



**TESIS - TL142501**

**OPTIMISASI SEL SURYA STRUKTUR P-I-N BERBASIS  
SILIKON AMORF TERHIDROGENASI MENGGUNAKAN  
PERANGKAT LUNAK AFORS-HET**

**AHMAD SHOLIH  
02511650010002**

**Dosen Pembimbing  
Dr. Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D  
Mas Irfan P Hidayat, Ph.D  
Prof. Dr. Darminto**

**Departemen Teknik Material  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2020**



**TESIS - TL142501**

**OPTIMISASI SEL SURYA STRUKTUR P-I-N BERBASIS  
SILIKON AMORF TERHIDROGENASI MENGGUNAKAN  
PERANGKAT LUNAK AFORS-HET**

**AHMAD SHOLIH  
02511650010002**

**Dosen Pembimbing  
Dr. Sigit Tri Wicaksiono, S.Si., M.Si.  
Mas Irfan P Hidayat, Ph.D.  
Prof. Dr. Darminto**

**Departemen Teknik Material  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2020**



**LEMBAR PENGESAHAN TESIS**

Tesis disusun untuk memenuhi satu syarat memperoleh gelar

**Magister Teknik (MT)**

di

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh:

**AHMAD SHOLIH**

**NRP. 02511650010002**

Tanggal Ujian : 21 Januari 2020

Periode Wisuda : Maret 2020

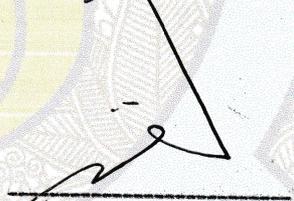
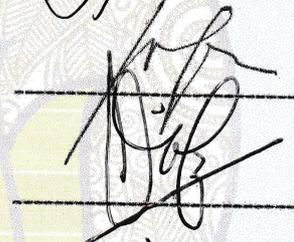
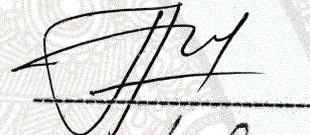
Disetujui oleh:

**Pembimbing**

1. Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D  
NIP: 197801132002121003

2. Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D  
NIP: 197610272003121001

3. Prof. Dr. Darminto  
NIP: 196003031987011002



**Penguji**

1. Lukman Noerochim, S.T., M.Sc. Eng, Ph.D  
NIP: 197703132003121001

2. Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D  
NIP: 197701162003122007



**Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi**

**Fakultas Teknologi Industri**



Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D

NIP: 197801132002121003

*Halaman ini Sengaja Dikosongkan*

## Optimisasi Sel Surya Struktur p-i-n Berbasis Silikon Amorf Terhidrogenasi Menggunakan Perangkat Lunak AFORS-HET

Nama Mahasiswa : Ahmad Sholih  
NRP : 02511650010002  
Pembimbing : Dr. Sigit Tri W, S.Si., M.Si.  
Co-Pembimbing 1 : Mas Irfan P Hidayat, Ph.D.  
Co-Pembimbing 2 : Prof. Dr. Darminto. M.Sc

### ABSTRAK

Silikon amorf terhidrogenasi (a-Si: H) telah dipelajari secara luas karena memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan silikon kristalin berupa nilai celah pita energi optik yang lebar (1.6 eV s.d. 2.4 eV) dan temperatur penumbuhan yang rendah ( $\sim 200^{\circ}\text{C}$ ). Meskipun demikian, efisiensi yang masih tergolong rendah menjadi faktor utama dari sel surya a-Si:H yang harus ditingkatkan. Untuk meningkatkan performa sel surya a-Si:H dapat dilakukan dengan optimisasi parameter – parameter deposisi, namun optimisasi dengan *trial and error* tentu tidak akan efektif karena memerlukan waktu lama dan biaya tinggi. *Automat for simulation of heterostructures* (AFORS-HET) adalah sebuah perangkat lunak yang dapat mensimulasikan proses-proses yang berkaitan dengan optimisasi sel surya p-i-n tanpa memerlukan waktu yang lama dan biaya tinggi. Optimisasi yang dilakukan mencakup seluruh lapisan sel surya p-i-n diantaranya adalah bandgap tiap-tiap lapisan, ketebalan tiap-tiap lapisan dan variasi doping lapisan p dan lapisan n. Penelitian ini di evaluasi berdasarkan karakteristik I-V yang meliputi nilai tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ), arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ), *fill factor* (FF), dan efisiensi ( $\eta$ ). Dari hasil optimisasi yang telah dilakukan, nilai efisiensi terbaik yang di dapatkan adalah 8.3%, dengan nilai  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  dan FF masing-masing adalah 944.5 mV, 11.4 mA/cm<sup>2</sup>, 77.3%. Hasil dari simulasi ini dapat digunakan sebagai acuan untuk proses eksperimen untuk mendapatkan hasil yang optimal secara efektif dan efisien.

**Kata Kunci:** simulasi sel surya, AFORS-HET, Sel Surya a-Si:H, pin junction

*Halaman ini Sengaja Dikosongkan*

## **Optimization of Hydrogenated Amorphous Silicon p-i-n Solar Cells by AFORS-HET Software.**

Name : Ahmad Sholih  
Student Identity Number : 02511650010002  
Supervisor : Dr. Sigit Tri W, S.Si., M.Si.  
Co-Supervisor 1 : Mas Irfan P Hidayat, Ph.D.  
Co-Supervisor 2 : Prof. Dr. Darminto. M.Sc

### **ABSTRACT**

Hydrogenated amorphous silicon (a-Si: H) has been widely studied because it has several advantages compared to crystalline silicon such as wide optical band gap values (1.6 eV to 2.4 eV) and low growth temperatures (~ 200°C). However, the efficiency is still relatively low to be a major factor of a-Si: H solar cells that must be increased. To improve the performance of a-Si: H solar cells can be done by optimizing deposition parameters, but the optimization of trial and error will certainly not be effective because it requires a long time and high costs. Automat for simulation of heterostructures (AFORS-HET) is a software that can simulate processes related to optimizing p-i-n solar cells without requiring a long time and high costs. The optimization includes all p-i-n solar cell layers including bandgap of each layer, thickness of each layer and doping variation of p and n layers. This study was evaluated based on the characteristics of the I-V which includes the value of the open circuit voltage ( $V_{oc}$ ), short circuit current ( $I_{sc}$ ), fill factor (FF), and efficiency ( $\eta$ ). The maximum efficiency of 8.3% is obtained when the values of  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  and FF are 944.5 mV, 11.4 mA/cm<sup>2</sup>, 77.32% respectively. The results of this simulation can be used as a reference for the experimental process to get optimal results effectively and efficiently.

**keyword:** solar cell simulation, AFORS-HET, a-Si:H, pin junction solar cell

*Halaman ini Sengaja Dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur dan terima kasih penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tesis sebagai syarat wajib untuk memperoleh gelar Magister Teknik (M.T) di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS dengan judul:

### **Optimisasi Sel Surya Struktur p-i-n Berbasis Silikon Amorf Terhidrogenasi Menggunakan Perangkat Lunak AFORS-HET**

Penulis menyadari bahwa penyusunan Tesis ini dapat terselesaikan dengan baik karena bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D, selaku dosen pembimbing Tesis yang senantiasa memberikan bimbingan, masukan, pemantauan, dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini dengan baik.
2. Mas Irfan P. Hidayat, S.T, M.Sc., Ph.D, selaku dosen pembimbing Tesis yang senantiasa memberikan bimbingan, masukan, pemantauan, dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini dengan baik.
3. Prof. Dr. Darminto, selaku dosen pembimbing Tesis yang senantiasa memberikan bimbingan, masukan, pemantauan, dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini dengan baik.
4. Lukman Noerochim, S.T, M.Sc Eng, Ph.D selaku dosen penguji Tesis yang telah memberikan saran, kritik serta masukannya sehingga banyak menambah wawasan dan meningkatkan kualitas tulisan ini.
5. Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D selaku dosen penguji Tesis yang telah memberikan saran, kritik serta masukannya sehingga banyak menambah wawasan dan meningkatkan kualitas tulisan ini.
6. Dr. Yoyok Cahyono, M.Si, yang senantiasa memberikan bimbingan, wawasan, pemantauan, dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini dengan baik.

7. Dadang Hamdani, S.Si., M.Si, yang senantiasa memberikan bimbingan, wawasan, pemantauan, dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini dengan baik.
8. Orang tua tercinta, Tarsi yang senantiasa memberikan do'a serta dukungan moral dan spiritual terhadap keberhasilan penulis menyelesaikan Tesis ini.
9. Istri tercinta, Anita Oktriana yang senantiasa memberikan do'a serta dukungan moral dan spiritual terhadap keberhasilan penulis menyelesaikan Tesis ini.

Penulis menyadari atas keterbatasan ilmu pengetahuan dan kemampuan yang dimiliki, oleh karena itu penulis akan menerima kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan penulisan Tesis ini. Semoga Tesis ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan serta memberikan inspirasi bagi pembaca untuk perkembangan lebih lanjut.

