silikon amorf (a-Si) memang lebih murah jika dibandingkan dengan sel surya berbasis silikon kristal (c-Si), tetapi jika disinari dengan intensitas cahaya yang cukup tinggi dengan waktu yang relatif cukup lama dapat mengalami degradasi efisiensi konversi. Hal ini berbeda dengan sel surya berbasis silikon mikrokristal ($\mu\text{c-Si}$) yang memiliki efisiensi konversi energi yang cukup baik dengan tingkat stabilitas yang tinggi pula yaitu sebesar 9% (Shah *et al.*, 2002).

Penelitian pertama yang mengkaji efek fotovoltaiik dilakukan oleh Ernest Becquerel pada tahun 1839. Sekitar tahun 1954, efek fotovoltaiik mulai dikembangkan oleh para peneliti dari Bell Laboratories untuk membuat sel surya terdifusi. Sel surya yang diperoleh saat itu baru mencapai efisiensi konversi sekitar 4,5% (Szlufcik *et al.*, 1997). Sel surya pertama kali dikembangkan menggunakan bahan silikon kristal (c-Si) dengan tipe persambungan p-n, diciptakan dari bahan semikonduktor intrinsik dengan menambahkan bahan pengotor pada sebagian daerah lapisan-p dan daerah lapisan-n. Mutu pengoperasian sangat bergantung pada temperatur operasionalnya. Rancangan tersebut bekerja baik pada temperatur ruang, namun belum tentu bekerja lebih baik di atas temperatur ruang. Dalam hal ini perubahan temperatur operasional sangat mempengaruhi jumlah pembawa muatannya (Aslizar, 1996). Hal ini

diperkuat dengan penelitian Sconza *et al* (1994) yang menyatakan temperatur operasional ini berkontribusi sangat besar terhadap konsentrasi pembawa muatan intrinsik (n_i) dari bahan semikonduktor.

Kinerja sel surya diperoleh dari pengamatan terhadap karakteristik rapat arus-tegangan ($J-V$). Perhitungan rapat arus pada sel surya dilakukan berdasarkan analisis perubahan distribusi pembawa muatan elektron dan *hole*. Penelitian mengenai distribusi pembawa muatan pada persambungan tipe p-i-n telah dilakukan oleh Herawati (2014) pada bahan silikon kristal (c-Si), dengan memberikan perlakuan variasi ketebalan pada lapisan-i. Penelitian lain dengan tipe persambungan p-i-n juga telah dilakukan oleh Solehuddin (2016), yakni pada bahan silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) dengan variasi energi *gap* dan pada bahan mikrokristal terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$) oleh Dewi (2017). Hasil yang diperoleh dari ketiga penelitian ini menunjukkan konsentrasi elektron pada lapisan-p paling rendah, karena lapisan-p sebagai daerah pembawa muatan minoritas, namun pada lapisan-i relatif konstan, karena daerah tersebut merupakan daerah aktif, sedangkan pada lapisan-n paling tinggi, karena lapisan-n sebagai pembawa muatan mayoritas, dan berlaku sebaliknya pada konsentrasi *hole* yang dihasilkan (Hack dan Shur, 1985). Pada penelitian Herawati (2014) menunjukkan bahwa ketebalan lapisan-i sangat mempengaruhi hasil distribusi pembawa muatannya, seiring meningkatnya tegangan seharusnya distribusi pembawa muatannya semakin meningkat pula, namun pada distribusi *hole* menurun seiring bertambahnya tegangan pada ketebalan tertentu, sehingga dalam hal ini diketahui bahwa penambahan ketebalan lapisan-i mempengaruhi jumlah distribusi pembawa muatan maksimum yang dihasilkan. Selanjutnya pada penelitian Solehuddin (2016) dengan adanya perbedaan energi *gap* yang diberikan juga berdampak pada distribusi pembawa muatan yang diperoleh, apabila perbedaan energi *gap* dari setiap lapisan cukup besar, maka perubahan distribusi pembawa muatan pada tiap lapisan cukup drastis.

Distribusi pembawa muatan yang mengalir di dalam bahan semikonduktor akan menentukan besarnya arus yang mengalir dalam divais (Aslizar, 1996). Distribusi pembawa muatan yang dihasilkan pada bahan

semikonduktor berbanding lurus dengan karakteristik kelistrikan yang dihasilkan, semakin tinggi distribusi pembawa muatan yang dihasilkan maka semakin tinggi pula nilai karakteristik kelistrikan yang diperoleh. Berdasarkan hal tersebut, distribusi pembawa muatan cukup penting untuk dianalisis terutama pada saat ingin mengetahui prediksi dari karakteristik kelistrikan. Jumlah distribusi pembawa muatan dalam suatu bahan dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain: temperatur. Peningkatan temperatur dapat memberikan dampak pada peningkatan konsentrasi elektron dan *hole*, dengan adanya peningkatan temperatur maka energi termal suatu bahan juga akan lebih besar, sehingga memungkinkan elektron dapat berpindah dengan mudah dari pita valensi ke pita konduksi (Callister, 1940). Berkaitan dengan aplikasi sel surya yang selalu berhubungan erat dengan temperatur yang selalu berubah-ubah, sehingga perlu dilakukan analisis distribusi pembawa muatan terhadap variasi temperatur.

Jika meninjau perkembangannya, aplikasi sel surya telah banyak diterapkan, yakni pada bahan struktur kristal (c-Si), amorf (a-Si), dan mikrokristal ($\mu\text{c-Si}$) dengan tipe persambungan p-i-n karena melihat potensi yang dimiliki dan efisiensi yang dihasilkan dari masing-masing bahan tersebut. Pada tipe persambungan p-i-n lapisan intrinsik disisipkan diantara semikonduktor daerah lapisan-p dan daerah lapisan-n. Dengan demikian, terbentuklah sel surya tipe persambungan p-i-n. Penambahan lapisan-i berfungsi sebagai *trap* bagi pembawa muatan dan menyebabkan hilangnya arus rekombinasi. Kondisi seperti itu akan berpengaruh terhadap kinerja dari sel surya, sehingga dapat dikatakan semakin kecil rapat keadaan dalam lapisan intrinsik, maka akan semakin baik efisiensi konversi sel surya (Usman, 2006). Adapun setelah mengamati fenomena-fenomena yang telah berkembang, maka di dalam penelitian ini telah dilakukan simulasi distribusi pembawa muatan terhadap variasi temperatur pada tiga bahan diantaranya: struktur kristal (c-Si), amorf (a-Si), dan mikrokristal ($\mu\text{c-Si}$) dengan tipe persambungan p-i-n.

Penelitian yang telah dilakukan berfokus pada perubahan distribusi pembawa muatan elektron maupun *hole* yang diamati melalui variasi temperatur operasional yang diberikan pada sel surya berbasis silikon kristal (c-Si), amorf

terhidrogenasi (a-Si:H), dan mikrokrystal terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$), dengan tipe persambungan p-i-n dalam bentuk 2D. Persamaan dasar bahan semikonduktor yang digunakan merupakan persamaan poisson dan kontinuitas untuk bahan silikon kristal (c-Si) dan silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H). Serta gabungan dari persamaan poisson dan kontinuitas untuk bahan silikon kristal (c-Si) dan silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) yang diterapkan pada bahan mikrokrystal terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$). Metode elemen hingga diterapkan pada penelitian ini untuk menggambarkan struktur tipe persambungan pada bahan dan menyelesaikan persamaan poisson dan kontinuitas yang merupakan persamaan differensial orde dua tak linier.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah di dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh variasi temperatur operasional terhadap distribusi pembawa muatan elektron dan *hole* yang dihasilkan, pada sel surya berbasis silikon kristal (c-Si), amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan mikrokrystal terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$) ?
2. Bagaimana nilai konsentrasi elektron dan *hole* pada sel surya berbasis silikon kristal (c-Si), silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan silikon mikrokrystal terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$) ?
3. Bahan manakah yang paling sensitif terhadap perubahan temperatur ?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah di dalam penelitian ini yaitu: variasi tegangan *input* yang diberikan sebesar (0 – 0,4) *volt* dengan rentang 0,1 *volt* untuk ketiga bahan diantaranya: silikon kristal (c-Si), amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan mikrokrystal terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$).

1.4 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan di dalam penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh variasi temperatur operasional terhadap distribusi pembawa muatan elektron dan *hole* yang dihasilkan, pada sel surya berbasis silikon kristal (c-Si), amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan mikrokristal terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$).
2. Mengetahui nilai konsentrasi elektron dan *hole* pada sel surya berbasis silikon kristal (c-Si), silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan silikon mikrokristal terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$).
3. Mengetahui Bahan yang paling sensitif terhadap perubahan temperatur.

1.5 Manfaat

Kaitannya dengan rumusan masalah dan tujuan penelitian, diharapkan penelitian ini memberikan manfaat berupa:

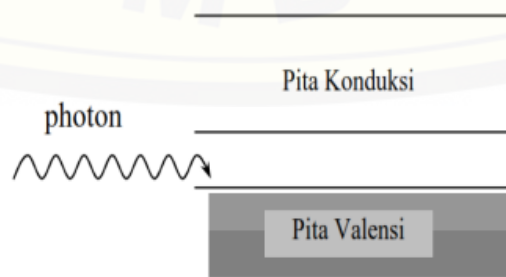
1. Aplikasi metode elemen hingga dalam kegiatan simulasi pada sel surya berbasis silikon kristal (c-Si), amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan mikrokristal terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$) tipe persambungan p-i-n dalam bentuk 2D.
2. Mengetahui pengaruh variasi temperatur operasional terhadap distribusi pembawa muatan elektron dan *hole* yang dihasilkan.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sel Surya

Sel surya merupakan divais yang mampu mengkonversi sinar matahari menjadi arus listrik. Energi matahari merupakan sumber energi yang paling menjanjikan mengingat sifatnya yang berkelanjutan (*sustainable*) dan jumlahnya yang sangat besar. Matahari merupakan sumber energi yang diharapkan dapat mengatasi permasalahan kebutuhan energi masa depan, setelah berbagai sumber energi konvensional berkurang jumlahnya dan tidak ramah terhadap lingkungan (Matsmura, 2009).

Sel surya secara sederhana terdiri dari persambungan bahan semikonduktor bertipe p dan n (*p-n junction semiconductor*), silikon daerah lapisan-p yang bersifat positif akibat dari kekurangan elektron dan silikon daerah lapisan-n yang bersifat negatif akibat dari kelebihan elektron (Syafaruddin, 2010). Pada cahaya matahari terkandung energi dalam bentuk foton. Ketika foton mengenai permukaan sel surya, maka akan terjadi aliran elektron yang dapat menyebabkan elektron-elektronnya tereksitasi, sehingga menimbulkan aliran listrik (*photoelectric*). Bahan semikonduktor adalah bahan yang memiliki struktur seperti isolator, akan tetapi memiliki celah energi yang kecil berkisar $\leq 1 \text{ eV}$, sehingga memungkinkan elektron tereksitasi dari pita konduksi ke pita valensi. Elektron dari pita konduksi tereksitasi ke pita valensi ketika sambungan tersebut dikenai photon dengan energi tertentu (Yuwono, 2005). Hal tersebut dapat dijelaskan dengan pita-pita energi seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Struktur pita sebuah semikonduktor (Sumber: Yuwono, 2005).

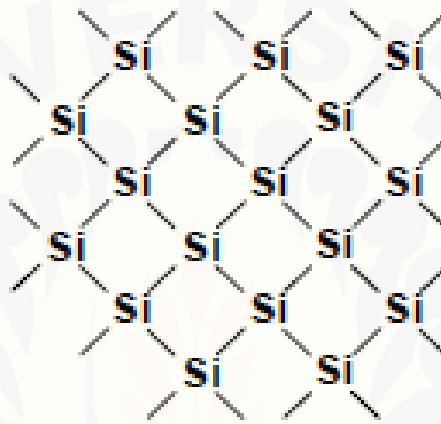
Peran dari *p-n junction* pada bahan semikonduktor yaitu membentuk medan listrik, sehingga elektron dan *hole* bisa menghasilkan listrik. Ketika semikonduktor daerah lapisan-p dan daerah lapisan-n terkontak, maka kelebihan elektron akan bergerak dari semikonduktor daerah lapisan-n ke daerah lapisan-p, sehingga membentuk kutub positif pada semikonduktor daerah lapisan-n, dan sebaliknya kutub negatif pada semikonduktor daerah lapisan-p. Akibat dari aliran elektron dan *hole* ini maka terbentuk medan listrik, yang mana ketika cahaya matahari mengenai susunan *p-n junction* ini, maka akan mendorong elektron bergerak dari semikonduktor menuju kontak negatif. Selanjutnya dimanfaatkan sebagai listrik dan sebaliknya *hole* bergerak menuju kontak positif menunggu elektron datang (Seeger, 1989).

2.1.1 Sel Surya Berbasis Silikon Kristal (c-Si)

Silikon kristal (c-Si) didefinisikan sebagai komposisi atom-atom zat padat yang memiliki susunan teratur dan periodik dalam pola tiga dimensi. Keteraturan susunan tersebut terjadi karena kondisi geometris yang harus memenuhi adanya ikatan atom yang berarah dan susunan yang rapat. Atom-atom bergabung membentuk padatan (*solid*) (Malvino, 1979). Dalam bahan silikon kristal (c-Si), setiap atom dikelilingi secara teratur oleh empat buah atom dalam jarak dan sudut ikatan yang sama. Keteraturan ikatan silikon tersebut terjadi secara periodik dan berulang-ulang, sehingga silikon kristal (c-Si) dikatakan mempunyai periodisitas berjangkauan panjang (*long-range regularity*) (Usman, 2006). Pada silikon kristal (c-Si) atom silikon yang satu dengan atom silikon lainnya akan diikat dengan dua elektron dan ikatannya disebut dengan ikatan kovalen. Susunan khas atom-atom dalam kristal disebut struktur kristal (Fukuda, 1999). Berdasarkan keteraturan panjang jarak susunan atom-atom atau molekul-molekul zat padat, maka kristal dibagi menjadi dua yakni monokristal dan polikristal (Fiqry *et al.*, 2017).

Silikon monokristal merupakan yang paling efisien dihasilkan dengan teknologi terkini dan menghasilkan daya listrik persatuan luas yang paling tinggi. Memiliki efisiensi sekitar (15 – 20) %. Kelemahan dari panel jenis ini adalah

tidak akan berfungsi baik ditempat yang cahaya mataharianya kurang (teduh), sehingga efisiensinya akan turun drastis dalam cuaca berawan (Afifudin dan Hanato, 2012). Sedangkan polikristal panel surya memiliki efisiensi lebih rendah dibandingkan tipe monokristal yaitu sekitar (13 – 16) %. Karena proses pembuatannya lebih mudah dan murah jika dibandingkan monokristal, maka jenis ini paling banyak dipakai saat ini (Maehlum, 2017). Struktur 2D ikatan atom pada silikon kristal (c-Si) ditunjukkan pada Gambar 2.2.