Surabaya, Januari 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN TESIS</b> .....	iii
<b>ABSTRAK</b> .....	v
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	ix
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xv
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xvii
<b>BAB 1</b> .....	1
<b>PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
<b>BAB 2</b> .....	5
<b>KAJIAN PUSTAKA</b> .....	5
2.1 Sel Surya p-i-n a-Si:H.....	5
2.2 Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H).....	8
2.3 Sifat Optik a-Si:H.....	11
2.4 Sifat Listrik a-Si:H.....	13
2.5 Deposisi Lapisan a-Si:H dengan PECVD.....	13
2.6 Fabrikasi Sel Surya Struktur p-i-n.....	15
2.7 Pengenceran Hidrogen.....	17

2.8 Lapisan Penyerap Pada Sel Surya p-i-n .....	19
2.9 Prinsip Kerja PV Cell .....	21
2.10 Permodelan Sel Surya .....	23
2.10.1 Model Ideal Sel Surya .....	24
2.10.2 Model Dioda Tunggal $R_s$ .....	25
2.10.3 Model Dioda Tunggal $R_p$ .....	26
2.10.4 Model Dua Dioda .....	27
2.10.5 Model Tiga Dioda .....	28
2.11 Permodelan Numerik sel Surya .....	29
2.12 Rekayasa Bandgap Dengan Proses Alloying.....	32
2.13 Efisiensi kuantum .....	33
<b>BAB 3</b> .....	<b>35</b>
<b>METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>35</b>
3.1 Rancangan Penelitian.....	35
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian.....	35
3.3 Langkah Kerja.....	35
3.3.1 Deskripsi Software AFORS-HET .....	35
3.3.2 Simulasi Sel Surya a-Si:H dengan AFORS-HET .....	37
3.4 Ringkasan Penelitian.....	41
3.5 Diagram Alir Penelitian .....	42
<b>BAB 4</b> .....	<b>43</b>
<b>ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>43</b>
4.1 Optimisasi Celah Pita Energi .....	43
4.1.1 Optimisasi celah pita energi pada lapisan n .....	43
4.1.2 Optimisasi celah pita energi pada lapisan i .....	45
4.1.3 Optimisasi celah pita pada lapisan p .....	47

4.2 Optimisasi Ketebalan Lapisan.....	50
4.2.1 Optimisasi ketebalan lapisan n .....	50
4.2.2 Optimisasi ketebalan lapisan i .....	52
4.2.3 Optimisasi ketebalan lapisan p .....	54
4.3 Optimisasi Konsentrasi Pembawa Muatan.....	55
4.4 Hasil Efisiensi Kuantum.....	58
<b>BAB V.....</b>	<b>61</b>
<b>KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>61</b>
5.1 Kesimpulan.....	61
5.2 Saran .....	61
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>63</b>

*Halaman ini Sengaja Dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Aplikasi sel surya dalam rumah tangga .....	6
Gambar 2.2 Struktur Kristal semikonduktor tipe p.....	6
Gambar 2.3 Struktur Kristal semikonduktor tipe n.....	7
Gambar 2.4 Struktur atom (a) Silikon kristal tunggal .....	9
Gambar 2.5 Pengaruh kandungan hidrogen dalam silicon amorf .....	10
Gambar 2.6 Kapasitas aliran foton spektrum matahari .....	11
Gambar 2.7 (a) Koefisien absorpsi sebagai fungsi dari energi foton.....	12
Gambar 2.8 Skema sistem PECVD (Marc, 2013).....	14
Gambar 2.9 Skema diagram Tauc Plot pada film tipis .....	16
Gambar 2.10 Diagram fasa dari Film tipis a-Si:H .....	18
Gambar 2.11 Hasil perhitungan komputer dari Power output PIN.....	20
Gambar 2.12 Desain rangkaian fotovoltaiik .....	23
Gambar 2.13 Model ideal sel fotovoltaiik .....	25
Gambar 2.14 Sel fotovoltaiik model diode tunggal $R_s$ .....	26
Gambar 2.15 Sel fotovoltaiik model diode tunggal $R_p$ .....	27
Gambar 2.16 Sel fotovoltaiik model dua diode .....	28
Gambar 2.17 Sel fotovoltaiik model tiga diode .....	29
Gambar 2.18 Kinerja dari sel surya NIP a-Si dan a-SiGe.....	32
Gambar 2.19 Model perhitungan $J_{SC}$ (mA / cm <sup>2</sup> ).....	33
Gambar 3. 1 Tampilan visual software AFORS-HET (Stangl et al., 2004).....	37
Gambar 3. 2 Skema sel surya struktur p-i-n berbasis a-Si:H.....	38
Gambar 3. 3 Diagram alir penelitian.....	42
Gambar 4. 1 Variasi (a) Voc, (b) Jsc, (c) FF dan (d) efisiensi pada celah pita p-layer untuk sel surya p-i-n berbasis a-Si:H. ....	44
Gambar 4. 2 Variasi (a) Voc, (b) Jsc, (c) FF dan (d) efisiensi pada celah pita i-layer untuk sel surya p-i-n berbasis a-Si:H. ....	47
Gambar 4. 3 Variasi (a) Voc, (b) Jsc, (c) FF dan (d) efisiensi pada celah pita p-layer untuk sel surya p-i-n berbasis a-Si:H. ....	48
Gambar 4. 4 Variasi (a) Voc, (b) Jsc, (c) FF dan (d) efisiensi pada ketebalan n-layer untuk sel surya p-i-n berbasis a-Si:H. ....	51

Gambar 4. 5 Variasi (a) Voc, (b) Jsc, (c) FF dan (d) efisiensi pada ketebalan i-layer untuk sel surya p-i-n berbasis a-Si:H.....	53
Gambar 4. 6 Variasi (a) Voc, (b) Jsc, (c) FF dan (d) efisiensi pada ketebalan p-layer untuk sel surya p-i-n berbasis a-Si:H.....	55
Gambar 4. 7 (a) Variasi Na dan Nd terhadap efisiensi sel surya p-i-n berbasis a-Si:H. (b) Perbesaran Grafik (a) pada area Na E19 dan Na E20.....	56
Gambar 4. 8 Perbandingan hasil sebelum dan sesudah optimisasi untuk (a) EQE, (b) IQE, (c) IQE 1 dan (d) Spektral response pada sel surya p-i-n a-Si:H .....	59

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Parameter listrik dan thermal pada rangkaian fotovoltaik .....	23
Tabel 3. 1 Parameter simulasi sel surya p-i-n a-Si:H.....	39
Tabel 3. 2 Variasi bandgap pada lapisan p, i dan n.....	40
Tabel 3. 3 Variasi ketebalan pada lapisan p, i dan n .....	40
Tabel 3. 4 Variasi doping pada lapisan p dan n .....	41
Tabel 3. 5 Variasi parameter – parameter simulasi sel surya tipe a-Si:H .....	41

*Halaman ini Sengaja Dikosongkan*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pada tiga dekade terakhir, film tipis berbahan dasar silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) banyak dipelajari karena penggunaannya dalam fabrikasi sel surya. Silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan material silikon kristal, material ini mempunyai nilai celah pita energi optik yang lebar (1.7 eV s.d. 2 eV), temperatur penumbuhan yang rendah ( $\sim 200^{\circ}\text{C}$ ), serta dapat ditumbuhkan di atas substrat gelas yang harganya murah dan persediannya melimpah (Mukhopadhyay et al., 2001). Selain itu a-Si:H juga memiliki kemampuan absorpsi yang tinggi pada daerah spektrum cahaya tampak (Vet and Zeman, 2010). Meskipun demikian efisiensi sel surya berbasis a-Si:H masih lebih kecil dibandingkan dengan efisiensi silikon kristal dan beberapa sel surya yang lain, sekitar 13.4% (Nicolas, 2012). Dengan demikian untuk dapat bersaing dengan sel surya yang lain perlu dilakukan optimisasi untuk meningkatkan efisiensinya. Salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi sel surya a-Si:H adalah dengan optimisasi parameter proses deposisi (Zheng et al., 2012). Diantara berbagai parameter, celah pita energi dan ketebalan dari lapisan p, i dan n memiliki pengaruh besar pada efisiensi sel surya (Benigno and Darminto, 2017).

Pada tahun 2011 telah berhasil di buat sel surya *single junction* berbasis nano kristalin silikon (nc-Si:H) yang di tumbukan pada substrat kaca berlapis ZnO pada temperatur  $150^{\circ}\text{C}$  dengan metode penumbuhan *Plasma Enhanced Vapour Deposition* (PECVD). Dari hasil penelitian tersebut didapatkan efisiensi maksimum sel surya sebesar 7% pada celah pita energi sebesar 2.07 eV (Fathi et al., 2011). Pada tahun 2012, peningkatan efisiensi sel surya sebesar 9.13% didapatkan dengan cara fabrikasi sel surya *triple junction* tipe PIN (a-Si:H/a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$ ) menggunakan metode *single chamber* PECVD. Pada penelitian ini digunakan parameter laju pengenceran hidrogen dan kecepatan deposisi untuk mendapatkan nilai efisiensi dan sifat listrik terbaik (Zheng et al., 2012). Sriprapha, dkk telah mengembangkan sel surya berbasis a-Si:H *double junction* dengan tipe (a-SiO:H/a-Si:H). Sel surya di deposisikan pada glass substrat pada suhu  $180^{\circ}\text{C}$ ,

tekanan deposisi 66,66Pa. Gas CO<sub>2</sub> digunakan sebagai sumber atom O pada basis SiO:H. Hasilnya didapatkan efisiensi sebesar 10.2 % dengan Voc sebesar 1.88 V (Sriprapha et al., 2013). Sedangkan (Kim et al., 2015) membuat sel surya berbasis a-Si:H triple layer dengan tipe (a-SiO<sub>x</sub>:H/a-Si:H/a-Si:H). Penelitian ini dilakukan dengan PECVD dan menghasilkan efisiensi sebesar 12.58 %.

Penelitian sel surya berbahan a-Si:H juga dilakukan di Institut Teknologi 10 Nopember Surabaya (ITS). Pada tahun 2017, sel surya p-i-n telah berhasil dibuat oleh Benigno dan Soni dibawah bimbingan Prof. Darminto. Optimisasi yang dilakukan adalah ketebalan lapisan dan celah pita energi dari lapisan intrinsik pada sel surya jenis p-i-n dengan lapisan intrinsik tunggal dan ganda. Hasil dari sel surya dengan lapisan intrinsik tunggal p-i-n yang teroptimisasi untuk Voc dan efisiensi masing – masing adalah 0.277 V dan 5.78% pada ketebalan lapisan 600 nm dan celah pita energi 1.6 eV (Benigno, 2017). Sedangkan untuk sel surya dengan lapisan intrinsik ganda p-i<sub>1</sub>.i<sub>2</sub>-n, Voc dan efisiensi terbaik yang di dapat masing-masing 0.37W dan 8.49% pada ketebalan lapisan intrinsik 600 nm dan celah pita energi i<sub>1</sub> 1.4 eV dan i<sub>2</sub> 1.9 eV. (Prayogi, 2017).

Selain tinjauan dari sudut pandang eksperimen, kajian juga dapat dilakukan secara numerik dengan bantuan perangkat komputer untuk menganalisis fenomena fisis yang berkaitan dengan proses yang terjadi secara mikroskopik. Saat ini, perangkat lunak AFORS-HET banyak digunakan untuk optimisasi parameter sel surya untuk mendapatkan hasil terbaik. Perangkat lunak AFORS-HET adalah program komputer yang sangat penting untuk pemodelan sel surya multilayer single dan hetero-junction. Pada penelitian ini, perangkat lunak AFORS-HET digunakan untuk mengoptimalkan sel surya p-i-n berbasis a-Si:H. Perangkat lunak AFORS-HET memecahkan persamaan semikonduktor satu dimensi berdasarkan persamaan fisika yang berbeda seperti persamaan Poisson dan persamaan transport dan kontinuitas untuk elektron dan lubang di bawah mode operasi yang berbeda. Pembentukan pasangan elektron / lubang dapat dijelaskan oleh Penyerapan Lambert–bir termasuk permukaan kasar dan menggunakan nilai refleksi dan transmisi terukur, atau dengan menghitung

permukaan polos yang tidak koheren / refleksi internal ganda, menggunakan indeks refleksi kompleks untuk masing-masing lapisan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan dikaji pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh celah pita energi, ketebalan lapisan dan doping lapisan p dan n berbasis a-Si:H terhadap serapan intensitas matahari yang dihasilkan dari simulasi menggunakan software AFORS-HET?
2. Bagaimana karakteristik I-V sel surya p-i-n berbasis a-Si:H terhadap nilai tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ), arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ), *fill factor* (FF), dan efisiensi ( $\eta$ ) yang dihasilkan dari simulasi menggunakan software AFORS-HET?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Melakukan optimisasi pada semua lapisan sel surya p-i-n berbasis a-Si:H untuk memaksimalkan serapan intensitas matahari menggunakan bantuan software AFORS-HET.
2. Menganalisis pengaruh celah pita energi, ketebalan lapisan dan doping lapisan p dan n sel surya p-i-n berbasis a-Si:H terhadap serapan intensitas matahari menggunakan bantuan software AFORS-HET.
3. Menganalisis karakteristik I-V sel surya p-i-n berbasis a-Si:H terhadap nilai tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ), arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ), *fill factor* (FF), dan efisiensi ( $\eta$ ) yang dihasilkan dari simulasi menggunakan software AFORS-HET

## 1.4 Batasan Masalah

Sebagai batasan dalam penelitian ini yaitu:

1. Mode perhitungan elektronika / *electrical calculation mode* dilakukan dengan asumsi berada pada kondisi steady state.
2. Model interface parameter yang digunakan adalah *drift diffusion* dengan asumsi tanpa adanya *interface defect*.

3. Bentuk morfologi dari ikatan antar layer diasumsikan homogen dan tanpa cacat.
4. Perhitungan arus listrik pada sel surya dilakukan dengan model dioda tunggal.

### **1.5 Sistematika Penulisan**

Penulisan tesis ini terdiri dari abstrak yang berisi gambaran umum dari penelitian. Bab 1, pendahuluan yang berisi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, serta sistematika penulisan. Bab 2, tinjauan pustaka berisi tentang dasar-dasar teori yang digunakan sebagai acuan dari penelitian. Bab 3, metodologi penelitian berisi tentang metode-metode kerja yang mendukung penelitian. Bab 4, berisi tentang uraian kerja yang mendukung penelitian ini. Bab 5, kesimpulan dan saran berisi kesimpulan penelitian dan saran untuk penelitian kedepannya.

## **BAB 2**

### **KAJIAN PUSTAKA**

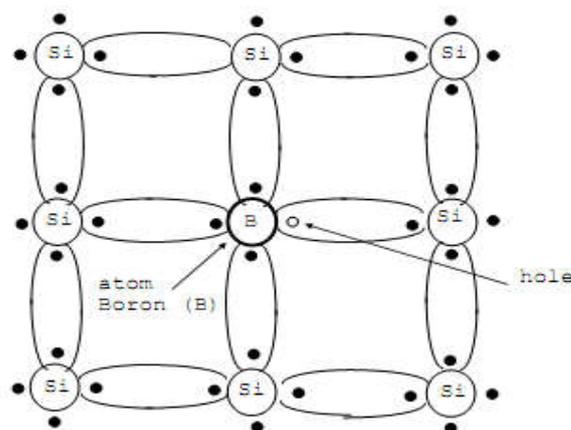
#### **2.1 Sel Surya p-i-n a-Si:H**

Sel surya atau sel fotovoltaik, adalah sebuah alat semikonduktor yang terdiri dari gabungan beberapa dioda, yang dapat menyerap sinar matahari dan kemudian mengubahnya menjadi energi listrik. Perubahan bentuk energi ini disebut sebagai efek fotovoltaik. Pada dasarnya, prinsip kerja semua jenis panel surya sama, yaitu berawal dari terjadinya efek fotovoltaik yang ditandai dengan foton yang berada di dalam sinar matahari akan mengenai panel surya dan diserap oleh lapisan material semikonduktor. Kemudian, elektron yang terpisah dari inti atom akan bergerak melalui material tersebut sehingga menghasilkan arus listrik. Elektron bergerak hanya melewati satu arah yang sudah ditentukan. Arus listrik yang sudah dihasilkan diubah menjadi bentuk *direct current* (DC), kemudian diubah oleh inverter menjadi *alternating current* (AC) sehingga dapat digunakan oleh alat-alat listrik lain yang memang memiliki arus bolak-balik. Seiring dengan perkembangan teknologi, pemanfaatan panel surya sebagai penghasil energi listrik mulai banyak digunakan oleh masyarakat. Secara skala atau kapasitas produksi listrik, pemanfaatan panel surya bisa dibagi menjadi skala besar (terpusat) atau skala kecil (rumah tangga). Untuk skala besar, panel surya akan ditempatkan secara terpusat dan mengalirkan listrik untuk beberapa rumah atau gedung. Sementara untuk skala kecil, pemanfaatannya hanya pada satu rumah yang biasa disebut *solar home system* (SHS). Perkembangan aplikasi sel surya saat ini telah sangat luas mulai pengisi baterai HP (*charger handphone*), atap garasi terbuka (*carport*), hingga atas rumah atau dinding gedung. Pada gedung atau perumahan, panel sel surya dipasang secara terintegrasi dengan bagian bangunan sehingga dapat mengurangi biaya instalasi serta memiliki fungsi lainnya, seperti sebagai atap teras, atap taman, penutup parkir mobil atau atap lainnya. Sistem integrasi pada bangunan gedung atau perumahan ini sering disebut *Building Integrated Photovoltaic* (BIPV). ( Yulianto,B., 2017).



Gambar 2.1 Aplikasi sel surya dalam rumah tangga (Yuliarto,B., 2017)

Terdapat tiga lapisan utama yang ada pada sel surya p-i-n a-Si:H, diantaranya adalah lapisan p ( lapisan bermuatan positif), lapisan intrinsik ( lapisan yang tidak bermuatan ) dan lapisan n (lapisan bermuatan negatif). Lapisan p pada sel surya di buat dengan cara menambahkan unsur bervalensi III, dalam hal ini adalah atom boron ke dalam kisi kristal a-Si:H. Besarnya konsentrasi atom Boron yang di tambahkan pada kisi kristal a-Si:H di sebut sebagai konsentrasi akseptor ( $N_a$ ). Semakin besar nilai  $N_a$ , maka muatan positif yang terbentuk pada lapisan p dari sel surya juga akan semakin besar.