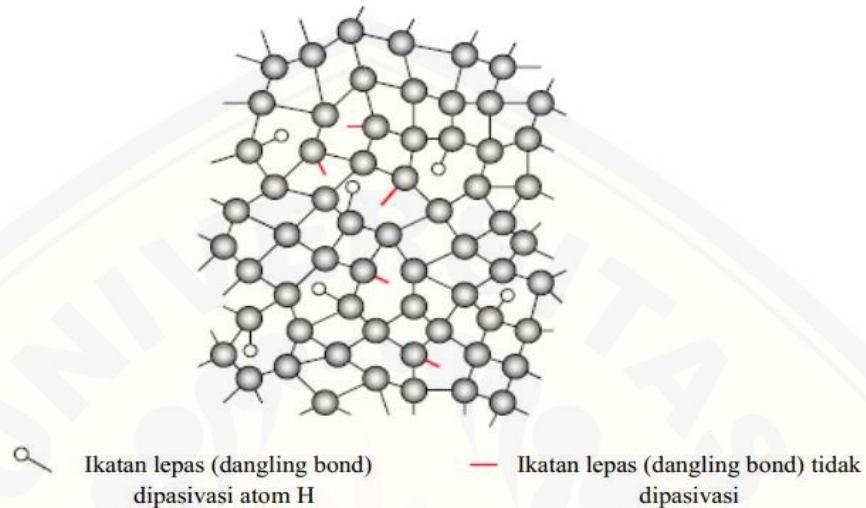


Gambar 2.2 Struktur 2D ikatan atom pada silikon kristal (c-Si) (Sumber: Usman, 2006).

2.1.2 Sel Surya Berbasis Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H)

Silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) ini tidak memiliki struktur kristal. Silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) terbentuk karena proses pendinginan yang terlalu cepat, sehingga mempunyai pola susunan atom atau molekul yang tidak teratur dan acak secara berulang dengan jarak dan sudut ikatan yang berbeda antara satu atom dengan atom yang lain (Smallman dan Bishop, 2002). Struktur 2D ikatan atom pada silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) ditunjukkan pada Gambar 2.3, terlihat bahwa silikon amorf memiliki periodisitas ikatan yang berjangkauan pendek (*short-range regularity*). Ikatan lepas (*dangling bond*) terjadi karena beberapa atom silikon dalam silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) tidak membentuk ikatan dengan atom yang lain diakibatkan dari ketidakteraturan ikatan tersebut. Hal inilah yang menyebabkan keadaan-keadaan cacat dalam silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H), sehingga membentuk tingkatan-tingkatan

energi dalam daerah celah pita energinya yang biasa dikenal dengan cacat band gap (*band gap defect*), sedangkan ketidakteraturan ikatannya membentuk keadaan cacat yang dikenal dengan cacat ekor pita (*band tail defect*) (Street, 1991).



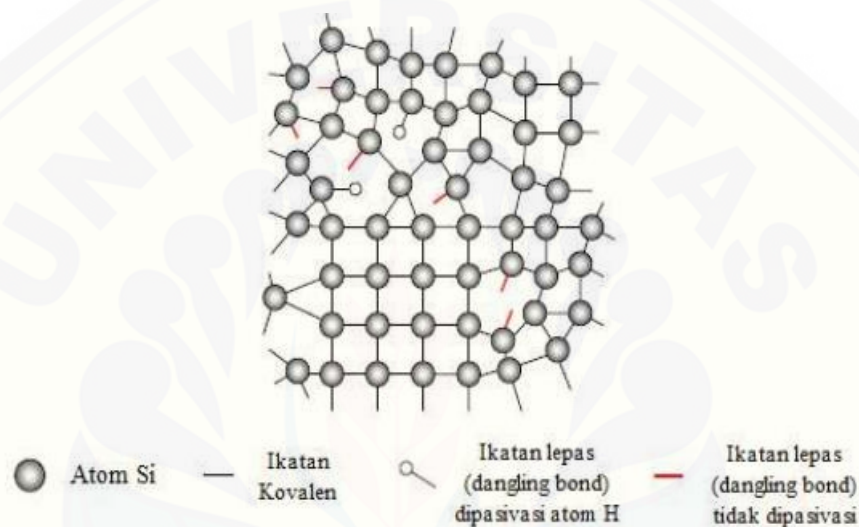
Gambar 2.3 Struktur 2D ikatan atom pada silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) (Sumber: Schropp dan Zeman, 1998).

Selanjutnya, kelebihan dari silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) diantaranya celah optik lebar ($\sim 1,7 \text{ eV}$) dan mudah dikontrol dengan mengatur kandungan hidrogen di dalamnya. Koefisien absorpsi optiknya lebih tinggi ($> 10^5 \text{ cm}^{-1}$) diseluruh daerah spektrum cahaya tampak, sehingga dapat diproduksi dalam bentuk lapisan tipis. Sifat transport elektron dan *hole* sama di dalam lapisan silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) daerah lapisan-p maupun daerah lapisan-n. Untuk temperatur penumbuhannya jauh lebih rendah, sehingga dapat diproduksi di atas berbagai jenis substrat seperti gelas ataupun plastik serta teknologi pembuatannya lebih sederhana, dengan bahan baku yang melimpah (Usman, 2006).

2.1.3 Sel Surya Berbasis Silikon Mikrokrystal Terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$)

Umumnya silikon mikrokrystal terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$) disebut juga silikon nanokrystal, karena keduanya memiliki struktur yang sama. Silikon

mikrokristal ($\mu\text{-Si}$) merupakan bahan semikonduktor dengan struktur kristal dalam fase amorf (Veprek dan Marecek, 1968). Jika dibandingkan silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) lapisan tipis pada silikon mikrokristal terhidrogenasi ($\mu\text{-Si:H}$) memiliki konduktivitas yang lebih tinggi dan kandungan hidrogen yang lebih rendah, sehingga menghasilkan efisiensi konversi yang cukup baik dengan tingkat stabilitas yang cukup tinggi (Shah *et al.*, 2002). Struktur ikatan atom pada silikon mikrokristal terhidrogenasi ($\mu\text{-Si:H}$) ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Struktur 2D ikatan atom pada silikon mikrokristal terhidrogenasi ($\mu\text{-Si:H}$) (Sumber: Schropp dan Zeman, 1998).

Pada sel surya berbasis silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) dapat terjadi efek *Staebler-Wronski* (*Staebler-Wronski-Effect*, SWE) setelah disinari dengan intensitas tinggi dalam waktu yang cukup lama. Kontaminasi hidrogen dan kandungan cacat yang dimiliki oleh bahan silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) lebih tinggi jika dibandingkan dengan bahan silikon mikrokristal terhidrogenasi ($\mu\text{-Si:H}$), hal inilah yang menyebabkan mekanisme SWE dapat terjadi (Schicho, 2010). Oleh karena itu, sejumlah peneliti lebih memilih memfokuskan kajiannya pada pengembangan sel surya berbasis silikon mikrokristal terhidrogenasi ($\mu\text{-Si:H}$), dikarenakan melihat potensi yang dimiliki oleh silikon mikrokristal terhidrogenasi ($\mu\text{-Si:H}$) lebih baik jika dibandingkan dengan silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H).

2.2 Pengaruh Temperatur pada Bahan Semikonduktor

Pada bahan semikonduktor kenaikan temperatur menyebabkan kenaikan nilai konduktivitas listrik yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan jika suatu bahan dipanaskan, maka akan menimbulkan panas sehingga menyebabkan atom-atom di dalam bahan dapat bergetar seiring perubahan temperatur. Bergetarnya atom-atom ini menimbulkan jarak antar atom-atom semakin besar, sehingga atom tidak akan mudah mengikat elektron dan mengakibatkan elektron mudah bergerak bebas. Gerakan elektron bebas inilah yang akan meningkatkan konduktivitas listrik. Suatu bahan akan mengalami transisi dari sifat konduktif ke sifat resistif akibat pengaruh perubahan temperatur. Penambahan temperatur pada bahan semikonduktor dapat menyebabkan transisi fase, perubahan struktur maupun perubahan jarak dan sudut atom-atom terdekat serta parameter kisi (Neamen, 2003). Konsentrasi elektron dan *hole* meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur, karena peningkatan temperatur maka energi termal suatu bahan juga akan lebih besar, sehingga memungkinkan elektron dapat berpindah dengan mudah dari pita valensi ke pita konduksi (Callister, 1940).

Menurut Kassap (2001) bahwa perubahan temperatur operasional juga akan mempengaruhi konsentrasi pembawa muatan eletron intrinsik (n_i). Hal ini dikarenakan aktivitas termal yang membuat eksitasi elektron pada ikatan atomnya, dengan bertambahnya temperatur operasional juga menambah konsentrasi elektron intrinsik di dalam bahan (n_i). Persamaan untuk nilai n_i dapat dinyatakan sebagai berikut (Sutrisno, 1986):

$$n_i = B T^{3/2} e^{\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)} \quad (2.1)$$

Keterangan:

n_i = konsentrasi intrinsik (cm^{-2})

B = koefisien yang spesifik terhadap unsur semikonduktornya

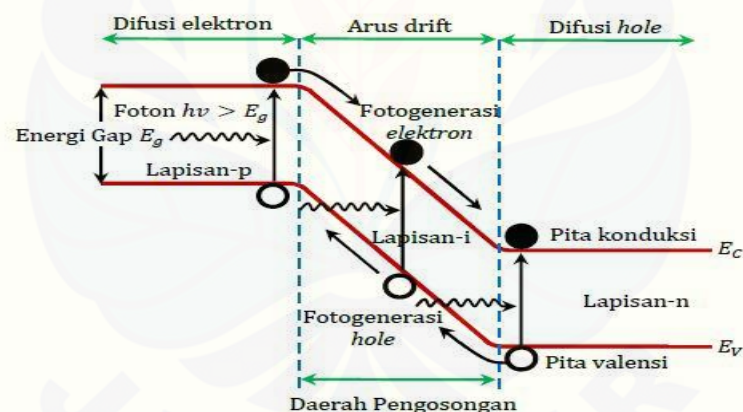
T = temperatur operasional (K)

E_g = energi *gap* (eV)

k = konstanta Boltzman ($8,614 \times 10^{-5} eV/K$)

2.3 Tipe Persambungan p-i-n Sel Surya

Ada beberapa tipe persambungan yang biasa digunakan untuk bahan semikonduktor. Selain dalam bentuk persambungan p-n, sel surya dapat pula disusun dalam tipe persambungan p-i-n, dimana lapisan-i menjadi lapisan aktif yang dapat menciptakan pembawa muatan. Pada persambungan p-i-n, lapisan-p mengandung *hole* sebagai pembawa muatan mayoritas dan elektron sebagai pembawa muatan minoritas, bertindak sebagai lapisan yang akan meneruskan energi foton dari matahari dan terserap olehnya. Foton yang terserap akan mengakibatkan pembentukan pasangan pembawa muatan. Adanya medan listrik internal akan menyebabkan elektron bebas menuju ke level yang lebih tinggi, yaitu pita konduksi dan berubah menjadi *hole* pada pita valensi. Elektron mengalami arus difusi yang meninggalkan atom doping menuju ke lapisan-i (Eliyana, 2008). Bentuk diagram pita energi persambungan p-i-n sel surya ditunjukkan oleh Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Diagram pita energi persambungan p-i-n sel surya (Sumber: Williams, 2009).

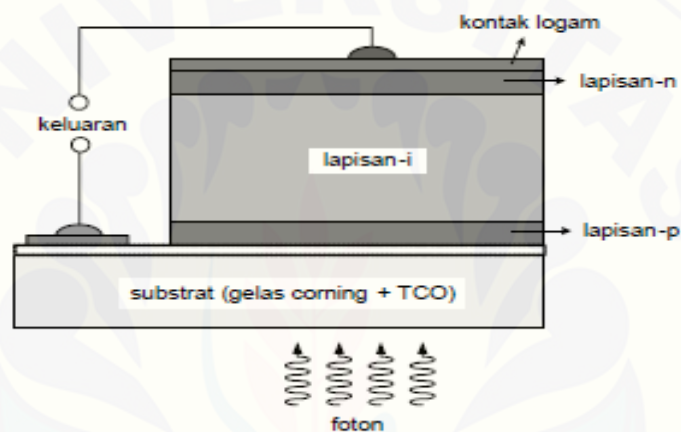
Sel surya p-i-n dapat dipahami sebagai dioda p-i-n. Sel surya p-i-n ini tidak lain adalah penyempurnaan dari sel surya p-n. Sel surya p-i-n tersusun dari semikonduktor daerah lapisan-p dan daerah lapisan-n, dimana daerah lapisan-p ini banyak mengandung *hole*, sedangkan untuk daerah lapisan-n banyak mengandung elektron. Hal terpenting yang membedakan persambungan p-n dengan persambungan p-i-n adalah penambahan lapisan intrinsik yang berada diantara lapisan-p dan lapisan-n atau lapisan deplesi (Kwok, 1995). Penambahan lapisan

intrinsik pada lapisan-i adalah sesuai dengan rapat keadaan lokal. Keadaan ini menyebabkan terjadinya perangkap bagi pembawa muatan, sehingga dapat menghilangkan arus rekombinasi. Kondisi seperti ini akan berpengaruh terhadap kinerja dari sel surya, ketika rapat keadaan lokal dalam lapisan intrinsik semakin kecil, maka efisiensi konversi persambungan p-i-n semakin baik (Takahashi dan Konagai, 1986).

Sifat penting bahan semikonduktor pada lapisan-p adalah konduktivitas yang cukup tinggi dan *gap* optik yang lebih besar dari lapisan-i, sehingga sangat diperlukan energi foton yang digunakan untuk mengeksitasi elektron ke lapisan-i. Apabila lapisan-p terlalu tebal, energi foton akan banyak diserap oleh lapisan-p, sehingga energi foton yang sampai ke lapisan-i menjadi berkurang. Sedangkan, apabila lapisan-p terlalu tipis dapat menyebabkan kontak langsung antara lapisan-i dengan substrat (Eliyana, 2008).

Demikian halnya dengan lapisan-p, dimana lapisan-i juga mempengaruhi proses pembangkitan (generasi) pasangan pembawa muatan (elektron-*hole*) dan proses rekombinasi (penggabungan kembali) elektron-*hole* (Eliyana, 2008). Elektron dan *hole* yang bergerak cenderung selalu akan mengadakan rekombinasi kemudian menghilang. Laju rekombinasi merupakan pasangan elektron dan *hole* per detik per meter kubik, hal tersebut bergantung pada jumlah muatan yang ada. Apabila hanya ada sedikit elektron dan *hole*, maka rekombinasi akan memiliki harga yang rendah, sebaliknya apabila tersedia elektron dan jumlah *hole* yang cukup banyak rekombinasi akan memiliki harga yang tinggi. Seperti halnya pada lapisan-n, dimana hanya tersedia sedikit *hole* namun dengan jumlah elektron yang banyak, sehingga memungkinkan peristiwa rekombinasi yang terjadi sangat tinggi (Subekti, 2003). Ketebalan lapisan-i harus dibuat sedemikian rupa, sehingga tidak terlalu tebal dan tidak terlalu tipis. Lapisan-i yang terlalu tebal dapat lebih efisien untuk penyerapan cahaya, akan tetapi dapat memperbesar peluang terjadinya proses rekombinasi elektron-*hole* dan pembawa muatan yang terperangkap pada keadaan-keadaan terlokalisasi. Selain itu, lapisan-i yang terlalu tebal akan memperkecil medan listrik antara lapisan-p dan lapisan-n (Eliyana, 2008).

Hal lain yang perlu diperhatikan yaitu lapisan-n dalam suatu bahan, dimana lapisan-n harus memiliki konduktivitas yang tinggi, sehingga nilai resistansinya semakin rendah jika dihubungkan dengan kontak logam pada rangkaian eksternal. Dalam bahan yang berdaerah lapisan-n muatan pembawa mayoritasnya berupa elektron. Sehingga bahan yang berdaerah lapisan-n secara umum memiliki konduktivitas yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan lapisan-i (Sze,1985). Bentuk struktur dasar sel surya persambungan p-i-n ditunjukkan oleh Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Struktur dasar sel surya persambungan p-i-n (Sumber: Usman, 2006).

2.4 Persamaan Dasar Bahan Semikonduktor

Persamaan poisson secara umum menjelaskan fenomena perubahan medan listrik dalam perangkat akibat perbedaan konsentrasi pembawa muatannya (Hack dan Shur, 1985). Dalam kasus ini, perubahan medan listrik sebanding dengan nilai pembawa muatannya, apabila hal ini dihubungkan dengan besar nilai permitivitas bahan. Semakin kecil nilai permitivitas bahan maka semakin besar nilai medan listrik yang dihasilkan (Goetzberger *et al.*, 1998). Hubungan antara pembawa muatan, medan listrik dan permitivitas bahan dapat dituliskan secara matematis melalui persamaan poisson berikut (Rio dan Iida, 1999):

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

Keterangan:

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

ψ = potensial elektrostatik (*volt*)

ϵ = permitivitas listrik bahan (*F/cm*)

ρ = rapat muatan ruang (*cm⁻³*)

Adapun persamaan kontinuitas pada bahan semikonduktor biasa dikenal dengan proses generasi dan rekombinasi. Proses generasi merupakan proses terbentuknya pasangan elektron-hole per detik per meter kubik. Sedangkan proses rekombinasi merupakan proses terlepasnya pasangan elektron-hole per detik per meter kubik. Dari kedua proses tersebut, dapat diketahui nilai rapat arus pembawa muatan yang didefinisikan dalam persamaan kontinuitas (Rio dan Iida, 1999). Dalam hal ini, penambahan laju generasi dari proses rekombinasi pada dasarnya disebabkan oleh adanya distribusi pembawa muatan dari elektron maupun *hole*. Selanjutnya, untuk persamaan kontinuitas secara umum dapat dinyatakan sebagai berikut (Hack dan Shur, 1985):

$$-\frac{1}{q}\nabla J_n = G - R \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{q}\nabla J_p = G - R \quad (2.4)$$

Keterangan:

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

\vec{J}_n = rapat arus *hole* (*A/cm²*)

\vec{J}_p = rapat arus elektron (*A/cm²*)

G = laju generasi (*cm⁻³s⁻¹*)

R = laju rekombinasi (*cm⁻³s⁻¹*)

Variabel konsentrasi elektron (n) dan *hole* (p) menggambarkan suatu kesetimbangan pembawa muatan pada tingkat quasi-fermi, yang dinyatakan dalam fungsi dan variabel u dan v . Sehingga persamaan konsentrasi elektron (n) dan *hole* (p) dapat dinyatakan (Danielsson, 2000):

$$n = n_i e^{\psi u} \quad (2.5)$$

$$p = p_i e^{-\psi v} \quad (2.6)$$

Keterangan:

n_i = konsentrasi elektron intrinsik (cm^{-2})

p_i = konsentrasi *hole* intrinsik (cm^{-2})

u = variabel bebas elektron

v = variabel bebas *hole*

ψ = potensial elektrostatik (*volt*)

2.4.1 Persamaan Poisson dan Kontinuitas pada Bahan Berstruktur Kristal (c-Si)

Rapat muatan ruang (ρ) dalam hal ini menyatakan muatan pembawa negatif total, yang diberikan oleh elektron dalam pita konduksi dan meninggalkan muatan pembawa positif yaitu *hole* yang berasal dari pita valensi dengan meniadakan komponen pembawa muatan terperangkap (Rio dan Iida, 1999).

$$\rho = q(p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad (2.7)$$

Maka persamaan poissonnya:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{q(p - n + N_D^+ - N_A^-)}{\epsilon} \quad (2.8)$$

Keterangan:

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

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

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

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

N_D^+ = konsentrasi atom donor terionisasi (cm^{-3})

N_A^- = konsentrasi atom akseptor terionisasi (cm^{-3})

ϵ = permitivitas bahan (F/cm)

Penumpukan elektron dan *hole* pada daerah deplesi menyebabkan terjadinya potensial elektrostatik atau potensial penghalang (ψ). Potensial penghalang tersebut akan menimbulkan medan listrik (E). Namun jika konsentrasi donor dan akseptor terionisasi dibawah keadaan normal, maka dapat dinyatakan (Rio dan Iida, 1999):

$$N_D^+ \approx N_D \quad (2.9)$$

$$N_A^- \approx N_A \quad (2.10)$$

Laju generasi (G) dan laju rekombinasi (R) pada bahan kristal (c-Si) dapat dituliskan sebagai berikut (Danielsson, 2000):

$$G = \frac{F\alpha}{1-P} (e^{-\alpha x} + P e^{\alpha x}) \quad (2.11)$$

dan

$$R = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} \quad (2.12)$$

Keterangan:

- G = laju generasi ($cm^{-3}s^{-1}$)
- F = rapat fluk foton ($cm^{-2}s^{-1}$)
- α = koefisien absorpsi (cm^{-1})
- P = faktor transmisi cahaya (S/cm)
- x = posisi dalam sel surya dari tepi teratas lapisan-p (cm)
- R = laju rekombinasi ($cm^{-3}s^{-1}$)
- p = konsentrasi *hole* (cm^{-3})
- n = konsentrasi elektron (cm^{-3})
- n_i = konsentrasi intrinsik (cm^{-3})
- p_1 = konsentrasi *hole* yang terperangkap (cm^{-3})
- n_1 = konsentrasi elektron yang terperangkap (cm^{-3})
- τ_p = waktu hidup (*lifetime*) rekombinasi *hole* (s)
- τ_n = waktu hidup (*lifetime*) rekombinasi elektron (s)

2.4.2 Persamaan Poisson dan Kontinuitas pada Bahan Berstruktur Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H)

Persamaan poisson untuk bahan amorf terhidrogenasi (a-Si:H) dapat dinyatakan (Hack dan Shur, 1985):

$$\nabla \cdot \vec{E} = -\nabla^2 \psi = \frac{q}{\epsilon} (p - n + N_D^+ - N_A^- + p_t - n_t) \quad (2.13)$$

Keterangan:

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

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

ϵ = permitivitas bahan (F/cm)

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

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

N_D^+ = konsentrasi atom donor terionisasi (cm^{-3})

N_A^- = konsentrasi atom akseptor terionisasi (cm^{-3})

p_t = konsentrasi *hole* yang terperangkap (cm^{-1})

n_t = konsentrasi elektron yang terperangkap (cm^{-1})

Untuk rapat energi ($g(E)$) untuk keadaan yang menyerupai donor atau menyerupai akseptor untuk bahan a-Si:H sebagai berikut (Hack dan Shur, 1985):

$$g(E) = g_D(E) + g_A(E) \quad (2.14)$$

dimana

$$g_D(E) = g_{Dmin} \exp\left(\frac{E_{mc} - E}{E_D}\right) \quad (2.15)$$

$$g_A(E) = g_{Amin} \exp\left(\frac{E - E_{mc}}{E_A}\right) \quad (2.16)$$

Persamaan Poisson digunakan untuk mendapatkan persamaan konsentrasi pembawa muatan yang terperangkap, dimana faktor mengenai keadaan cacat dan keadaan terlokalisasi perlu dihitung dalam bahan berbasis a-Si:H. Keadaan-keadaan cacat berperan sebagai perangkap pembawa muatan menyebabkan pergeseran tingkat energi fermi dalam material silikon amorf, sehingga posisinya dalam celah pita energi dapat berubah-ubah yang dinyatakan sebagai berikut (Hack dan Shur, 1985):

$$n_t = \frac{g_{min} E_A}{2} \left[\left\{ \left(\frac{cp}{n+cp} \right) \left(\frac{n+cp}{cN_V} \right)^{\frac{kT}{E_A}} - 1 \right\} \exp\left(\frac{E_V - E_{mc}}{E_A}\right) + \left(\frac{n}{n+cp} \right) \left(\frac{n+cp}{N_C} \right)^{\frac{kT}{E_A}} \exp\left(\frac{E_C - E_{mc}}{E_A}\right) \right] \quad (2.17)$$

$$p_t = \frac{g_{min}E_D}{2} \left[\left\{ 1 - \left(\frac{cn + 2p}{cn + p} \right) \left(\frac{cn + p}{cN_C} \right)^{\frac{kT}{E_D}} \right\} \exp \left(\frac{E_{mc} - E_C}{E_D} \right) + \left(\frac{p}{cn + p} \right) \left(\frac{cn + p}{N_V} \right)^{\frac{kT}{E_D}} \exp \left(\frac{E_{mc} - E_V}{E_D} \right) \right] \quad (2.18)$$

Keterangan:

g_{min} = kerapatan energi minimum pada konsentrasi dopan (eV^{-1})

c = rasio antara perangkat bermuatan dan perangkat netral

k = konstanta Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} JK^{-1}$)

T = temperatur (K)

E_D = karakteristik kemiringan energi keadaan terlokalisasi donor (eV)

E_A = karakteristik kemiringan energi keadaan terlokalisasi akseptor (eV)

E_C = energi yang bersesuaian pada pita konduksi (eV)

E_V = energi yang bersesuaian pada pita valensi (eV)

N_C = rapat keadaan efektif pada pita konduksi (cm^{-3})

N_V = rapat keadaan efektif pada pita valensi (cm^{-3})

E_{mc} = selisih energi antara rapat keadaan minimum dengan tepi atas pita konduksi (eV)

Laju generasi dan rekombinasi pembawa muatan yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan kontinuitas pada bahan silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) sebagai berikut (Hack dan Shur, 1985):

$$G = \frac{G_0 \alpha(\lambda)}{1 - P} (e^{-\alpha x} + P e^{\alpha x}) \quad (2.19)$$

$$R = (pn - n_i^2) c v_{th} \sigma_N \frac{g_{min}}{2} \left[E_A \left(\frac{1}{n + cp} \right) \left\{ \left(\frac{n + cp}{N_C} \right)^{\frac{kT}{E_A}} - \exp \left(\frac{E_C - E_{mc}}{E_A} \right) - \left(\frac{n + cp}{cN_V} \right)^{\frac{kT}{E_A}} \exp \left(\frac{E_V - E_{mc}}{E_A} \right) \right\} - E_D \left(\frac{1}{cn + p} \right) \left\{ \left(\frac{cn + p}{cN_C} \right)^{\frac{kT}{E_D}} \exp \left(\frac{E_{mc} - E_C}{E_D} \right) - \left(\frac{cn + p}{N_V} \right)^{\frac{kT}{E_D}} \exp \left(\frac{E_{mc} - E_V}{E_D} \right) \right\} \right] \quad (2.20)$$

Keterangan:

G	= laju generasi ($cm^{-3}s^{-1}$)
R	= laju rekombinasi ($cm^{-3}s^{-1}$)
G_0	= rapat fluks foton ($cm^{-2}s^{-1}$)
P	= faktor transmisi cahaya (S/cm)
x	= posisi dalam sel surya dari tepi teratas lapisan-p (cm)
p	= konsentrasi <i>hole</i> (cm^{-1})
n	= konsentrasi elektron (cm^{-1})
n_i	= konsentrasi intrinsik (cm^{-2})
c	= rasio antara perangkat bermuatan dan perangkat netral
$v_{th}\sigma_N$	= penampang perangkat netral pada kecepatan termal ($cm^{-3}s^{-1}$)
g_{min}	= kerapatan energi minimum pada konsentrasi dopan (eV^{-1})
E_D	= karakteristik kemiringan energi keadaan terlokalisasi donor (eV)
E_A	= karakteristik kemiringan energi keadaan terlokalisasi akseptor (eV)
E_C	= energi yang bersesuaian pada pita konduksi (eV)
E_V	= energi yang bersesuaian pada pita valensi (eV)
N_C	= rapat keadaan efektif pada pita konduksi (cm^{-3})
N_V	= rapat keadaan efektif pada pita valensi (cm^{-3})
E_{mc}	= selisih energi antara rapat keadaan minimum dengan tepi atas pita konduksi (eV)

2.4.3 Persamaan Poisson dan Kontinuitas pada Bahan Berstruktur Mikrokrystal Terhidrogenasi (μc -Si:H)

Bahan silikon mikrokrystal terhidrogenasi (μc -Si:H) merupakan bahan semikonduktor silikon yang memiliki struktur kristal namun dalam fase amorf. Sehingga persamaan poisson dan kontinuitas untuk bahan silikon mikrokrystal terhidrogenasi (μc -Si:H) merupakan gabungan antara persamaan poisson dan kontinuitas dari bahan silikon kristal (c-Si) dan silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) seperti berikut (Dewi, 2017):

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\epsilon}{q} \nabla^2 \psi = -(e^{\psi} u - e^{-\psi} v - N_D^+ + N_A^-) - p + n - N_D^+ + N_A^-$$

$$\begin{aligned}
& -g_{Dmin}E_D \left[\exp\left(\frac{E_{mc} - E_C}{E_D}\right) \left\{ 1 - \left(\frac{2e^{-\psi v} + ce^{\psi u}}{e^{-\psi v} + ce^{\psi u}}\right) \left(\frac{n_i e^{-\psi v} + cn_i e^{\psi u}}{cN_C}\right)^{-\frac{kT}{E_D}} \right\} \right. \\
& \left. + \exp\left(\frac{E_{mc} - E_V}{E_D}\right) \left\{ \left(\frac{e^{-\psi v}}{e^{-\psi v} + ce^{\psi u}}\right) \left(\frac{n_i e^{-\psi v} + cn_i e^{\psi u}}{N_V}\right)^{\frac{kT}{E_D}} \right\} \right] \\
& + g_{Amin}E_A \left[\exp\left(\frac{E_V - E_{mc}}{E_A}\right) \left\{ \left(\frac{ce^{-\psi v}}{ce^{-\psi v} + e^{\psi u}}\right) \left(\frac{n_i ce^{-\psi v} + n_i e^{\psi u}}{cN_V}\right)^{-\frac{kT}{E_A}} - 1 \right\} \right. \\
& \left. + \exp\left(\frac{E_C - E_{mc}}{E_A}\right) \left\{ \left(\frac{e^{\psi u}}{ce^{-\psi v} + e^{\psi u}}\right) \left(\frac{n_i ce^{-\psi v} + n_i e^{\psi u}}{N_C}\right)^{\frac{kT}{E_A}} \right\} \right] \quad (2.21)
\end{aligned}$$

Keterangan:

- \vec{E} = medan listrik (V / cm)
 q = muatan listrik ($1,602 \times 10^{-19} C$)
 ϵ = permitivitas bahan (F/cm)
 u = variabel bebas elektron
 v = variabel bebas *hole*
 N_D^+ = konsentrasi atom donor terionisasi (cm^{-3})
 N_A^- = konsentrasi atom akseptor terionisasi (cm^{-3})
 p_t = konsentrasi *hole* yang terperangkap (cm^{-3})
 n_t = konsentrasi elektron yang terperangkap (cm^{-3})
 T = temperatur (K)
 p = konsentrasi *hole* (cm^{-1})
 n = konsentrasi elektron (cm^{-1})
 n_i = konsentrasi intrinsik (cm^{-2})
 c = rasio antara perangkat bermuatan dan perangkat netral
 $v_{th}\sigma_N$ = penampang perangkat netral pada kecepatan termal ($cm^{-3}s^{-1}$)
 g_{min} = kerapatan energi minimum pada konsentrasi dopan (eV^{-1})
 E_D = karakteristik kemiringan energi keadaan terlokalisasi donor (eV)
 E_A = karakteristik kemiringan energi keadaan terlokalisasi akseptor (eV)
 E_C = energi yang bersesuaian pada pita konduksi (eV)
 E_V = energi yang bersesuaian pada pita valensi (eV)

- N_C = rapat keadaan efektif pada pita konduksi (cm^{-3})
 N_V = rapat keadaan efektif pada pita valensi (cm^{-3})
 E_{mc} = selisih energi antara rapat keadaan minimum dengan tepi atas pita konduksi (eV)

Sedangkan bentuk persamaan kontinuitas untuk bahan silikon mikrokrystal terhidrogenasi (μc -Si:H) untuk distribusi elektron dan *hole* sebagai berikut (Dewi, 2017):

$$\begin{aligned}
 -\nabla(\mu_n n_i e^{\psi} u \nabla \psi + D_n n_i e^{\psi} \nabla u) &= \frac{G_0 \alpha(\lambda)}{1-P} (e^{-\alpha x} + P e^{\alpha x}) - n_i (uv - 1) cv \sigma_N \\
 &\left[\left(\frac{g_{Amin} E_A}{e^{\psi} u + ce^{-\psi} v} \right) \left\{ \begin{array}{l} \exp\left(\frac{E_C - E_{mc}}{E_A}\right) \left(\frac{n_i (e^{\psi} u + ce^{\psi} v)}{N_C}\right)^{\frac{kT}{E_A}} \\ -\exp\left(\frac{E_V - E_{mc}}{E_A}\right) \left(\frac{n_i (e^{\psi} u + ce^{-\psi} v)}{cN_V}\right)^{\frac{kT}{E_A}} \end{array} \right\} \right. \\
 &+ \left. \frac{g_{Dmin} E_D}{(ce^{\psi} u + e^{-\psi} v)} \left\{ \begin{array}{l} \exp\left(\frac{E_{mc} - E_C}{E_D}\right) \left(\frac{n_i (ce^{\psi} u + e^{-\psi} v)}{N_V}\right)^{\frac{kT}{E_D}} \\ -\exp\left(\frac{E_{mc} - E_C}{E_D}\right) \left(\frac{n_i (ce^{\psi} u + e^{-\psi} v)}{cN_C}\right)^{\frac{kT}{E_D}} \end{array} \right\} \right] \quad (2.22)
 \end{aligned}$$

dan

$$\begin{aligned}
 -\nabla(\mu_p n_i e^{-\psi} v \nabla \psi + D_p n_i e^{-\psi} \nabla v) &= \frac{G_0 \alpha(\lambda)}{1-P} (e^{-\alpha x} + P e^{\alpha x}) - n_i (uv - 1) cv \sigma_N \\
 &\left[\left(\frac{g_{Amin} E_A}{e^{\psi} u + ce^{-\psi} v} \right) \left\{ \begin{array}{l} \exp\left(\frac{E_C - E_{mc}}{E_A}\right) \left(\frac{n_i (e^{\psi} u + ce^{-\psi} v)}{N_C}\right)^{\frac{kT}{E_A}} \\ -\exp\left(\frac{E_V - E_{mc}}{E_A}\right) \left(\frac{n_i (e^{\psi} u + ce^{-\psi} v)}{cN_V}\right)^{\frac{kT}{E_A}} \end{array} \right\} \right. \\
 &+ \left. \frac{g_{Dmin} E_D}{ce^{\psi} u + e^{-\psi} v} \left\{ \begin{array}{l} \exp\left(\frac{E_{mc} - E_V}{E_D}\right) \left(\frac{n_i (ce^{\psi} u + e^{-\psi} v)}{N_V}\right)^{\frac{kT}{E_D}} \\ -\exp\left(\frac{E_{mc} - E_C}{E_D}\right) \left(\frac{n_i (ce^{\psi} u + e^{-\psi} v)}{cN_C}\right)^{\frac{kT}{E_D}} \end{array} \right\} \right] \quad (2.23)
 \end{aligned}$$

2.4.4 Persamaan Rapat Arus pada Bahan Semikonduktor

Aliran elektron dan *hole* menimbulkan adanya arus pada bahan semikonduktor. Dalam kasus ini, proses pergerakan pembawa muatan ini biasa dikenal dengan mekanisme transport. Pada bahan semikonduktor mekanisme transport terdiri dari dua yakni rapat arus *drift* dan *difusi* (Rio dan Iida, 1999). Rapat arus *drift* merupakan aliran muatan yang terjadi dikarenakan adanya medan listrik. Rata-rata kecepatan *drift* pembawa muatan akibat medan listrik dinyatakan dengan suatu parameter mobilitas. Adanya tumbukan antara atom penyusun semikonduktor dengan atom impuritas yang terionisasi mempengaruhi gerakan elektron dan *hole* dalam semikonduktor (Subekti, 2003). Persamaan rapat arus *drift* selanjutnya dituliskan pada persamaan (2.24) dan persamaan (2.25), untuk persamaan rapat arus total *drift* yang merupakan penjumlahan rapat arus *drift* elektron dan *hole* dinyatakan pada persamaan (2.26) (Subekti, 2003):

$$\vec{J}_n = qn\mu_n\vec{E} = qn\mu_n\nabla\psi \quad (2.24)$$

$$\vec{J}_p = qp\mu_p\vec{E} = qp\mu_p\nabla\psi \quad (2.25)$$

$$\vec{J}_T = \vec{J}_n + \vec{J}_p = q(n\mu_n + p\mu_p)\vec{E} = q(n\mu_n + p\mu_p)\nabla\psi \quad (2.26)$$

Keterangan:

\vec{J}_p = rapat arus *hole* (A/cm^2)

\vec{J}_n = rapat arus elektron (A/cm^2)

\vec{J}_T = rapat arus total (A/cm^2)

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

μ_p = mobilitas *hole* (cm^2/Vs)

μ_n = mobilitas elektron (cm^2/Vs)

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

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

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

Perbedaan aliran konsentrasi elektron dan *hole* menyebabkan adanya proses *difusi* yang mengalir dari daerah dengan konsentrasi tinggi ke daerah dengan konsentrasi rendah. Rapat arus *difusi* ditentukan besarnya oleh gradien konsentrasi

pembawa muatan. Dalam hal ini, besar rapat arus *difusi* sebanding dengan besar gradien konsentrasi. Rapat arus *difusi* dituliskan pada persamaan (2.27) dan (2.28), untuk rapat arus total *difusi* yang merupakan penjumlahan rapat arus *difusi* elektron dan *hole* dinyatakan pada persamaan (2.29) seperti berikut (Gray, 2013):

$$\vec{j}_n^{difusi} = -q\mu_n \frac{kT}{q} \left(-\frac{\partial n}{\partial x} \right) = qD_n (\nabla n) \quad (2.27)$$

$$\vec{j}_p^{difusi} = -q\mu_p \frac{kT}{q} \left(-\frac{\partial p}{\partial x} \right) = qD_p (-\nabla p) \quad (2.28)$$

$$\vec{J}_T = \vec{j}_n^{difusi} + \vec{j}_p^{difusi} = qD_n(\nabla n) + qD_p(-\nabla p) = q(D_n \nabla n - D_p \nabla p) \quad (2.29)$$

Keterangan:

\vec{j}_n^{difusi} = rapat arus elektron (A/cm^2)

\vec{j}_p^{difusi} = rapat arus *hole* (A/cm^2)

\vec{J}_T = rapat arus total (A/cm^2)

T = temperatur (K)

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

μ_n = mobilitas elektron (cm^2/Vs)

μ_p = mobilitas *hole* (cm^2/Vs)

D_p = koefisien difusi *hole* (cm^2/s)

D_n = koefisien difusi elektron (cm^2/s)

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

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

Nilai mobilitas yang terdapat pada persamaan rapat arus *drift* dan nilai koefisien *difusi* yang terdapat pada persamaan *difusi* merupakan dua kuantitas yang terikat (Millman, 1993). Kedua persamaan tersebut terikat dalam hubungan Einstein (pada temperatur ruang) yang dinyatakan sebagai berikut (Millman, 1993):

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q} \quad (2.30)$$

Kerapatan arus total adalah penjumlahan dari rapat arus *drift* dan *difusi*. Persamaan (2.24) dijumlahkan dengan persamaan (2.27) dan persamaan (2.25) dengan persamaan (2.28), maka diperoleh persamaan sebagai berikut (Millman, 1993):

$$\vec{J}_n = q\mu_n \left(n \vec{E} + \frac{kT}{q} \nabla n \right) = q(\mu_n n \nabla \psi + D_n \nabla n) \quad (2.31)$$

$$\vec{J}_p = q\mu_p \left(p \vec{E} + \frac{kT}{q} \nabla p \right) = q(\mu_p p \nabla \psi + D_p \nabla p) \quad (2.32)$$

Keterangan:

- \vec{J}_n = rapat arus elektron (A/cm^2)
- \vec{J}_p = rapat arus *hole* (A/cm^2)
- q = muatan listrik ($1,602 \times 10^{-19} C$)
- T = temperatur operasional (K)
- k = konstanta Boltzman ($8,614 \times 10^{-5} eV/K$)
- μ_n = mobilitas elektron (cm^2/Vs)
- μ_p = mobilitas *hole* (cm^2/Vs)
- p = konsentrasi *hole* (cm^{-3})
- n = konsentrasi elektron (cm^{-3})
- \vec{E} = medan listrik (V/cm)

2.5 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah metode numerik yang digunakan sebagai salah satu solusi pendekatan untuk memecahkan berbagai permasalahan fisik. Adapun dasar dari metode elemen hingga yakni membagi obyek menjadi elemen-elemen kecil yang jumlahnya berhingga, dengan kondisi batas (*boundary condition*) yang diberikan. Dari elemen-elemen tersebut dapat disusun persamaan-persamaan matriks yang biasa diselesaikan secara numerik dan hasilnya menjadi jawaban dari kondisi yang diberikan obyek tersebut. Metode elemen hingga dapat mengubah suatu masalah yang memiliki jumlah derajat kebebasan tidak berhingga

menjadi suatu masalah dengan jumlah derajat kebebasan tertentu sehingga proses pemecahannya lebih sederhana (Ridwan, 2010).

Metode elemen hingga dapat digunakan untuk memodifikasi sesuai dengan struktur geometri yang disimulasikan, karena metode ini salah satu metode numerik yang penggunaannya fleksibel. Metode elemen hingga ini dapat diterapkan pada simulasi bentuk 1D, 2D maupun 3D pada divais dengan struktur geometri yang rumit. Pendekatan numerik menggunakan metode elemen hingga memiliki kelebihan dibandingkan *finite different method* yaitu adanya bentuk yang berbeda dari elemen, sehingga tidak membuat metode ini susah untuk dilakukan. Selain itu, metode elemen hingga lebih fleksibel digunakan dalam pemodelan divais semikonduktor yang memiliki geometri yang tidak rata (Usman, 2006).

Variabel yang digunakan pada simulasi divais semikonduktor yaitu Ψ , p dan n . Solusi umum masing-masing variabel tersebut pada kasus simulasi divais sel surya dengan menggunakan metode elemen hingga, konsentrasi *hole*, konsentrasi elektron, dan potensial elektrostatik dapat dituliskan dalam solusi umum untuk semua elemen sebagai berikut (Danielsson, 2000):

$$\Psi = \sum_{j=1}^a \Psi_j \quad (2.33)$$

$$p = \sum_{j=1}^a p_j \quad (2.34)$$

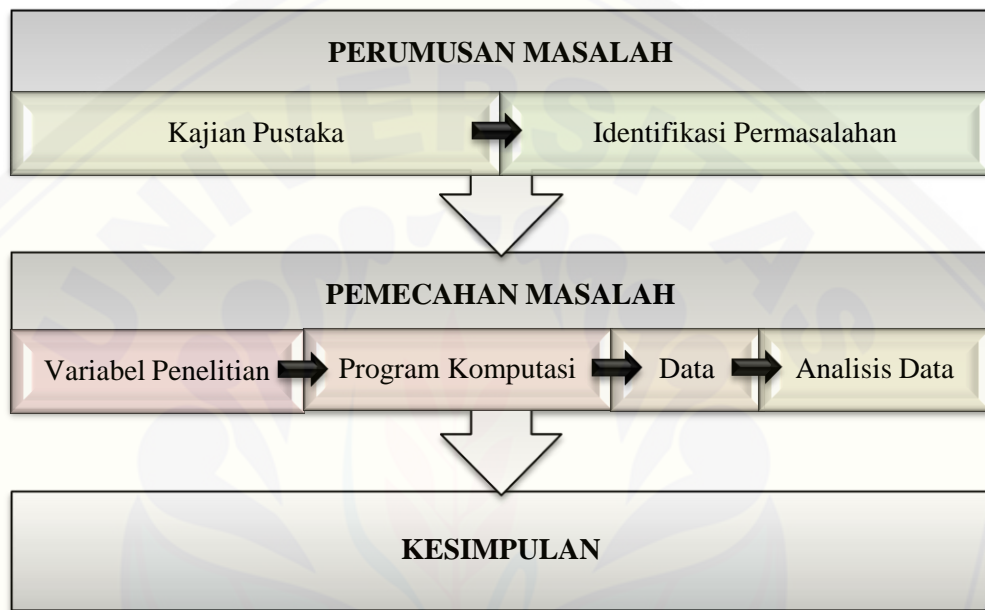
$$n = \sum_{j=1}^a n_j \quad (2.35)$$

variabel Ψ , p dan n berhubungan dengan tingkat quasi-fermi pembawa muatan yang dituliskan dalam persamaan (2.5) dan (2.6), dimana Ψ adalah potensial elektrostatik, a adalah jumlah elemen, j adalah elemen batas, v adalah variabel bebas *hole*, dan u adalah variabel bebas elektron (Danielsson, 2000).

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Kegiatan Penelitian

Rancangan kegiatan yang dilakukan pada penelitian ini akan ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alur rancangan kegiatan penelitian.

Proses penelitian diawali dengan kajian pustaka. Berdasarkan hasil kajian pustaka, diperoleh perubahan temperatur operasional yang mempengaruhi konsentrasi pembawa muatan di dalam bahan semikonduktor. Permasalahan yang diselesaikan dalam penelitian ini yaitu menentukan distribusi pembawa muatan sel surya berbasis silikon kristal (c-Si), amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan mikrokristal terhidrogenasi (μ c-Si:H), dengan memberikan variasi pada temperatur operasional dan variasi tegangan *input*. Hal ini dikarenakan aktivitas termal yang menyebabkan elektron tereksitasi dari ikatan atomnya. Langkah selanjutnya, simulasi dilakukan dengan beberapa variabel penelitian yang diproses menggunakan program komputer yaitu *software* MATLAB 5.3 dan FEMLAB 2.1. Kegiatan penelitian berupa simulasi ini menggunakan PC Laptop Samsung A6,

spesifikasi processor AMD A6-4400M APU with Radeon(tm) HD Graphics CPU 2.70 Ghz RAM 2.00 GB, dan sistem 32-bit. Dari proses simulasi ini didapatkan data konsentrasi elektron dan *hole* sebagai hasil, yang selanjutnya dianalisa untuk memperoleh kesimpulan dari penelitian yang dilakukan.