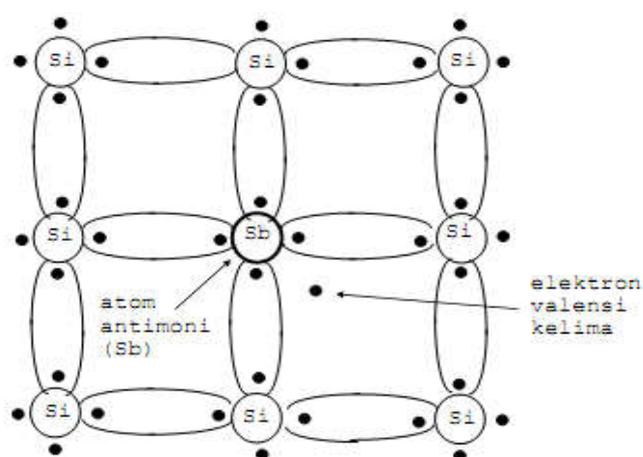


Gambar 2.2 Struktur Kristal semikonduktor tipe p (sumber: <http://zoniaelektro.net/semikonduktor/>)

Hal ini bisa terjadi karena pada saat atom boron masuk ke dalam kisi kristal a-Si:H maka atom boron tersebut akan mengalami ikatan kovalen dengan a-Si:H, dimana a-Si:H merupakan atom bervalensi IV, sedangkan Boron merupakan atom

dengan valensi III, sehingga pada saat berikatan secara kovalen maka setiap satu atom boron tersebut mengalami kekurangan satu elektron. Posisi yang kosong karena adanya kekurangan elektron tersebut dinamakan sebagai “hole”. Semakin banyak atom boron yang di tambahkan ke dalam kisi kristal a-Si:H maka semakin banyak hole yang terbentuk sehingga pembawa muatannya semakin besar. Selain itu peningkatan Na juga dapat menurunkan hambatan jesis material a-Si:H dan meningkatkan daya hantar listrik. Ilustrasi struktur kristal semikonduktor tipe p dapat di lihat pada Gambar 2.2

Dengan proses yang sama, jika atom a-Si:H di tambahkan dengan atom bervalensi V, dalam hal ini misalnya Fosfor (P) atau Antimoni (Sb) maka atom bervalensi V tersebut akan masuk ke dalam kisi kristal a-Si:H dan membentuk ikatan kovalen. Karena a-Si:H bervalensi IV sedangkan P atau Sb bervalensi V, maka pada saat berikatan secara kovalen, setiap satu atom P atau Sb yang masuk ke dalam kisi kristal a-Si:H akan menyisakan satu elektron bebas. Besarnya konsentrasi atom P atau Sb yang ditambahkan pada kisi kristal a-Si:H di sebut sebagai konsentrasi donor (Nd). Semakin besar Nd yang di inputkan pada saat simulasi maka semakin besar pula pembawa muatan negatif yang terbentuk pada lapisan n. Ilustrasi struktur kristal semikonduktor tipe n dapat di lihat pada Gambar 2.3



Gambar 2.3 Struktur Kristal semikonduktor tipe n (sumber: <http://zoniaelektro.net/semikonduktor/>)

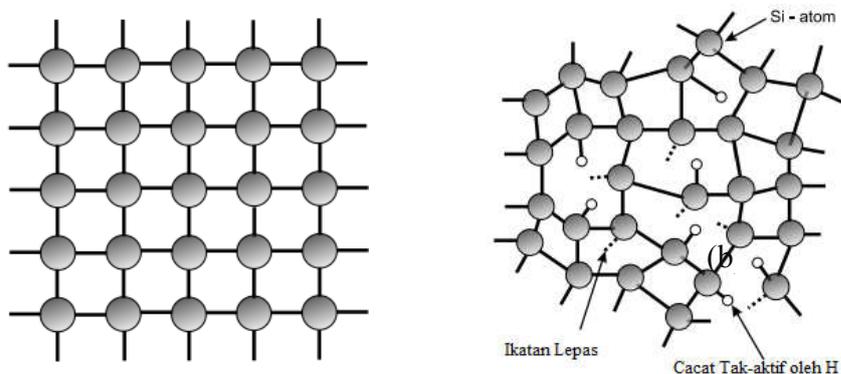
Lapisan yang terdapat diantara lapisan p dan lapisan n adalah lapisan i. lapisan ini tidak bermuatan dan dibuat dari bahan a-Si:H murni tanpa tambahan pengotor. Fungsi lapisan i adalah untuk memaksimalkan penyerapan energi foton dari sinar matahari sehingga efek *photovoltaic* yang dihasilkan semakin besar. Efek *photovoltaic* adalah fenomena dimana suatu perangkat dapat menyerap sinar matahari dan mengubahnya menjadi listrik.

## 2. 2 Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H)

Pada tahun 1969, R.C. Chittick dkk berhasil membuat silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) dengan cara deposisi menggunakan prekursor gas Silan ( $\text{SiH}_4$ ) dengan penambahan bahan pengotor berupa gas Hidrogen. Penambahan hidrogen ke dalam campuran gas silan selama deposisi a-Si dapat dilakukan untuk mengurangi kepadatan keadaan cacat dan memperbaiki kestabilan bahan terhadap efek penyinaran. Berdasarkan metode tersebut Spear dan Lecomber dari Inggris melaporkan bahwa elektron valensi tipe p dan tipe n dalam a-Si:H tersebut dapat dikontrol. Pengontrolan tipe p atau tipe n dilakukan dengan cara penambahan sejumlah kecil bahan dopan seperti fosfor atau boron ke dalam a-Si:H. Pengontrolan valensi semikonduktor telah membuka jalan untuk pemanfaatan bahan tersebut untuk piranti-piranti elektronik, terutama untuk piranti lapisan tipis photovoltaic, karena piranti photovoltaic seperti sel surya membutuhkan luasan aktif yang sangat besar untuk pengumpulan energi surya. Dalam hal ini bahan amorf mempunyai keuntungan yang sangat besar dalam pembuatan fabrikasi piranti-piranti yang mempunyai luasan besar dan seragam. Oleh karena itu apabila a-Si:H dapat dimanfaatkan sebagai piranti sel surya, maka biaya fabrikasi dapat ditekan serendah mungkin jika dibandingkan dengan sel surya berbahan silikon kristal. Silikon amorf dapat dihasilkan melalui beberapa metode antara lain metode lucutan pijar, evaporasi hampa atau metode sputtering. Dengan metode tersebut tidak hanya konduktivitas tipe p atau tipe n yang dapat dikontrol tetapi juga rapat pembawa muatannya.

Berdasarkan susunan atom-atom yang membentuk material Silikon, terdapat perbedaan mendasar antara material silikon kristalin dan material silikon amorf terhidrogenasi. Material silikon kristalin memiliki susunan atom yang

tersusun secara teratur dan berulang secara sempurna tanpa cacat dan memiliki keteraturan dalam jangka panjang. Susunan atom-atom yang membentuk silikon amorf terhidrogenasi tidak sepenuhnya tersusun acak, tetapi terdapat keteraturan dalam jangka pendek. Pada silikon amorf terhidrogenasi sebagian besar atom-atom silikon terkoordinasi membentuk empat cabang (four – fold) dengan konfigurasi ikatan tetrahedral yang serupa dengan silikon kristalin. Adanya variasi pada sudut ikatan dan panjang ikatan dapat menimbulkan keacakan posisi atom sehingga mengarah pada karakteristik ketakteraturan jangka panjang. Gambar 2.4(a) menunjukkan skema struktur silikon kristal tunggal dimana setiap atom silikon berikatan secara kovalen dengan empat atom silikon lainnya, dimana setiap ikatan memiliki panjang dan sudut ikatan yang sama. Sedangkan pada Gambar 2.4(b) atom-atom dalam silikon amorf terhidrogenasi tidak memiliki keteraturan dan berjangkauan pendek. Namun, konfigurasi atom-atom silikon yang berikatan kovalen dengan keempat atom silikon lainnya atau salah satu atom lain memiliki konfigurasi yang sama dengan silikon kristal (Poortmans and Arkhipov, 2006).

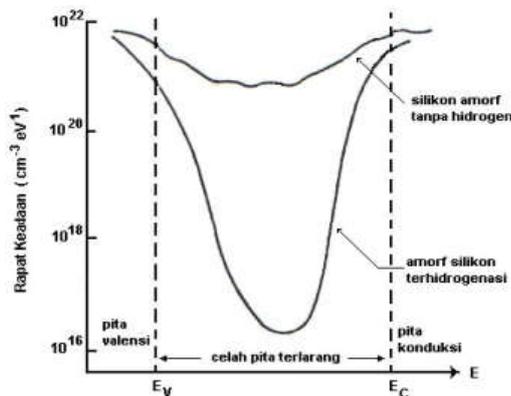


Gambar 2.4 Struktur atom (a) Silikon kristal tunggal (b) Silikon amorf terhidrogenasi (Poortmans and Arkhipov, 2006).

Silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) merupakan salah satu material yang cocok untuk diaplikasikan sebagai sel surya. Dibandingkan dengan material silikon amorf tanpa hidrogen (a-Si) material a-Si:H memiliki densitas cacat yang lebih rendah serta memiliki fotokonduktivitas yang lebih tinggi. Material a-Si:H memiliki nilai celah pita energi optik yang lebar ( 1.6 eV – 2.4 eV ), temperatur penumbuhan yang rendah (~ 200 °C ) serta dapat ditumbuhkan di atas substrat

yang harganya murah dan persediaan melimpah. Material a-Si:H juga memiliki kemampuan penyerapan tinggi pada daerah spektrum cahaya tampak . Pengaruh kandungan hidrogen dalam proses penumbuhan menyebabkan tingkat kecacatan bergerak masuk ke pita konduksi dan valensi, sehingga kerapatan keadaan (*state density*) berkurang secara tajam, seperti pada Gambar 2.5. Maka dari itu energi *bandgap* sangat dipengaruhi oleh kandungan hidrogen dan adanya defek pada lapisan tipis a-Si:H (Hamers et al., 2001).

Penyimpangan atau tidak samanya panjang dan sudut ikatan antara atom-atom silikon amorf menyebabkan ikatan-ikatan antar atom lemah dan mudah terlepas apabila diberikan sejumlah energi tertentu yang akan menyebabkan terjadinya cacat pada jaringan atom. Pada silikon amorf, terjadinya cacat disebabkan atom silikon amorf hanya memiliki tiga ikatan dan satu elektron yang tidak berpasangan. Ikatan yang kosong tersebut disebut *dangling bond* (Street, 1991).



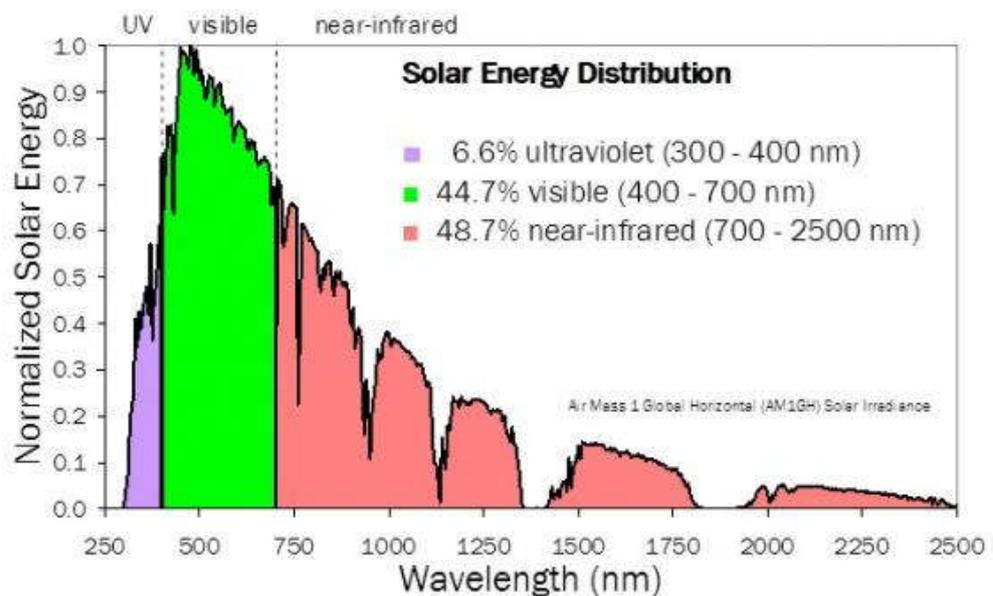
Gambar 2.5 Pengaruh kandungan hidrogen dalam silicon amorf terhadap rapat keadaan (Street, 1991).

Munculnya *dangling bond* pada silikon amorf merupakan akibat dari tidak berikatannya semua atom silikon dengan atom terdekatnya. Adanya *dangling bond* menyebabkan atom silikon tidak berikatan dengan sesama atom silikon. Namun *dangling bond* ini dapat dipasifkan dengan hidrogen melalui metode hidrogenasi, sehingga disebut dengan silikon amorf terhidrogenasi. Dalam silikon amorf yang tidak mengandung hidrogen, *dangling bond* muncul sebesar 1% dari kerapatan atom silikon (Gambar 2.5). Ketika atom-atom hidrogen

berikatan dengan silikon maka rapat keadaan terlokalisasinya menurun secara drastis hingga kisaran  $10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$  (Street, 1991).

### 2.3 Sifat Optik a-Si:H

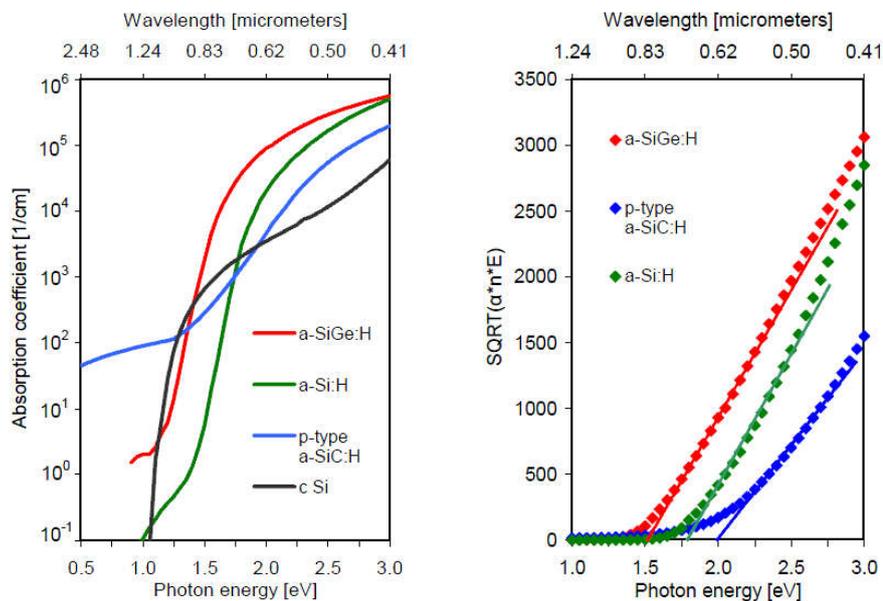
Sinar matahari adalah bagian dari radiasi elektromagnetik yang dilepaskan oleh matahari, khususnya sinar inframerah, cahaya tampak, dan ultraviolet pada panjang gelombang antara 250 nm hingga 2500 nm. Besarnya sinar matahari yang di terima oleh bumi tergantung pada panjang gelombang dari sinar tersebut. Gambar 2.3 memperlihatkan besarnya nilai distribusi sinar matahari yang mengenai bumi berdasarkan panjang gelombangnya. Sel surya a-Si:H memiliki serapan optimum pada panjang gelombang cahaya tampak yang memiliki intensitas penyinaran sebesar 44.7% pada rentang panjang gelombang 400 nm hingga 700 nm.



Gambar 2.6 Kapasitas aliran foton spektrum matahari sebagai fungsi celah pita energi. (Benigno, 2017).

Sifat optik a-Si:H biasanya ditandai oleh koefisien penyerapannya dan nilai celah pita optik. Gambar 2.7a menunjukkan koefisien penyerapan a-Si:H yang dibuat di Delft University of Technology sebagai fungsi energi foton.

Koefisien penyerapan c-Si dijadikan sebagai referensi. Angka ini menunjukkan bahwa a-Si:H menyerap hampir 100 kali lebih banyak dari c-Si di bagian spektrum cahaya tampak dari sinar matahari. Penyerapan yang lebih tinggi disebabkan oleh gangguan pada struktur atom a-Si:H yang berperilaku seperti celah semikonduktor langsung. Ini berarti bahwa lapisan a-Si:H setebal 1  $\mu\text{m}$  cukup untuk menyerap 90% energi cahaya matahari. Dalam prakteknya ketebalan sel surya a-Si:H kurang dari 0.5  $\mu\text{m}$  yang kira-kira 100 kali lebih kecil dari ketebalan sel surya dari silikon kristal tunggal. Hal ini menghasilkan penghematan yang signifikan baik dalam material maupun energi dalam pembuatan sel surya.



Gambar 2.7 (a) Koefisien absorpsi sebagai fungsi dari energi foton untuk a-Si:H, a-SiC:H tipe P dan a-SiGe:H dibuat oleh Delft University of Technology. Koefisien absorpsi dari cSi digunakan sebagai referensi. (b) Tauc plot dengan ekstrapolasi linear untuk menentukan *tauc optical bandgap* pada a-Si:H, a-SiC:H tipe P dan a-SiGe:H (Poortmans and Arkhipov, 2006).

Keuntungan lain dari a-Si:H adalah penyerapan optik yang bisa sedikit berubah dengan cara memvariasikan kandungan hidrogennya, dan bisa sangat berubah dengan cara dipadukan dengan karbon atau Germanium. Koefisien absorpsi silikon karbida amorf terhidrogenik (a-SiC:H) dan silikon germanium amorf terhidrogenasi (a-SiGe:H) yang dibuat di Universitas Teknologi Delf juga ditunjukkan pada Gambar 2.7a. Kemampuan a-Si:H yang mudah dipadukan ini

memungkinkan perancangan struktur sel surya dimana a-Si:H berdasarkan sifat penyerapan yang berbeda dapat digunakan sebagai lapisan aktif.