3.2 Jenis dan Sumber Data Penelitian

Penelitian yang dilakukan bersifat kuantitatif karena data yang diperoleh berasal dari hasil perhitungan numerik. Penelitian ini berupa kegiatan simulasi pengaruh variasi temperatur operasional terhadap distribusi pembawa muatan sel surya berbasis silikon kristal (c-Si), amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan mikrokrystal terhidrogenasi (μ c-Si:H) menggunakan metode elemen hingga. Data yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada Priyanka (2012). Bentuk geometri dan ukuran lapisan silikon kristal (c-Si), amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan mikrokrystal terhidrogenasi (μ c-Si:H) mengacu pada Usman (2006) serta beberapa referensi dari jurnal dan buku. Sehingga data yang digunakan merupakan data sekunder.

3.3 Variabel Penelitian

Variabel penelitian dalam hal ini adalah variabel yang digunakan sebagai *input* dalam kegiatan simulasi. Variabel penelitian ditunjukkan pada Tabel 3.1, Tabel 3.2 dan Tabel 3.3. Variasi temperatur operasional dan tegangan *input* merupakan variabel bebas. Sedangkan variabel terikat yang nilainya dipengaruhi oleh variabel bebas berupa distribusi pembawa muatan sel surya berbasis silikon kristal (c-Si), amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan mikrokrystal terhidrogenasi (μ c-Si:H).

3.4 Kerangka Pemecahan Masalah

3.4.1 Kajian Pustaka

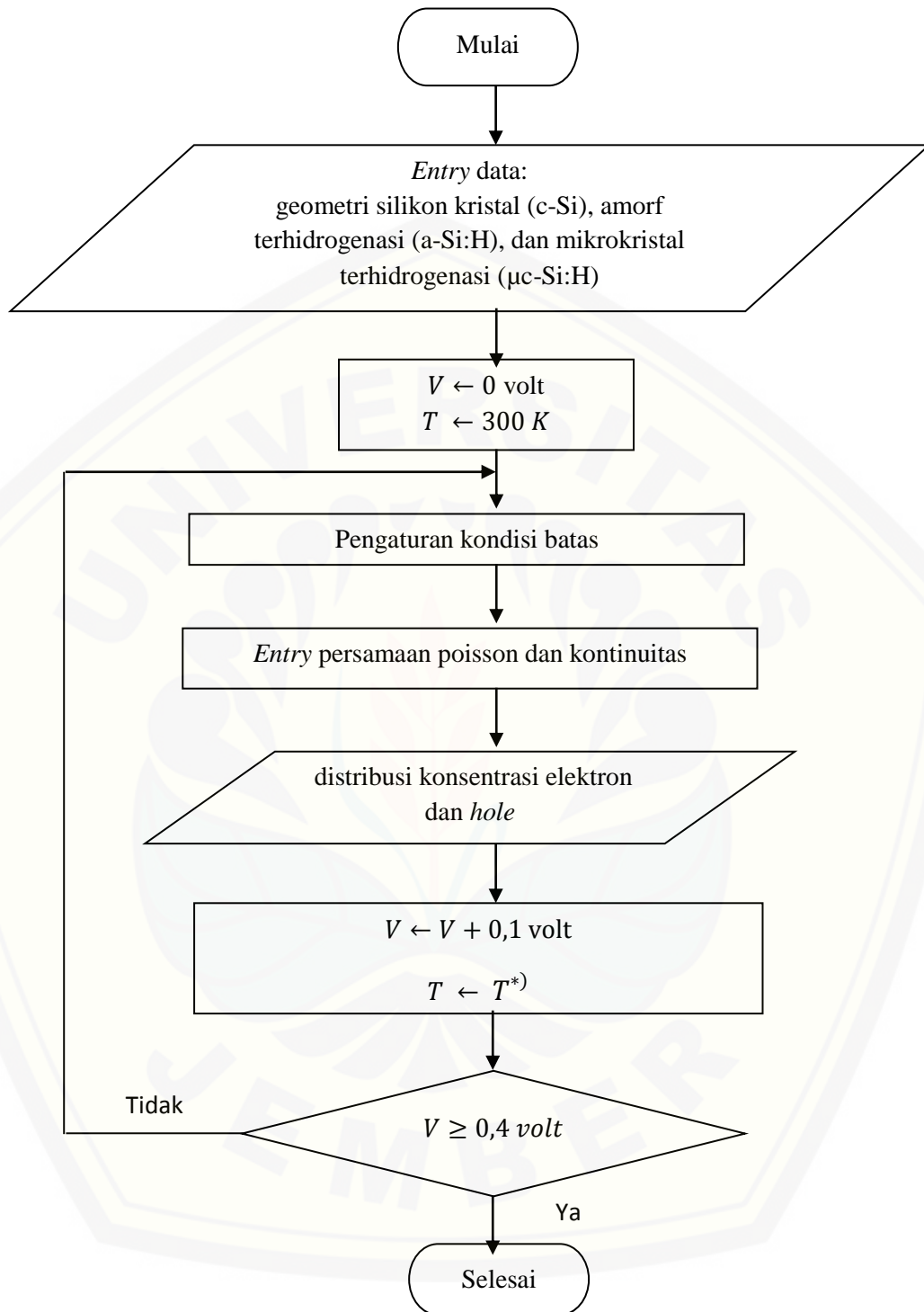
Langkah awal yang dilakukan dalam penelitian ini berupa kajian pustaka, yang merujuk ke beberapa referensi atau literatur yang ada berupa teori maupun penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Hal ini dilakukan untuk

mendapatkan informasi yang berkaitan dengan sifat-sifat bahan sel surya, karakteristik setiap lapisan maupun parameter-parameter *input* yang digunakan dalam proses simulasi. Selanjutnya, informasi-informasi yang diperoleh akan dijadikan sebagai bahan pendukung dalam kegiatan penelitian, yang dilakukan mengenai variasi temperatur operasional dan variasi nilai tegangan *input* terhadap distribusi pembawa muatan sel surya berbasis silikon kristal (c-Si), amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan mikrokristal terhidrogenasi (μ c-Si:H). Perlakuan yang diberikan berupa variasi temperatur operasional dan tegangan *input* akan berdampak pada konsentrasi pembawa muatan, dimana semakin bertambahnya temperatur operasional dan tegangan *input* yang diberikan maka konsentrasi pembawa muatan semakin bertambah pula (Kurniawan, 2013).

Kegiatan simulasi pada penelitian ini menggunakan tipe persambungan p-i-n dalam bentuk 2D dengan metode elemen hingga. Hal tersebut dikarenakan lapisan-i berperan sangat penting dalam meningkatkan efisiensi konversi sel surya. Untuk ketebalan lapisan-i harus dibuat sedemikian rupa, sehingga tidak terlalu tebal dan tidak terlalu tipis. Lapisan-i yang terlalu tebal dapat lebih efisien untuk penyerapan cahaya, akan tetapi dapat memperbesar peluang terjadinya proses rekombinasi elektron-hole yang terperangkap pada keadaan-keadaan terlokalisasi. Selain itu, lapisan-i yang terlalu tebal akan memperkecil medan listrik antara lapisan-p dan lapisan-n (Eliyana, 2008).

3.4.2 Mekanisme Simulasi

Kegiatan simulasi dilakukan untuk mendapatkan gambaran visual yang menunjukkan distribusi pembawa muatan pada divais sel surya berbasis silikon kristal (c-Si), amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan mikrokristal terhidrogenasi (μ c-Si:H). Alur simulasi untuk mendapatkan distribusi sel surya berbasis silikon kristal (c-Si), amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan mikrokristal terhidrogenasi (μ c-Si:H) pada persambungan p-i-n dalam bentuk 2D ditunjukkan pada Gambar 3.2.



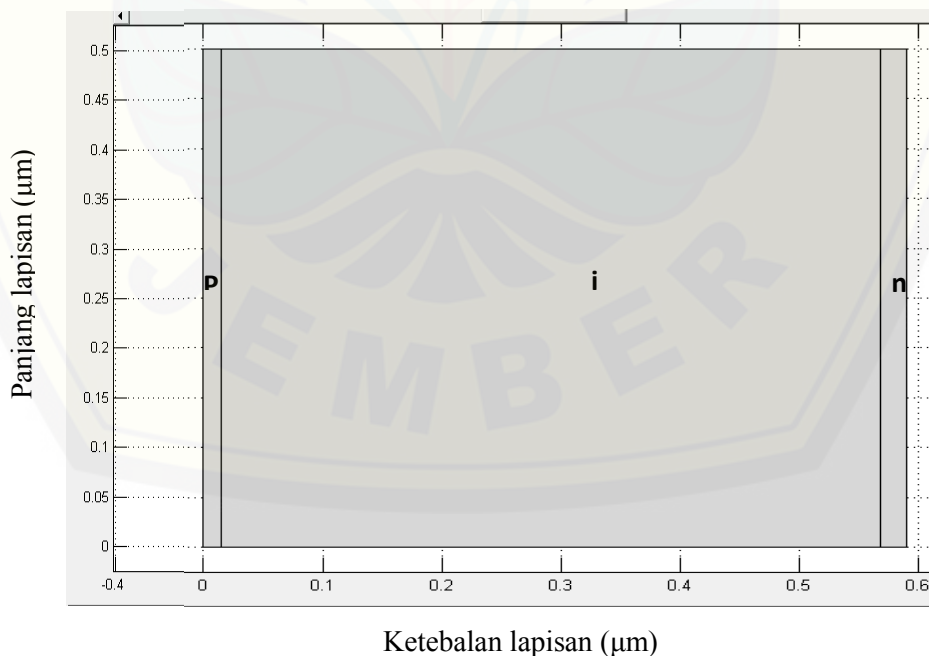
Gambar 3.2 Diagram alir kegiatan simulasi

(Keterangan: T^* akan divariasikan sebesar 300 K, 315 K, 330 K, 345 K, dan 360 K)

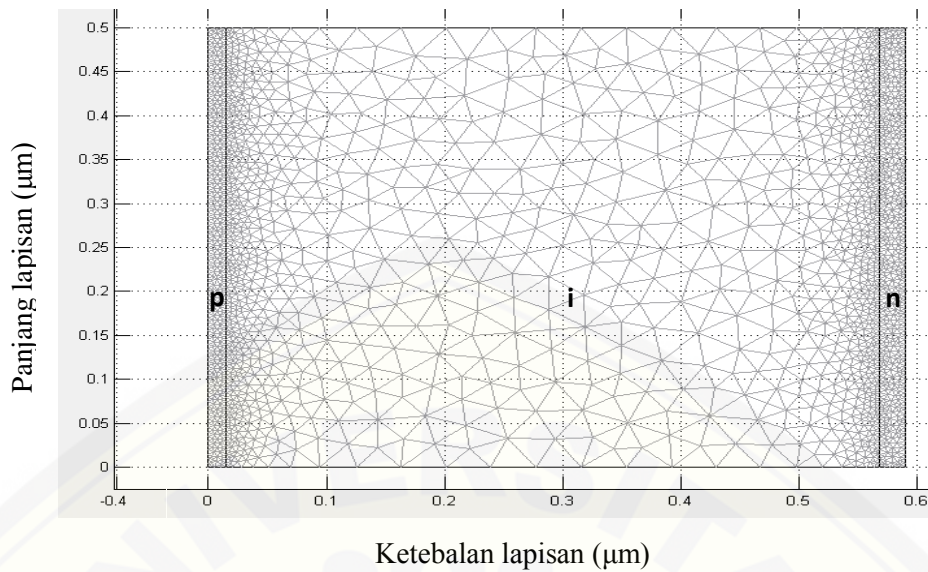
a. Geometri Simulasi

Bentuk geometri sel surya berbasis silikon kristal (c-Si), amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan mikrokrystal terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$) pada penelitian ini dalam bentuk 2D. Ketebalan lapisan yang digunakan untuk ketiga bahan yang berbeda ini mengacu pada penelitian Usman (2006), dengan ketebalan lapisan-p adalah $0,015 \mu\text{m}$, ketebalan lapisan-i adalah $0,550 \mu\text{m}$, dan ketebalan lapisan-n adalah $0,030 \mu\text{m}$. Geometri yang digunakan pada simulasi sel surya berbasis silikon kristal (c-Si), amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan mikrokrystal terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$) ditunjukkan pada Gambar 3.3.

Pembagian geometri divais sel surya menjadi elemen-elemen kecil (*mesh*) adalah tahapan penting yang berhubungan dengan keakuratan hasil yang didapatkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4. Semakin kecil elemen yang digunakan, maka hasil yang diperoleh akan semakin baik. Demikian hal itu, pembagian elemen tersebut harus disesuaikan dengan kemampuan komputer yang digunakan, karena jumlah elemen yang semakin banyak membutuhkan tahapan iterasi yang akan semakin banyak pula (Usman, 2006).



Gambar 3.3 Geometri 2D pada divais sel surya persambungan p-i-n



Gambar 3.4 Pembagian geometri 2D pada divais sel surya persambungan p-i-n

b. Parameter – Parameter *Input*

Parameter *input* sel surya berbasis silikon kristal (c-Si), amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan mikrokristal terhidrogenasi (μ c-Si:H) yang digunakan pada penelitian diperoleh dari berbagai referensi yang ditunjukkan pada Tabel 3.1, Tabel 3.2, Tabel 3.3, dan Tabel 3.4.