#### 2.4 Sifat Listrik a-Si:H

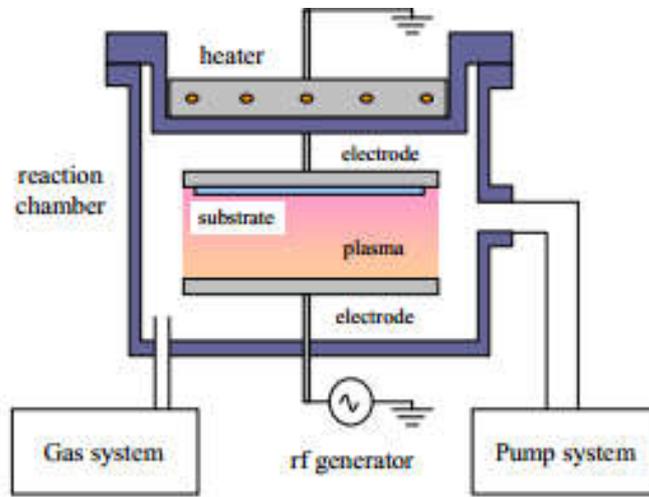
Sifat listrik a-Si:H biasanya dikarakterisasi dengan kondisi konduktivitas gelap dan konduktivitas terang. Pengukuran kedua sifat ini merupakan pendekatan standar untuk mendapatkan informasi tentang kualitas bahan a-Si:H untuk aplikasi pada sel surya. Juga memberikan informasi tentang ketahanan dan pengaruh pengotor pada a-Si:H. Mobilitas pembawa muatan dari a-Si:H adalah sekitar dua kali lipat lebih rendah dari pada silikon kristal tunggal. Biasanya, pada lapisan intrinsik a-Si:H, mobilitas elektron adalah  $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , dan mobilitas lubang adalah  $1 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$ . Nilai rendah mobilitas elektron dan lubang serta celah mobilitas tinggi dari a-Si:H menghasilkan konduktivitas gelap yang rendah, kurang dari  $1 \times 10^{-10} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ .

#### 2.5 Deposisi Lapisan a-Si:H dengan PECVD

Salah satu metode deposisi yang banyak digunakan untuk menghasilkan lapisan a-Si:H adalah menggunakan alat *Radio Frequency – Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition* (RF-PECVD) dimana frekuensi eksitasi plasma 13,56 MHz. Plasma sering disebut juga sebagai gas yang bermuatan listrik (gas yang elektronnya terlepas). Dalam pembentukan plasma dibutuhkan energi untuk melepaskan elektron-elektron dari atom-atom netral. Sumber energi yang biasa dipakai yaitu energi panas, energi listrik dan energi cahaya yang berasal dari sinar ultraviolet atau laser. Plasma dapat dipandang sebagai fase ke empat (Marc, 2013).

Lapisan a-Si:H di dapatkan dari bahan prekursor Silan ( $\text{SiH}_4$ ) dan Hidrogen ( $\text{H}_2$ ) yang di alirkan ke dalam *chamber* PECVD. Selanjutnya plasma yang ada dalam *chamber* berperan sebagai sumber energi untuk mendisosiasi  $\text{SiH}_4$  dan  $\text{H}_2$  tersebut menjadi partikel-partikel reaktif yang disebut sebagai radikal yang muncul dari molekul silan dan hidrogen yang terdisosiasi selama proses deposisi. Selanjutnya partikel - partikel reaktif Si dan H akan saling berikatan dan

terdeposisi di atas substrat yang telah di sediakan di dalam alat PECVD menjadi lapisan a-Si:H.



Gambar 2.8 Skema sistem PECVD (Marc, 2013).

Salah satu keuntungan penting dari proses PECVD adalah temperatur gas yang rendah sehingga cocok digunakan untuk berbagai jenis substrat. Tumbukan inelastik yang mungkin terjadi antara elektron dan spesies gas (A) di dalam proses PECVD: (Yoyok, 2012).

- Eksitasi :  $A + e^- \rightarrow A^* + e^-$
- Ionisasi :  $A + e^- \rightarrow A^* + 2e^-$
- Disosiasi :  $A_2 + e^- \rightarrow 2A + e^-$
- *Electron attachment* :  $A + e^- \rightarrow A^-$
- *Dissociative attachment* :  $A_2 + e^- \rightarrow A + A^-$

Proses deposisi lapisan a-Si:H dari plasma gas silan dapat dijelaskan kedalam 4 tahap:

1. Reaksi primer dalam fase gas dimana molekul-molekul silan terdekomposisi oleh tumbukan elektron yang menghasilkan beragam radikal netral, ion positif dan negatif dan elektron.

2. Reaksi sekunder dalam plasma diantara molekul, ion dan radikal. Reaksi-reaksi yang terjadi di dalam zona deposisi dimana reaksi *cross-linking* menghasilkan formasi lapisan tipis. Spesies netral berdifusi ke dalam substrat, ion positif menembak lapisan dan ion negatif terperangkap dalam plasma.
3. Interaksi plasma dan permukaan selama proses penumbuhan lapisan tipis yang meliputi difusi radikal, ikatan kimia dan pengikatan hidrogen pada permukaan.
4. Sub permukaan melepaskan hidrogen dan terjadi relaksasi struktur jaringan silikon (Marc, 2013).

## 2.6 Fabrikasi Sel Surya Struktur p-i-n

Fabrikasi sel surya p-i-n secara umum dilakukan dengan menggunakan alat PECVD. Melalui teknik PECVD, maka peneliti dapat menentukan secara bebas parameter deposisi seperti daya RF, Laju aliran gas serta waktu deposisi, dimana parameter-parameter tersebut dapat mempengaruhi sifat optik dan listrik lapisan sehingga memperoleh hasil yang optimal. Perubahan-perubahan parameter deposisi yang dilakukan dapat mengakibatkan perubahan celah pita energi dan juga ketebalan dari lapisan. Walaupun begitu tidak mudah untuk mendapatkan ketebalan lapisan dan nilai celah pita energi yang tepat sesuai dengan keinginan, karena sampai saat ini belum ada perhitungan matematis yang menjelaskan hubungan antara parameter-parameter deposisi dengan ketebalan lapisan dan celah pita energi yang dihasilkan dari proses deposisi.

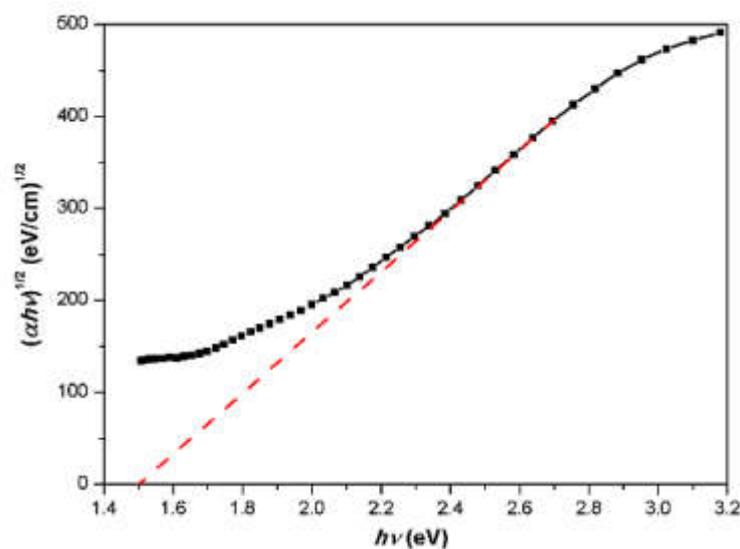
Tahap pertama dari proses deposisi yang dilakukan adalah persiapan substrat yang bersih sebagai dasar dalam penumbuhan lapisan. Substrat kemudian dimasukkan kedalam ruang (chamber) PECVD. Proses pembuatan lapisan tunggal tipe-i didalam chamber dilakukan dengan mengalirkan gas  $\text{SiH}_4$  dan  $\text{H}_2$  ke dalam chamber PECVD kemudian menentukan besarnya nilai parameter dari daya RF, laju aliran gas serta waktu deposisi. Setelah proses deposisi selesai dilakukan, tahap selanjutnya adalah melakukan pengukuran ketebalan lapisan dengan menggunakan alat *atomic force microscopes (AFM)*. Untuk menentukan celah pita energi (*energy gap*) dari lapisan yang telah dideposisi, maka metode yang umum

untuk digunakan adalah metode Tauc Plot (Wood dan Tauc, 1972). Persamaan yang digunakan adalah:

$$(\alpha h\nu)^n = A(h\nu - E_g) \quad (2.1)$$

$$\alpha = -\frac{\ln(T)}{d} \quad (2.2)$$

dalam hal ini  $\alpha$  adalah koefisien absorpsi yang dihitung pada lapisan tipis dengan menggunakan hasil transmitansi yang diperoleh pada pengukuran UV-Vis,  $d$  adalah ketebalan dari lapisan tipis hasil deposisi tiap layer,  $h\nu$  adalah energi foton,  $A$  adalah konstanta,  $n$  adalah  $\frac{1}{2}$  untuk material dengan pita *indirect*, dan  $E_g$  adalah energi gap.



Gambar 2.9 Skema diagram Tauc Plot pada film tipis silikon amorf terhidrogenasi (Yuan et al., 2014)

Dengan mencari garis linear pada bagian kurva dan menariknya sehingga berpotongan pada sumbu-x, maka titik perpotongan tersebut dapat dianggap sebagai energi gap lapisan tipis tersebut. Gambar 2.9 adalah contoh salah satu pengukuran energi gap lapisan tipis silikon amorf terhidrogenasi dengan menggunakan metode Tauc Plot (Yuan et al., 2014). Melalui garis linier yang

ditarik hingga memotong sumbu-x maka dapat ditentukan bahwa celah pita energi lapisan tersebut berkisar 1.5 eV.

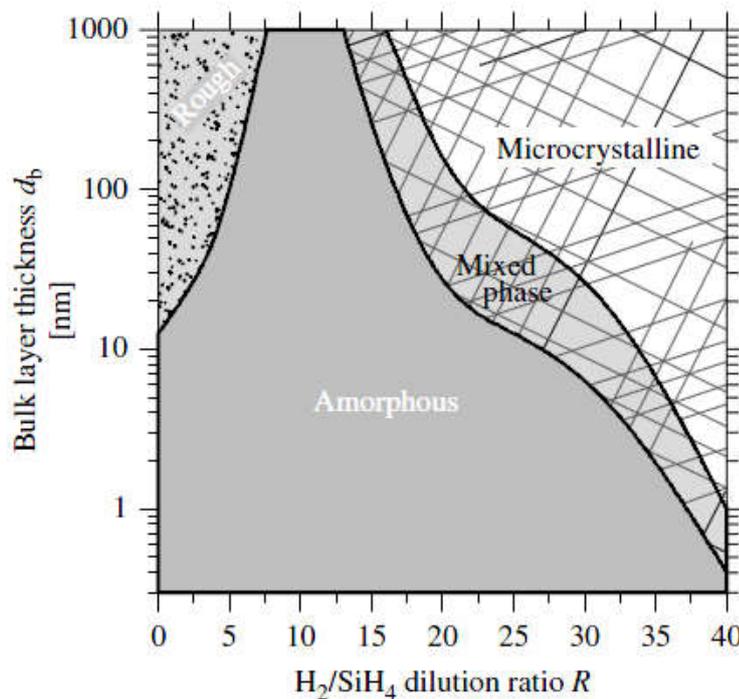
Pembuatan struktur lapisan tipe-p dilakukan dengan mengalirkan gas SiH<sub>4</sub>, B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, dan H<sub>2</sub> sedangkan lapisan tipe-n dilakukan dengan menggunakan gas SiH<sub>4</sub>, PH<sub>3</sub> dan H<sub>2</sub>. Pembuatan lapisan p-i-n dilakukan bertahap di atas substrat kaca yang dilapisi dengan ITO (Indium Tin Oxide). Tahap pertama ialah proses deposisi lapisan tipe-n dengan parameter-parameter waktu deposisi yang telah ditentukan. Substrat tersebut kemudian dipindahkan ke chamber lain untuk proses deposisi lapisan tipe-i. Pembuatan lapisan tipe-i dibuat terpisah agar tidak terkontaminasi dengan gas lain yang dapat mempengaruhi ketidakmurnian semikonduktor silikon. Setelah proses deposisi lapisan tipe-i selesai, maka substrat dipindahkan lagi ke chamber lain untuk deposisi tipe-p. Apabila chamber pembuatan lapisan tipe-n adalah chamber yang sama pada saat pembuatan lapisan tipe-p, maka diperlukan dummy untuk normalisasi chamber tersebut. Hal ini penting dilakukan agar pada chamber yang sama, diharapkan tidak ada kontaminasi lapisan tipe-n yang diakibatkan oleh sisa gas pembuatan tipe-p (Yahya, 2003).

## **2.7 Pengenceran Hidrogen**

Pengenceran hidrogen yang kuat dari campuran gas silan selama deposisi a-Si dapat dilakukan untuk mengurangi kepadatan keadaan cacat dan memperbaiki kestabilan bahan terhadap efek penyinaran. Sel surya dengan lapisan i yang dideposisi dengan pengenceran H yang kuat menunjukkan peningkatan kinerja dan stabilitas yang lebih baik. Ada dua efek penting lainnya dari pengenceran hidrogen. Seiring peningkatan pengenceran, laju deposisi mengalami penurunan. Bila pengenceran hidrogen meningkat signifikan, lapisan tipis yang dihasilkan berubah menjadi mikrokristalin (Deng and Schiff, 2003).

Ferlauto dkk. telah membuat studi tentang "diagram fasa" untuk film tipis silikon yang dideposisi dalam berbagai tingkat pengenceran hidrogen pada silan. Hasil spektroskopi ellipsometri in situ dari film yang tumbuh, disajikan pada Gambar 2.5. Diagram ini berkaitan dengan tingkat daya RF tertentu, substrat (c-Si), dan suhu substrat. Untuk pengenceran yang lebih rendah ( $R < 10$ ), film selalu

amorf, namun ada transisi ke permukaan yang “kasar” melampaui ketebalan kritis. Transisi kekasaran ini terjadi karena pengenceran meningkat. Untuk pengenceran yang lebih tinggi, film tipis yang terbentuk memiliki struktur amorf. Saat film semakin tebal, bentuk kristal mulai terbentuk dalam matriks amorf (menciptakan “fase campuran”). Pada akhirnya, film ini akan seluruhnya berubah menjadi mikrokristalin. Rincian diagram fasa ini bergantung pada parameter deposisi, khususnya pada kondisi daya dan substrat, namun struktur diagram fasa ini dianggap universal.



Gambar 2.10 Diagram fasa dari Film tipis a-Si:H yang di deposisikan pada substrat dengan variasi pengenceran hidrogen (Deng and Schiff, 2003)

Efek pengenceran hidrogen selama pertumbuhan mungkin disebabkan karena efek berikut. (1) Atom hidrogen "mengetsa" film yang tumbuh, menghilangkan ikatan-ikatan lemah yang berada dalam lokasi yang tidak tepat, (2) fluks atom hidrogen yang tinggi mendorong difusivitas permukaan atom sehingga dapat bergerak di sekitar posisi yang lebih stabil secara energetik dan membentuk ikatan yang lebih kuat, (3) atom hidrogen berdifusi ke dalam jaringan, merestrukturisasi dan membentuk struktur yang lebih stabil. Untuk alasan yang

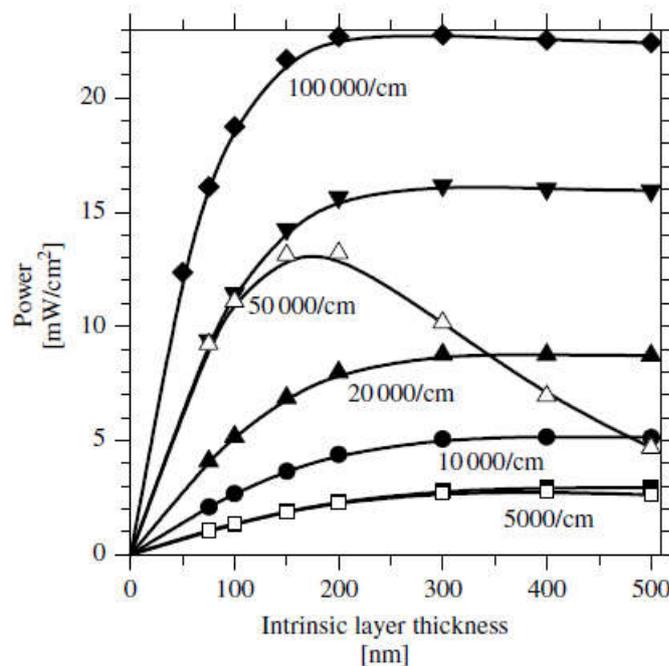
sama, pengenceran hidrogen yang cukup besar menginduksi pembentukan Si mikrokristalin. Peningkatan urutan jarak pendek dan jarak jauh melalui pengenceran hidrogen telah diamati pada banyak teknik deposisi, termasuk PECVD (DC, RF, VHF, dan MW) dan CVH HW; Tentu saja, transisi dari struktur amorf ke mikrokristalin terjadi pada tingkat pengenceran yang berbeda untuk teknik deposisi yang berbeda.

Tingkat pengenceran hidrogen untuk transisi dari film tipis silikon amorf menjadi mikrokristalin tergantung pada kondisi deposisi lainnya juga. Pada suhu substrat yang lebih tinggi (di atas 300 ° C), transisi dari amorf ke keadaan mikrokristalin terjadi pada pengenceran H yang lebih tinggi; Efek ini kemungkinan disebabkan oleh koefisien kopling hidrogen yang rendah di permukaan. Pada deposisi suhu rendah (di bawah 250 ° C), sekali lagi diperlukan pengenceran yang lebih tinggi untuk mencapai transisi antara amorf ke mikrokristalin; Efek ini kemungkinan disebabkan oleh difusivitas permukaan hidrogen yang rendah selama pertumbuhan. Bila a-Si dideposisikan pada suhu yang lebih rendah dengan pengenceran H yang lebih tinggi, lebih banyak H yang bergabung dan material memiliki celah pita yang lebih lebar (Funde et al., 2008).