Tabel 3.1 Parameter *input* silikon kristal (c-Si)

Parameter	Nilai
Permitivitas dalam vakum (ϵ_0) ¹⁾	$8,85 \times 10^{-14} F/cm$
Permitivitas bahan (ϵ_r) ¹⁾	$11,8 F/cm$
Muatan listrik (q) ¹⁾	$1,602 \times 10^{-19} C$
Faktor transmisi (P) ²⁾	$0,66 S/cm$
Koefisien absorpsi cahaya (α) ³⁾	$30000 cm^{-1}$
Konstanta Boltzmann (k) ²⁾	$1,38 \times 10^{-23} J/K$
Konsentrasi pembawa muatan intrinsik (n_i) ¹⁾	$1,46 \times 10^{10} cm^{-2}$
Difusi elektron (D_n) ¹⁾	$800 cm^2/s$
Difusi hole (D_p) ¹⁾	$200 cm^2/s$
Mobilitas elektron (μ_n) ²⁾	$800 cm^2/V.s$
Mobilitas hole (μ_p) ²⁾	$200 cm^2/V.s$
Waktu hidup elektron (τ_n) ⁴⁾	$2,5 \times 10^{-12} s$
Waktu hidup hole (τ_p) ⁴⁾	$1 \times 10^{-12} s$
Fluks Foton (F) ¹⁾	$10^{-17} cm^{-2}s^{-1}$

Sumber: ¹⁾ : (Danielsson, 2000) ³⁾ : (Droz, 2003)
²⁾ : (Usman, 2006) ⁴⁾ : (Sanchez, 2001)

Tabel 3.2 Parameter *input* silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H)

Parameter	Nilai
Permitivitas dalam vakum(ϵ_0) ¹⁾	$8,85 \times 10^{-14} F/cm$
Permitivitas bahan(ϵ_r) ¹⁾	$11,8 F/cm$
Muatan listrik (q) ¹⁾	$1,602 \times 10^{-19} C$
Flux foton (G_0) ²⁾	$10^{-17} cm^{-2} s^{-1}$
Faktor transmisi (P) ³⁾	$0,71 S/cm$
Koefisien absorpsi cahaya (α) ⁴⁾	$24000 cm^{-1}$
Konstanta Boltzmann (k) ³⁾	$1,38 \times 10^{-23} J/K$
Konsentrasi pembawa muatan intrinsik (ni) ¹⁾	$1,46 \times 10^{10} cm^{-2}$
Konsentrasi donor (N_D) ⁵⁾	$8,8 \times 10^{17} cm^{-3}$
Konsentrasi akseptor (N_A) ⁵⁾	$1 \times 10^{17} cm^{-3}$
Difusi elektron (D_n) ³⁾	$40 cm^2/s$
Difusi hole (D_p) ³⁾	$10 cm^2/s$
Rasio antara muatan dan netral (c) ²⁾	50
Mobilitas elektron (μ_n) ³⁾	$40 cm^2/V.s$
Mobilitas hole (μ_p) ³⁾	$10 cm^2/V.s$
Waktu hidup elektron (τ_n) ⁵⁾	$2,5 \times 10^{-12} s$
Waktu hidup hole (τ_p) ⁵⁾	$1 \times 10^{-12} s$
Kerapatan energi minimum donor dan akseptor (g_{min}) ⁶⁾	$10^{16} cm^{-3} eV^{-1}$
Energi donor (E_D) ³⁾	0,088 eV
Energi aseptor (E_A) ³⁾	0,053 eV
Energi minium pita konduksi (E_{mc}) ³⁾	0,65 eV
Energi gap dalam lapisan-p (E_g) ⁷⁾	1,88 eV
Energi gap dalam lapisan-i (E_g) ⁷⁾	1,7 eV
Energi gap dalam lapisan-n (E_g) ⁷⁾	1,1 eV
Energi pada pita valensi (E_v) ²⁾	0,015 eV
Tampang lintang penangkap pada kecepatan termal ($v_{th}\sigma_N$) ³⁾	$10^{-11} cm^{-3} s^{-1}$

Sumber: 1) : (Danielsson, 2000) 5) : (Sanchez, 2001)
 2) : (Purwandari, 2010) 6) : (Takahashi dan Konagai, 1986)
 3) : (Usman, 2006) 7) : (Dewi, 2017)
 4) : (Nasser, 2015)

Tabel 3.3 Parameter *input* silikon mikrokristal terhidrogenasi (μ c-Si:H)

Parameter	Nilai
Permitivitas dalam vakum(ϵ_0) ¹⁾	$8,85 \times 10^{-14} F/cm$
Permitivitas bahan(ϵ_r) ¹⁾	$11,8 F/cm$
Muatan listrik (q) ¹⁾	$1,602 \times 10^{-19} C$
Flux foton (G_0) ²⁾	$10^{-17} cm^{-2} s^{-1}$
Faktor transmisi (P) ³⁾	$0,71 S/cm$
Koefisien absorpsi cahaya (α) a-Si:H ⁴⁾	$24000 cm^{-1}$
Koefisien absorpsi cahaya (α) c-Si ⁶⁾	$30000 cm^{-1}$
Konstanta Boltzmann (k) ³⁾	$1,38 \times 10^{-23} J/K$
Konsentrasi pembawa muatan intrinsik (ni) ¹⁾	$1,46 \times 10^{10} cm^{-2}$
Konsentrasi donor (N_D) a-Si:H ⁷⁾	$8,8 \times 10^{17} cm^{-3}$

Parameter	Nilai
Konsentrasi donor (N_D) c-Si:H ⁷⁾	$8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
Konsentrasi akseptor (N_A) a-Si:H ⁷⁾	$1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
Konsentrasi akseptor (N_A) c-Si:H ⁷⁾	$7,6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
Difusi elektron (D_n) a-Si:H ³⁾	$40 \text{ cm}^2/\text{s}$
Difusi elektron (D_n) c-Si:H ¹⁾	$800 \text{ cm}^2/\text{s}$
Difusi hole (D_p) a-Si:H ³⁾	$10 \text{ cm}^2/\text{s}$
Difusi hole (D_p) c-Si:H ¹⁾	$200 \text{ cm}^2/\text{s}$
Rasio antara muatan dan netral (c) ²⁾	50
Mobilitas elektron (μ_n) a-Si:H ³⁾	$40 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
Mobilitas elektron (μ_n) c-Si:H ³⁾	$800 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
Mobilitas hole (μ_p) a-Si:H ³⁾	$10 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
Mobilitas hole (μ_p) a-Si:H ³⁾	$200 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
Waktu hidup elektron (τ_n) ⁵⁾	$2,5 \times 10^{-12} \text{ s}$
Waktu hidup hole (τ_p) ⁶⁾	$1 \times 10^{-12} \text{ s}$
Kerapatan energi minimum pada donor dan akseptor (g_{min}) ⁸⁾	$10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$
Energi donor (E_D) ³⁾	0,088 eV
Energi aseptor (E_A) ³⁾	0,053 eV
Energi minimum pita konduksi (E_{mc}) ³⁾	0,65 eV
Energi gap dalam lapisan-p (E_g) $\mu\text{c-Si-H}$ ⁹⁾	1,86 eV
Energi gap dalam lapisan-i (E_g) $\mu\text{c-Si-H}$ ⁹⁾	1,82 eV
Energi gap dalam lapisan-n (E_g) $\mu\text{c-Si-H}$ ⁹⁾	0,97 eV
Energi pada pita valensi (E_v) ⁹⁾	0,045 eV
Tampang lintang penangkap pada kecepatan termal ($v_{th}\sigma_N$) ³⁾	$10^{-11} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$

Sumber: ¹⁾	: (Danielsson, 2000)	⁶⁾	: (Droz, 2003)
²⁾	: (Purwandari, 2010)	⁷⁾	: (Sanchez, 2001)
³⁾	: (Usman, 2006)	⁸⁾	: (Takahashi dan Konagai, 1986)
⁴⁾	: (Nasser, 2015)	⁹⁾	: (Lin, 2013)
⁵⁾	: (Nigro <i>et al.</i> , 1994)		

Parameter yang digunakan dalam simulasi metode elemen hingga tidak menggunakan satuan, sehingga diperlukan penyesuaian satuan dari parameter *input*. Penyesuaian satuan dilakukan untuk menghindari ketidaksesuaian satuan antar parameter saat penggunaan bentuk matrik dalam perhitungan. Oleh sebab itu, beberapa parameter sel surya memerlukan definisi faktor pengali sesuai satuan yang dimilikinya. Adapun parameter *input* tersebut seperti ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Parameter yang disetarakan

Parameter	Faktor Pengali	Parameter Setara
Jarak (x, y, z)	$x_0 = (x , y , z) \max$	xx_0, yy_0, zz_0
Potensial (ψ)	$\psi_0 = \frac{kt}{q}$	$\frac{\psi}{\psi_0}$
Konsentrasi pembawa muatan (n, p, N)	$C_0 = (N) \max$	$\frac{n}{C_0}, \frac{p}{C_0}, \frac{N}{C_0}$
Difusi pembawa muatan (D_n, D_p)	$D_0 = (D_n , D_p) \max$	$\frac{D_n}{D_0}, \frac{D_p}{D_0}$
Mobilitas pembawa muatan (μ_p, μ_n)	$\frac{D_0}{\psi_0}$	$\frac{\mu_n \psi_0}{D_0}, \frac{\mu_p \psi_0}{D_0}$
Densitas pembawa muatan (ρ)	$\varphi^2 = \frac{\psi_0 \epsilon}{q C_0 x_0^2}$	$\frac{\rho}{\varphi^2}$

Sumber: Usman (2006)

c. Pengaturan Kondisi Batas

Tahapan selanjutnya dalam penelitian ini yaitu pengaplikasian syarat batas, yang terbagi dua tipe yaitu syarat batas Neumann dan syarat batas Dirichlet. Menurut Snowden (1986) bahwa syarat batas Neumann untuk mendefinisikan turunan (*differential*) syarat batas. Kondisi syarat batas Neumann diperlukan saat membuat geometri untuk kontak batas yang jauh dari daerah divais aktif yang diasumsikan sebagai daerah persambungan antara lapisan p-i dan lapisan i-n atau daerah batas yang tidak berhubungan dengan konduktor (logam), dimana pengaruh medan listrik (\vec{E}) dan rapat arus elektron-hole (J_n dan J_p) memiliki komponen normal bernilai nol, dalam hal ini \hat{n} mendefinisikan permukaan normal, maka bentuk persamaannya seperti berikut (Danielsson, 2000):

$$\hat{n} \cdot \vec{E} = 0 \quad (3.1)$$

$$\hat{n} \cdot J_n = 0 \quad (3.2)$$

$$\hat{n} \cdot J_p = 0 \quad (3.3)$$

Kondisi batas Dirichlet digunakan untuk menentukan potensial elektrostatik (Ψ) dan konsentrasi pembawa muatan dalam kontak yang akan

melewati persambungan p-i-n. Apabila laju rekombinasi dalam logam atau persambungan elektroda yang terhubung dengan rangkaian eksternal memiliki nilai tak terhingga sehingga potensial elektrostatik dalam daerah persambungan dapat dianggap konstan (Usman, 2006). Maka hukum aksi-massa untuk konsentrasi muatan pembawa dapat dinyatakan sebagai berikut (Usman, 2006):

$$n_i^2 = np \quad (3.4)$$

Persamaan (3.4) digunakan untuk menentukan syarat batas pada kontak logam yang berhubungan dengan konsentrasi dopan (N). Dalam kasus ini, dengan mengasumsikan bahwa tingkat energi-fermi sama dengan tegangan kontak, sehingga potensial elektrostatik dalam kontak logam besarnya sama dengan tegangan eksternal (V_A) dijumlah dengan perubahan energi, hubungan logaritmik yang dimiliki potensial elektrostatik dengan konsentrasi pembawa muatan dapat dinyatakan pada persamaan berikut (Danielsson, 2000):

$$\psi = V_A + \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{\frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2}}{n_i} \right) \quad (3.5)$$

$$n = \frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2} \quad (3.6)$$

$$p = -\frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2} \quad (3.7)$$

dimana ψ adalah potensial elektrostatik, V_A adalah tegangan eksternal, q adalah muatan listrik, T adalah temperatur, k adalah konstanta Boltzmann, n_i adalah pembawa muatan intrinsik, dan N adalah konsentrasi dopan yang menyatakan bahwa konsentrasi elektron dan *hole* tertinggi masing-masing berada pada lapisan n dan p. Selanjutnya, persamaan (3.6) digunakan untuk menentukan besarnya konsentrasi elektron, sedangkan persamaan (3.7) digunakan untuk menentukan besarnya konsentrasi *hole* (Danielsson, 2000).

d. *Entry* Persamaan Poisson dan Kontinuitas

Berdasarkan tinjauan pembawa muatan pada tingkat quasi-Fermi, didefinisikan hubungan antara konsentrasi *hole* (p) dan konsentrasi elektron (n) dengan konsentrasi pembawa muatan intrinsik (n_i). Persamaan (2.5) dan (2.6) akan digunakan untuk memadukan variabel – variabel pada persamaan poisson dan kontinuitas dalam simulasi, pada masing-masing bahan diantaranya: silikon kristal (c-Si), amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan mikrokristal terhidrogenasi (μ -Si:H). Berikut ini persamaan poisson untuk bahan kristal (c-Si):

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{q}{\epsilon} (n_i e^{\psi u} - n_i e^{-\psi v} + N_D^+ - N_A^-) \quad (3.8)$$

Untuk persamaan kontinuitas pada bahan kristal (c-Si) sebagai berikut:

$$\nabla \cdot \vec{J}_n = \frac{n_i(uv - 1)}{\tau_p(ue^{\psi} + 1) + \tau_n(ve^{\psi} + 1)} - \frac{F\alpha}{1 - P} (e^{-\alpha x} + Pe^{\alpha x}) \quad (3.9)$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_p = \frac{F\alpha}{1 - P} (e^{-\alpha x} + Pe^{\alpha x}) - \frac{n_i(uv - 1)}{\tau_p(ue^{\psi} + 1) + \tau_n(ve^{\psi} + 1)} \quad (3.10)$$

Persamaan (3.8), (3.9), dan (3.10) adalah persamaan-persamaan untuk bahan berstruktur kristal (c-Si) yang digunakan pada simulasi dalam penelitian ini.

Persamaan poisson untuk bahan silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) yang telah dimodifikasi dengan persamaan (2.5) dan (2.6) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{\epsilon}{q} \nabla^2 \psi &= n_i (e^{\psi u} - e^{-\psi v}) - N_D + N_A \\ &- g_{Dmin} E_D \left[\exp\left(\frac{E_{mc} - E_C}{E_D}\right) \left\{ 1 - \left(\frac{2e^{-\psi v} + ce^{\psi u}}{e^{-\psi v} + ce^{\psi u}} \right) \left(\frac{n_i e^{-\psi v} + cn_i e^{\psi u}}{cN_C} \right)^{\frac{kT}{E_D}} \right\} \right. \\ &+ \left. \exp\left(\frac{E_{mc} - E_V}{E_D}\right) \left\{ \left(\frac{e^{-\psi v}}{e^{-\psi v} + ce^{\psi u}} \right) \left(\frac{n_i e^{-\psi v} + cn_i e^{\psi u}}{N_V} \right)^{\frac{kT}{E_D}} \right\} \right] \\ &+ g_{Amin} E_A \left[\exp\left(\frac{E_V - E_{mc}}{E_A}\right) \left\{ \left(\frac{ce^{-\psi v}}{ce^{-\psi v} + e^{\psi u}} \right) \left(\frac{n_i ce^{-\psi v} + n_i e^{\psi u}}{cN_V} \right)^{\frac{kT}{E_A}} - 1 \right\} \right. \\ &+ \left. \exp\left(\frac{E_C - E_{mc}}{E_A}\right) \left\{ \left(\frac{e^{\psi u}}{ce^{-\psi v} + e^{\psi u}} \right) \left(\frac{n_i ce^{-\psi v} + n_i e^{\psi u}}{N_C} \right)^{\frac{kT}{E_A}} \right\} \right] \end{aligned} \quad (3.11)$$

Distribusi elektron maupun *hole* dapat diturunkan dari persamaan kontinuitas, laju generasi pembawa dan rekombinasi *Shockley-Read-Hall* (Usman, 2006). Sehingga diperoleh persamaan untuk distribusi elektron pada bahan amorf terhidrogenasi (a-Si:H) yang mengandung variabel ψ , u , dan v seperti berikut:

$$\begin{aligned}
 -\nabla(\mu_n n_i e^{\psi u} \nabla \psi + D_n n_i e^{\psi} \nabla u) &= \frac{G_0 \alpha(\lambda)}{1-P} (e^{-\alpha x} + P e^{\alpha x}) n_i (uv - 1) cv \sigma_N \\
 &\left[\left(\frac{g_{Amin} E_A}{e^{\psi u} + ce^{-\psi v}} \right) \left\{ \begin{array}{l} \exp\left(\frac{E_C - E_{mc}}{E_A}\right) \left(\frac{n_i (e^{\psi u} + ce^{\psi v})}{N_C}\right)^{\frac{kT}{E_A}} \\ -\exp\left(\frac{E_V - E_{mc}}{E_A}\right) \left(\frac{n_i (e^{\psi u} + ce^{-\psi v})}{cN_V}\right)^{\frac{kT}{E_A}} \end{array} \right\} \right. \\
 &\left. - \frac{g_{Dmin} E_D}{(ce^{\psi u} + e^{-\psi v})} \left\{ \begin{array}{l} \exp\left(\frac{E_{mc} - E_C}{E_D}\right) \left(\frac{n_i (ce^{\psi u} + e^{-\psi v})}{N_V}\right)^{\frac{kT}{E_D}} \\ -\exp\left(\frac{E_{mc} - E_C}{E_D}\right) \left(\frac{n_i (ce^{\psi u} + e^{-\psi v})}{cN_C}\right)^{\frac{kT}{E_D}} \end{array} \right\} \right] \quad (3.12)
 \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh persamaan untuk distribusi *hole* pada bahan amorf terhidrogenasi (a-Si:H) yang mengandung variabel ψ , u , dan v seperti berikut:

$$\begin{aligned}
 -\nabla(\mu_p n_i e^{-\psi v} \nabla \psi + D_p n_i e^{-\psi} \nabla v) &= \frac{G_0 \alpha(\lambda)}{1-P} (e^{-\alpha x} + P e^{\alpha x}) - n_i (uv - 1) cv \sigma_N \\
 &\left[\left(\frac{g_{Amin} E_A}{e^{\psi u} + ce^{-\psi v}} \right) \left\{ \begin{array}{l} \exp\left(\frac{E_C - E_{mc}}{E_A}\right) \left(\frac{n_i (e^{\psi u} + ce^{-\psi v})}{N_C}\right)^{\frac{kT}{E_A}} \\ -\exp\left(\frac{E_V - E_{mc}}{E_A}\right) \left(\frac{n_i (e^{\psi u} + ce^{-\psi v})}{cN_V}\right)^{\frac{kT}{E_A}} \end{array} \right\} \right. \\
 &\left. + \frac{g_{Dmin} E_D}{ce^{\psi u} + e^{-\psi v}} \left\{ \begin{array}{l} \exp\left(\frac{E_{mc} - E_V}{E_D}\right) \left(\frac{n_i (ce^{\psi u} + e^{-\psi v})}{N_V}\right)^{\frac{kT}{E_D}} \\ -\exp\left(\frac{E_{mc} - E_C}{E_D}\right) \left(\frac{n_i (ce^{\psi u} + e^{-\psi v})}{cN_C}\right)^{\frac{kT}{E_D}} \end{array} \right\} \right] \quad (3.13)
 \end{aligned}$$

Persamaan (3.11), (3.12), dan (3.13) adalah persamaan-persamaan untuk bahan berstruktur amorf terhidrogenasi (a-Si:H) yang digunakan pada simulasi dalam penelitian ini.

Persamaan poisson pada bahan silikon mikrokristal terhidrogenasi ($\mu\text{-Si:H}$) yang telah dimodifikasi dengan persamaan (2.5) dan (2.6) sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 \nabla \cdot \vec{E} = & -(e^{\psi u} - e^{-\psi v} - N_D^+ + N_A^-) - n_i(e^{\psi u} - e^{-\psi v}) - N_D^+ + N_A^- \\
 & - g_{Dmin} E_D \left[\exp\left(\frac{E_{mc} - E_C}{E_D}\right) \left\{ 1 - \left(\frac{2e^{-\psi v} + ce^{\psi u}}{e^{-\psi v} + ce^{\psi u}}\right) \left(\frac{n_i e^{-\psi v} + cn_i e^{\psi u}}{cN_C}\right)^{\frac{kT}{E_D}} \right\} \right. \\
 & \left. + \exp\left(\frac{E_{mc} - E_V}{E_D}\right) \left\{ \left(\frac{e^{-\psi v}}{e^{-\psi v} + ce^{\psi u}}\right) \left(\frac{n_i e^{-\psi v} + cn_i e^{\psi u}}{N_V}\right)^{\frac{kT}{E_D}} \right\} \right] \\
 & + g_{Amin} \left[E_A \exp\left(\frac{E_V - E_{mc}}{E_A}\right) \left\{ \left(\frac{ce^{-\psi v}}{ce^{-\psi v} + e^{\psi u}}\right) \left(\frac{n_i ce^{-\psi v} + n_i e^{\psi u}}{cN_V}\right)^{\frac{kT}{E_A}} - 1 \right\} \right. \\
 & \left. + \exp\left(\frac{E_C - E_{mc}}{E_A}\right) \left\{ \left(\frac{e^{\psi u}}{ce^{-\psi v} + e^{\psi u}}\right) \left(\frac{n_i ce^{-\psi v} + n_i e^{\psi u}}{N_C}\right)^{\frac{kT}{E_A}} \right\} \right] \quad (3.14)
 \end{aligned}$$

Maka bentuk persamaan kontinuitas yang telah dimodifikasi untuk distribusi elektron pada bahan silikon mikrokristal terhidrogenasi ($\mu\text{-Si:H}$) seperti berikut:

$$\begin{aligned}
 -\nabla(\mu_n n_i e^{\psi u} \nabla \psi + D_n n_i e^{\psi u} \nabla u) = & \frac{n_i(uv - 1)}{\tau_p(ue^{\psi} + 1) + \tau_n(ve^{\psi} + 1)} \\
 -\frac{G_0 \alpha}{1 - P}(e^{-\alpha x} + Pe^{\alpha x}) + \frac{G_0 \alpha(\lambda)}{1 - P}(e^{-\alpha x} + Pe^{\alpha x}) - n_i(uv - 1)cv\sigma_N \\
 & \left[\left(\frac{g_{Amin} E_A}{e^{\psi u} + ce^{-\psi v}}\right) \left\{ \begin{aligned} & \exp\left(\frac{E_C - E_{mc}}{E_A}\right) \left(\frac{n_i(e^{\psi u} + ce^{\psi v})}{N_C}\right)^{\frac{kT}{E_A}} \\ & - \exp\left(\frac{E_V - E_{mc}}{E_A}\right) \left(\frac{n_i(e^{\psi u} + ce^{-\psi v})}{cN_V}\right)^{\frac{kT}{E_A}} \end{aligned} \right\} \right. \\
 & \left. + \frac{g_{Dmin} E_D}{(ce^{\psi u} + e^{-\psi v})} \left\{ \begin{aligned} & \exp\left(\frac{E_{mc} - E_C}{E_D}\right) \left(\frac{n_i(ce^{\psi u} + e^{-\psi v})}{N_V}\right)^{\frac{kT}{E_D}} \\ & - \exp\left(\frac{E_{mc} - E_C}{E_D}\right) \left(\frac{n_i(ce^{\psi u} + e^{-\psi v})}{cN_C}\right)^{\frac{kT}{E_D}} \end{aligned} \right\} \right] \quad (3.15)
 \end{aligned}$$

Sehingga bentuk persamaan kontinuitas untuk bahan silikon mikrokristal terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$) yang telah dimodifikasi untuk distribusi *hole* seperti berikut:

$$\begin{aligned} \nabla(\mu_p n_i e^{-\psi} \nabla \psi + D_p n_i e^{-\psi} \nabla v) &= \frac{G_0 \alpha}{1-P} (e^{-\alpha x} + P e^{\alpha x}) \\ - \frac{n_i (uv - 1)}{\tau_p (ue^{\psi} + 1) + \tau_n (ve^{\psi} + 1)} + \frac{G_0 \alpha (\lambda)}{1-P} (e^{-\alpha x} + P e^{\alpha x}) &- n_i (uv - 1) cv \sigma_N \\ \left[\left(\frac{g_{Amin} E_A}{e^{\psi} u + ce^{-\psi} v} \right) \left\{ \begin{array}{l} \exp\left(\frac{E_C - E_{mc}}{E_A}\right) \left(\frac{n_i (e^{\psi} u + ce^{-\psi} v)}{N_C} \right)^{\frac{kT}{E_A}} \\ - \exp\left(\frac{E_V - E_{mc}}{E_A}\right) \left(\frac{n_i (e^{\psi} u + ce^{-\psi} v)}{c N_V} \right)^{\frac{kT}{E_A}} \end{array} \right\} \right. \\ \left. + \frac{g_{Dmin} E_D}{ce^{\psi} u + e^{-\psi} v} \left\{ \begin{array}{l} \exp\left(\frac{E_{mc} - E_V}{E_D}\right) \left(\frac{n_i (ce^{\psi} u + e^{-\psi} v)}{N_V} \right)^{\frac{kT}{E_D}} \\ - \exp\left(\frac{E_{mc} - E_C}{E_D}\right) \left(\frac{n_i (ce^{\psi} u + e^{-\psi} v)}{c N_C} \right)^{\frac{kT}{E_D}} \end{array} \right\} \right] & \quad (3.16) \end{aligned}$$

Persamaan (3.14), (3.15), dan (3.16) adalah persamaan-persamaan untuk bahan berstruktur mikrokristal terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$) yang digunakan pada simulasi dalam penelitian ini.

3.5 Metode Analisis Data

Hasil yang diperoleh dari kegiatan simulasi ini berupa distribusi pembawa muatan, yang merepresentasikan nilai konsentrasi pembawa muatan dari bahan silikon kristal (c-Si), amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan mikrokristal terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$) dalam bentuk geometri 2D persambungan p-i-n.

1. Berdasarkan distribusi pembawa muatan yang diperoleh pada masing-masing bahan. Selanjutnya, dilakukan analisis besarnya konsentrasi elektron dan *hole* pada ketiga bahan pada posisi tertentu. Letak posisi pengamatan diambil pada enam titik sebagai berikut:
 - a. Titik A (Daerah lapisan-p) pada koordinat (0,000166 ; 0,3)
 - b. Titik B (Daerah persambungan p-i) pada koordinat (0,0141 ; 0,3)

- c. Titik C (Daerah lapisan-i) pada koordinat (0,2 ; 0,3)
 - d. Titik D (Daerah lapisan-i) pada koordinat (0,4 ; 0,3)
 - e. Titik E (Daerah persambungan i-n) pada koordinat (0,568 ; 0,3)
 - f. Titik F (Daerah lapisan-n) pada koordinat (0,588 ; 0,3)
2. Pada awalnya kegiatan simulasi dilakukan pada temperatur sebesar 300 K dan tegangan *input* sebesar 0 volt, sehingga diperoleh distribusi pembawa muatan dari ketiga bahan. Selanjutnya, nilai tegangan *input* dan temperatur divariasikan pada setiap titik pengamatan yang telah ditentukan sebelumnya. Variasi nilai tegangan *input* yang diberikan sebesar (0 – 0,4) volt dengan rentang 0,1 volt dan variasi nilai temperatur yang diberikan sebesar 300 K, 315 K, 330 K, 345 K, dan 360 K. Dari perlakuan pada masing-masing bahan tersebut, diperoleh distribusi pembawa muatan yang akan memberikan informasi besarnya nilai konsentrasi elektron dan *hole* pada tiap-tiap bahan yaitu silikon kristal (c-Si), amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan mikrokristal terhidrogenasi (μ c-Si:H).

Grafik hubungan temperatur operasional terhadap konsentrasi pembawa muatan yang dihasilkan, pada ketiga jenis bahan (c-Si, a-Si:H dan μ c-Si:H) akan dianalisa, dengan mengamati perubahan yang cukup signifikan pada setiap variasi temperatur yang digunakan. Hal ini dimaksudkan untuk mengetahui sensitifitas bahan terhadap perubahan temperatur yang diberikan.

Perlu diketahui bahwa arus yang dihasilkan pada sel surya sangat dipengaruhi oleh konsentrasi pembawa muatan (elektron dan *hole*) yang ada di dalam bahan, semakin besar nilai konsentrasi pembawa muatannya maka semakin besar pula arus yang dihasilkan. Oleh karena itu, konsentrasi pembawa muatan menjadi salah satu faktor penting dalam penentuan karakteristik kelistrikan dari bahan semikonduktor.

BAB 5. PENUTUP

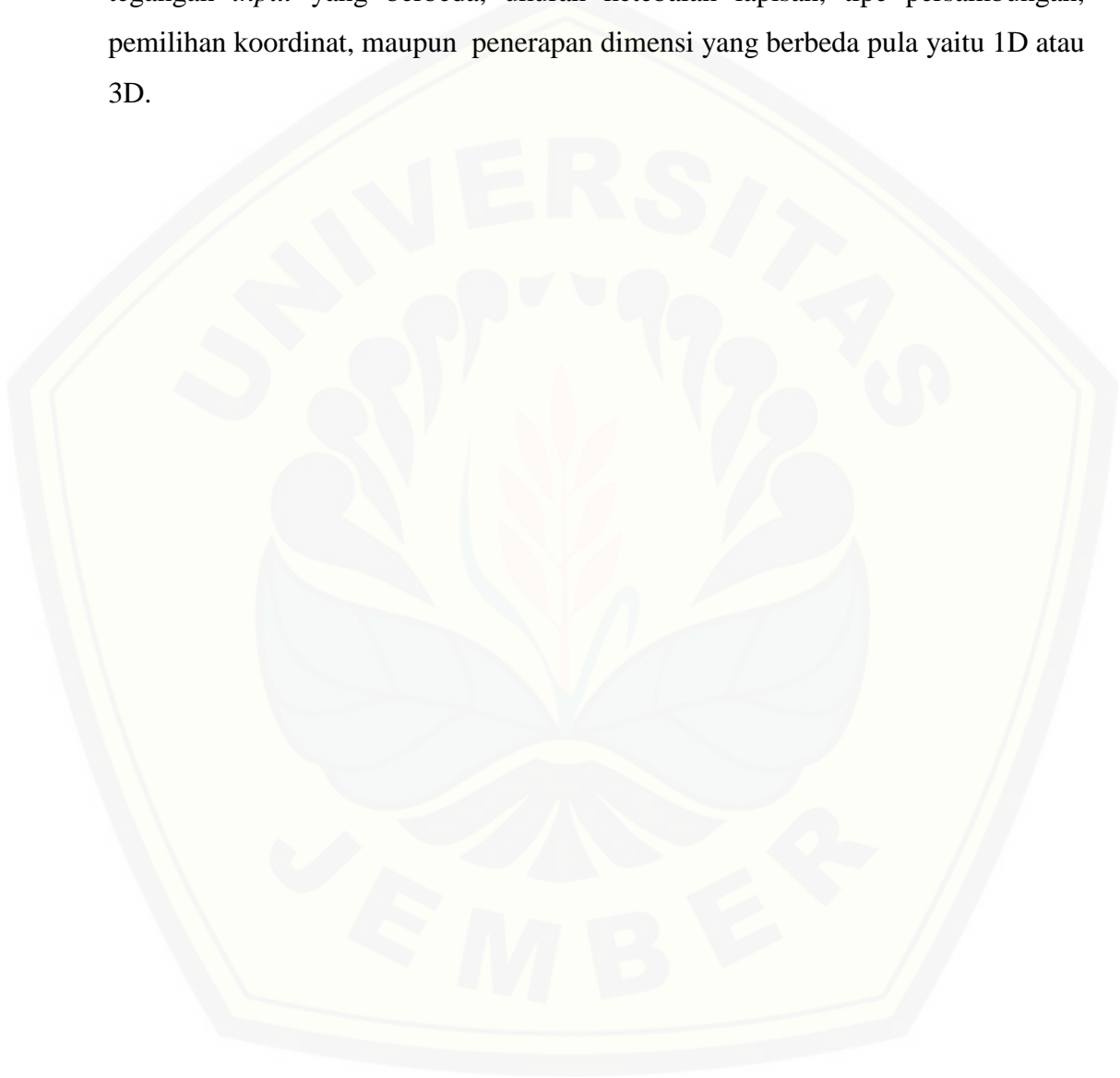
5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh, dapat diambil kesimpulan untuk ketiga bahan sebagai berikut:

1. Adanya variasi temperatur operasional memberikan dampak pada perubahan distribusi pembawa muatan elektron dan *hole* pada sel surya berbasis silikon kristal (c-Si), silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan silikon mikrokristal terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$), dimana pada setiap titik-titik yang diamati pada distribusi pembawa muatan masing-masing bahan menunjukkan nilai konsentrasi elektron dan *hole* yang berbeda. Nilai konsentrasi elektron dan *hole* menunjukkan peningkatan seiring bertambahnya temperatur operasional dan tegangan *input* yang diberikan.
2. Nilai konsentrasi elektron pada sel surya berbasis silikon kristal (c-Si), silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H), dan silikon mikrokristal terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$) semakin meningkat ketika mendekati daerah lapisan-n. Konsentrasi elektron terendah terletak di daerah lapisan-p, kemudian mengalami peningkatan secara kontinu mulai dari lapisan persambungan p-i, melewati daerah di lapisan-i dan persambungan i-n, hingga berakhir pada konsentrasi tertinggi di daerah lapisan-n. Sebaliknya, untuk nilai konsentrasi *hole* yang dihasilkan pada masing-masing bahan tersebut semakin menurun ketika mendekati daerah lapisan-n. Konsentrasi *hole* tertinggi berada di daerah lapisan-p, sedangkan konsentrasi *hole* terendah berada di daerah lapisan-n.
3. Bahan silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) merupakan bahan yang paling sensitif terhadap perubahan temperatur. Hal ini nampak dari setiap perubahan konsentrasi elektron dan *hole* yang relatif cepat, jika dibandingkan dengan bahan silikon kristal (c-Si) dan mikrokristal terhidrogenasi ($\mu\text{c-Si:H}$).

5.2 Saran

Untuk mendapatkan informasi yang lebih banyak mengenai pengaruh temperatur operasional terhadap distribusi pembawa muatan elektron dan *hole*, diharapkan penelitian selanjutnya dapat menggunakan variasi temperatur dan tegangan *input* yang berbeda, ukuran ketebalan lapisan, tipe persambungan, pemilihan koordinat, maupun penerapan dimensi yang berbeda pula yaitu 1D atau 3D.



DAFTAR PUSTAKA

- Afifudin, F. dan F. S. Hanato. 2012. Optimasi Tegangan Keluaran dari Solar Cell Menggunakan Lensa Pemfokus Cahaya Matahari. *Jurnal Neutrino*, 4(2): 164-177.
- Aslizar. 1996. Pengaruh Suhu Terhadap Karakteristik Volt-Ampere Persambungan p-n Silikon pada Bias Maju. *Skripsi*. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Callister, W. D. 1940. *Materials Science and Engineering An Introduction*. United States of America.
- Danielsson, E. 2000. *FEMLAB Model Library for Semiconductor Device Model*. Stockholm: The Royal Institute of Technology.
- Dewi, Y. N. K. 2017. Pemodelan Karakteristik J-V Sel Surya Berbasis Silikon Mikrokristal pada Struktur p-i-n Homojunction. *Skripsi*. Jember: Universitas Jember.
- Droz, C. 2003. Thin Film Microcrystalline Silicon Layers and Solar Cells: Microstructure and Electrical Performances. *Tesis*. Swiss: Universite De Neuchatel.
- Eliyana, A. 2008. Pengembangan Sistem Pengukur Karakteristik Arus Tegangan (I-V) Sel Surya dalam Keadaan Penyinaran dan Tanpa Penyinaran. *Skripsi*. Bandung: Universitas Pendidikan Indonesia.
- Fiqry, R., Ariswan, dan H. Kuswanto. 2017. Struktur Kristal dan Komposisi Kimia Semikonduktor Cd(Se_{0,6}Te_{0,4}) Hasil Preparasi dengan Metode Bridgman. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*. 2(1): 75-82.
- Fukuda, M. 1999. *Optical Semiconductor Devices*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Geotzberger, A., J. Knobloch, dan B. Voß. 1998. *Crystalline Silicon Cells*. Terjemahan oleh Rachel Waddington. Chichester: John Wiley and Sons Ltd.
- Gray, J. L. 2003. *The Physics of the Solar Cell*. USA: University of Purdue.

- Hack, M. dan M. Shur. 1985. Physics of Amorphous Silicon Alloy p-i-n Solar Cells. *Journal of Applied Physics*. 58(2): 997-1020.
- Hamakawa, Y. 1981. Recent Progress Of The Amorphous Silicon Solar Cells and Their Technology. *Journal de Physique Colloques*. 42 (C4): 1131-1142.
- Herawati, Y. 2014. Pengaruh Ketebalan Lapisan-i pada Perhitungan Karakteristik Arus-Tegangan Sel Surya Tipe P-I-N Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Skripsi*. Jember: FMIPA Universitas Jember.
- Jasruddin, D. M. dan A. Momang. 2009. Pengembangan Sel Surya p-i-n Berbasis Silikon Amorf Terhidrogenasi pada Reaktor PECVD Ganda. *Jurnal Aplikasi Fisika*. 5(1): 14-21.
- Kasap, S. 2001. *Design of A p-n Junctions Dioda*. Canada: University of Saskatchewan.
- Kwok, K. Ng. 1995. *Complete Guide to Semiconductor Devices*, McGraw-Hill. Inc. United State of America.
- Kurniawan, H. 2013. Analisis Pengaruh Temperatur Operasional dalam Simulasi Karakteristik Arus-Tegangan pada Dioda Si Menggunakan Femlab. *Skripsi*. Jember: Universitas Jember.
- Lin, C. H., T. H. Wen, dan H. T. Cheng. 2013. Single Grain Boundary Modeling and Design of Microcrystalline Si Solar Cells. *Materials*. 6: 291-298.
- Maehlum, M. A. 2017. *Energy Informative: Monocrystalline vs. Polycrystalline vs Thin Film*. <http://energyinformative.org/best-solar-panel-monocrystalline-polycrystalline-thin-film/>. [Diakses pada 23 Agustus 2017].
- Malvino, A. P. 1979. *Electronic Principles*. New York: Mc Graw-Hill.
- Matsumura, M. 2009. *Utilization of Solar Cell, Lecture Notes Research Center for Solar Energy Chemistry*. Osaka: Osaka University.
- Millman, J. 1993. *Mikroelektronika, Sistem Digital dan Rangkaian Analog*. Jilid 1. Terjemahan oleh Sutanto. Jakarta: Erlangga.

- Nasser, H. 2015. Development of Hybrid Photonic and Plasmonic Light Management Interfaces for Thin Film Semiconductor Devices. *Thesis*. Turkey: Middle East Technical University.
- Neamen, D. A. 2003. *Semiconductor Physics and Devices*. New York: Mc Graw-Hill.
- Nigro, M. A., F. Cantore, F. G. Della Corte, dan C. Summonte. 2003. Amorphous Silicon Thin Film for All-Optical Micro Modulator. *Proceeding of SPIE* 5116.
- Puri, R. K. dan V. K. Babbar. 2001. *Solid State Physics and Electronic*. New Delhi: S. Chand and Company LTD.
- Purwandari, E. 2010. The Study of Deposition Parameter Optimization on The Simulation of a-Si:H Solar Cell Efficiency by Investigating The Effect of Optical Bandgap. *Tesis*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Priyanka, S. 2012. Temperature Dependence of Solar Cell Performance. *Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells*. 101: 36-45.
- Rana, F. 2007. Electron-Hole Generation and Recombination Rates for Coulomb Scattering in Graphene. *Journal of International*. 1-13.
- Ridwan, A. 2010. Pengukuran Distribusi Temperatur pada Pelat Logam Menggunakan Metode Finite Element. *Skripsi*. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Rio, S. R. dan M. Iida. 1999. *Fisika dan Teknologi Semikonduktor*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Sanchez, C. V. 2001. *Thin Film Nanocrystalline Silicon Solar Cell by Hot-Wire CVD*. Barcelona: Universitat De Barcelona.
- Schicho, S. 2010. *Amorphous and Microcrystalline Silicon Applied in Very Thin Tandem Solar Cells*. Germany: Institut für Energie und Klimaforschung.
- Schropp R. E. I. dan M. Zeman. 1998. *Amorphous and Microcrystalline Silicon Solar Cells: Modeling, Materials, and Device Technology*. Boston: Kluwer Academic Publishers.

- Sconza, A., G. Torzo, dan G. Viola. 1994. Experiment on The Physics of The p-n Junction. *American Journal of Physics*. 62: 66-70.
- Seeger, K. 1989. *Semiconductor Physics an Introduction*. USA: Springer-Verlag.
- Shah, A., J. Meier, E. Vallat-Sauvain, C. Droz, U. Kroll, N. Wyrsh, J. Guillet, dan U. Graf. 2002. Microcrystalline Silicon and 'Micromorph' Tandem Solar Cells. *Thin Solid Films*. 403-404: 1-574.
- Siregar, A. 2011. Pengaruh Konsentrasi Ekstrak Antosianin Pomegranate Fruits (Buah Delima) sebagai Dye-Sensitizer Terhadap Efisiensi Sel Surya Jenis DSSC (*Dye Sensitized Solar Cell*). *Tesis*. Bandung: Universitas Pendidikan Indonesia.
- Smallman, R. E. dan R. J. Bishop. 2000. *Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering*. 6 th Edition. New York: Butterworth-Heinemann.
- Snowden, C. M. 1986. *Introduction to Semiconductor Device Modeling*. Singapura: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Solehuddin, M. 2016. Simulasi 2D Perhitungan Efisiensi Konversi Energi Sel Surya Persambungan p-i-n Berbasis Bahan Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H). *Skripsi*. Jember: Universitas Jember.
- Solihah, I. 2017. Simulasi 2D Karakteristik J-V Sel Surya Berbasis Silikon Kristal Persambungan P-I-N pada Variasi Ketebalan Lapisan-I. *Skripsi*. Jember: Universitas Jember.
- Street, R. 1991. *Hydrogenated Amorphous Silicon*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Subekti, A. 2003. *Diktat Kuliah Semikonduktor*. Jember: Universitas Jember.
- Sutrisno. 1986. *Elektronika 1 Teori dan Penerapannya*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Syafaruddin, 2010. Perbandingan Unjuk Kerja antara Panel Sel Surya Berpenjejak dengan Panel Sel Surya Diam. *Jurnal Aplikasi Fisika*. 9(1): 6-11.

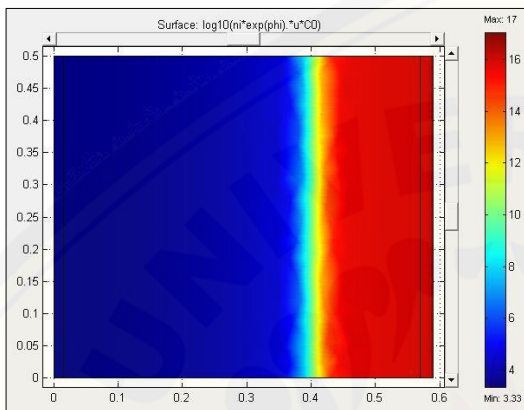
- Sze, S. M. 1985. *Semiconductor Devices: Physics and Technology*. New York: John Wiley & Sons.
- Szlufcik, J., S. Sivoththaman, J. F. Nijs, R. P. Mertens, dan R. V. Overstraeten. 1997. Low-Cost Industrial Technologies of Crystalline Silicon Solar Cell. *Journal of Applied Physics*, 85(5): 709-730.
- Takahashi, K. dan M. Konagai. 1986. *Amorphous Silicon Solar Cells*. London: North Oxford Academic Pub Ltd.
- Usman, I. 2006. Penumbuhan Lapisan Tipis Silikon Amorf Terhidrogenisasi dengan Teknik HWC-VHF-PECVD dan Aplikasinya pada Sel Surya. *Disertasi*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Veprek, S. dan Marecek. 1968. The Preparation of Thin Layers of Ge and Si by Chemical Hydrogen Plasma Transport Solid-State Electron. *Journal of Physics*. 11: 683-684.
- Williams, J. D. 2009. *Optoelectronics*. Huntsville: Department of Electrical and Computer Engineering The University of Alabama.
- Yuwono, B. 2005. Optimalisasi Panel Sel Surya dengan Menggunakan Sistem Pelacak Berbasis Mikrokontroler At89c51. *Skripsi*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.

LAMPIRAN

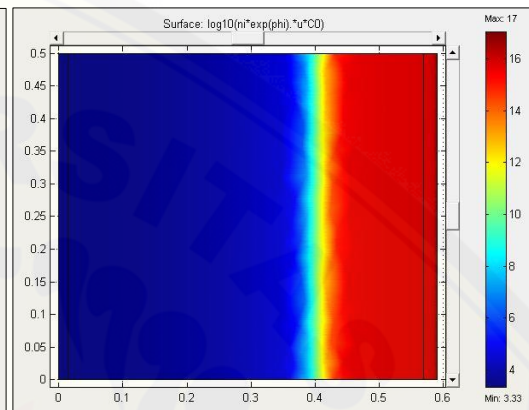
4.1 Distribusi Pembawa Muatan Elektron

4.1.a Distribusi Elektron Silikon Kristal (c-Si)

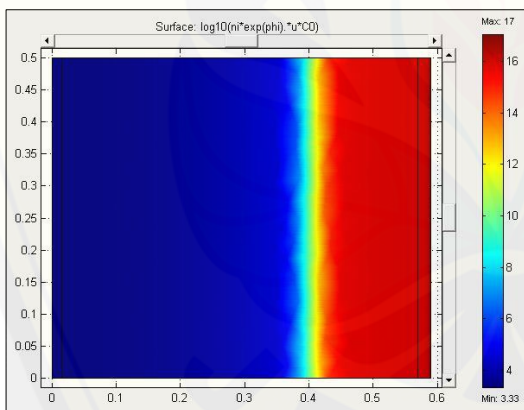
T = 300 K saat Va = 0 volt



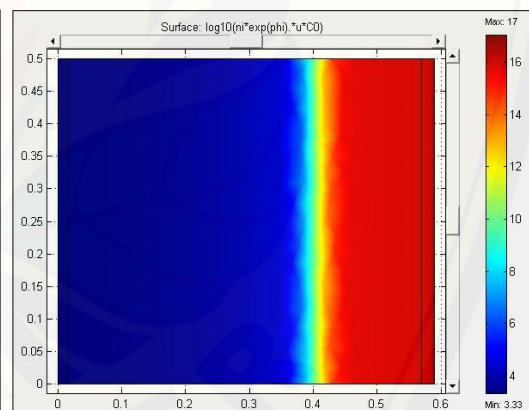
T = 315 K saat Va = 0 volt



T = 330 K saat Va = 0 volt



T = 345 K saat Va = 0 volt



T = 360 saat Va = 0 volt