## **2.8 Lapisan Penyerap Pada Sel Surya p-i-n**

Gambar 2.11 menggambarkan perhitungan komputer yang menunjukkan bagaimana daya keluaran sel p-i-n berbasis a-Si bervariasi dengan ketebalan lapisan intrinsik. Kurva yang berbeda mewakili hasil untuk penerangan monokromatik dengan menggunakan energi foton yang bervariasi dengan koefisien penyerapan yang ditentukan. Semua kurva dihitung menggunakan fluks foton yang sama. Kondisi iluminasi semacam itu dapat dicapai secara eksperimen dengan menggunakan laser yang energi fotonnya bisa disetel dari 1.8 sampai 2.3 eV. Sinar matahari, tentu saja, menyajikan situasi yang jauh lebih kompleks. Untuk lapisan intrinsik yang cukup tipis, daya sebanding dengan jumlah foton yang diserap (yaitu pada ketebalan  $d$  dan koefisien absorpsi  $\alpha$ ). Dalam batas ini faktor pengisian memiliki nilai hampir ideal sekitar 0.8. Untuk penyerapan kuat ( $\alpha = 100\,000 / \text{cm}$  (sesuai dengan energi foton sekitar 2.3 eV), saturasi daya terjadi pada ketebalan lebih dari 100 nm, yang merupakan jarak khas di mana foton

diserap. Karena sel yang lebih tebal tidak menyerap banyak cahaya tambahan, daya berhenti meningkat melewati batas ini. Untuk penyerapan cahaya yang lemah ( $5000 / \text{cm}$ , sesuai dengan energi foton  $1.8 \text{ eV}$ ), saturasi daya terjadi bila lapisan intrinsik memiliki tebal sekitar  $300 \text{ nm}$ . Panjang koleksi ini berasal dari wilayah di mana keruntuhan medan terjadi pada Gambar 2.5. Keruntuhan medan listrik terkuat di dekat lapisan-p dan lebih lemah di dekat lapisan-n. Ini mungkin tidak jelas, tetapi rekombinasi elektron dan lubang terutama terjadi di daerah medan lemah. Efek ini bisa dipahami secara kasar dari argumen berikut. Di daerah dengan medan mendekati nol, proses drift yang digerakkan oleh medan listrik tidak menentukan kepadatan dari photogenerated elektron dan lubang. Karena elektron dan lubangnya dihasilkan pada kecepatan yang sama, densitasnya sama, dan keduanya terbentuk di bawah iluminasi sampai kecepatan rekombinasi nya  $R$  satu sama lain cocok dengan laju  $G$  dari photogeneration,  $G = R$ . Perlu dicatat bahwa kondisi ini juga berlaku untuk pengukuran fotokonduktivitas yang dibuat pada film terisolasi dari bahan tertentu.



Gambar 2.11 Hasil perhitungan komputer dari Power output PIN solar cell sebagai fungsi dari ketebalan lapisan intrinsik (Deng and Schiff, 2003)

Asimetri dalam arus elektron dan lubang menjelaskan mengapa sel surya berbasis silikon amorf lebih efisien bila diterangi melalui lapisan-p nya. Pada

Gambar 2.11 ditunjukkan (sebagai simbol terbuka) perhitungan untuk daya yang dihasilkan oleh sel yang diterangi melalui lapisan n. Anggap dulu hasilnya dengan serapan cahaya lemah ( $5000 / \text{cm}$ ). Dalam kasus ini, photogeneration pembawa pada dasarnya seragam di seluruh ketebalan sel yang ditunjukkan, dan sel tidak "tahu" sisi mana yang telah disinari. Sejalan dengan itu, pembangkit listrik pada dasarnya sama untuk iluminasi melalui lapisan-p dan melalui lapisan-n. Sekarang pertimbangkan cahaya yang diserap lebih kuat masuk melalui n-layer ( $50.000/\text{cm}$ ). Bila sel lebih tipis dari panjang serapannya (sekitar 200 nm dalam kasus ini), photogeneration pada dasarnya seragam. Tidak ada perbedaan dalam kekuatan yang dihasilkan untuk iluminasi melalui lapisan n dan p. Namun, untuk sel yang lebih tebal, ada penurunan kekuatan dari sel untuk iluminasi melalui lapisan n dibandingkan dengan lapisan-p. Daya jatuh karena hole, rata-rata harus bergerak lebih jauh untuk mencapai lapisan-p daripada saat dihasilkan oleh iluminasi melalui lapisan-p. Pengisian listrik dari hole yang bergerak perlahan dapat menurunkan medan listrik, menyebabkan rekombinasi dan hilangnya tenaga (Deng and Schiff, 2003).

## **2.9 Prinsip Kerja PV Cell**

Sel fotovoltaik merupakan perangkat semikonduktor yang mengubah sinar matahari menjadi listrik dengan menggunakan efek fotovoltaik. Ketika cahaya jatuh pada sel surya, foton yang masuk dapat diserap, dipantulkan atau dilewati. Untuk foton yang diserap oleh sel surya, energi foton harus lebih besar daripada energi celah pita sel (Luque and Hegedus, 2011). Foton kemudian diserap untuk menghasilkan pasangan pembawa muatan bergerak (misalnya: elektron dan lubang) yang kemudian dipisahkan oleh struktur perangkat (seperti sambungan p-n). Ini menghasilkan perbedaan potensial dan dengan demikian menghasilkan arus listrik. Efek fotovoltaik dapat diperoleh dari berbagai material. Dalam sebagian besar kasus, bahan semikonduktor (seperti silikon) dalam bentuk persimpangan p-n secara komersial digunakan untuk menghasilkan sel surya. Karakteristik I-V dari dioda persimpangan p-n diberikan oleh persamaan Shockley sebagai berikut (Luque and Hegedus, 2011).

$$I_D = I_0 \left[ \exp \left( \frac{qV_D}{nkT_{cell}} \right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

dimana,  $I_D$  adalah arus yang dihasilkan oleh dioda,  $V_D$  adalah tegangan dioda,  $I_0$  adalah arus saturasi balik dari dioda,  $q = 1,602 \times 10^{19}$  Coulomb adalah muatan elektron,  $T_{cell}$  adalah suhu sel dengan satuan Kelvin,  $n$  adalah faktor idealitas dioda (tanpa dimensi), dan  $k = 1,38065 \times 10^{23}$  J/K adalah konstanta Boltzmann. Kondisi resiprok dari ( $q = nkT_{cell}$ ) disebut tegangan termal dari dioda. Oleh karena itu, tegangan termal dioda adalah:

$$V_T = \frac{nkT_{cell}}{q} \quad (2.4)$$

Sehingga persamaan 2.5 menjadi:

$$I_D = I_0 \left[ \exp \left( \frac{V_D}{V_T} \right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

Fill Factor sel surya diberikan:

$$FF = \frac{V_M \cdot I_M}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2.6)$$

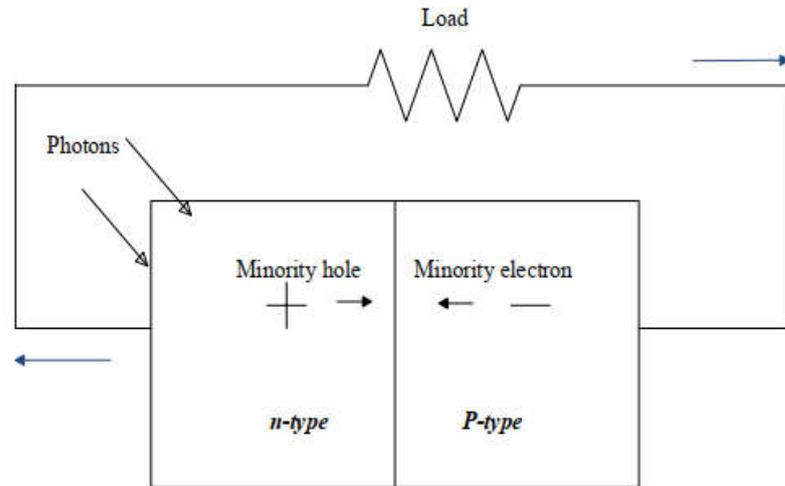
Sementara efisiensi sel surya ( $\eta$ ) diberikan :

$$\eta = \frac{FF I_{sc} V_{oc}}{P_{in}} \quad (2.7)$$

dimana  $V_m$  dan  $I_m$  adalah tegangan dan arus yang berpengaruh pada Daya output maksimum sel surya.  $V_{oc}$  adalah Tegangan rangkaian terbuka,  $I_{sc}$  adalah arus hubung singkat dan  $P_{in}$  adalah daya input.

Sebuah persambungan p-n pada semikonduktor dapat dibuat sebagai sel surya. Gambar 2.12 menunjukkan struktur dasar sel PV. Ketika cahaya terjadi pada sel, cahaya foton menghasilkan pasangan elektron-hole bebas yang kemudian tertarik ke arah persimpangan. Gambar 2.12 mengilustrasikan

rangkaian sel surya. Di dalam sel, elektron mengalir dari silikon tipe-n ke silikon tipe-p. Arus yang dihasilkan sebanding dengan intensitas cahaya (Archer and Hill, 2001).



Gambar 2.12 Desain rangkaian fotovoltaiik (Sarkar, 2016)

## 2.10 Permodelan Sel Surya

Ada berbagai model rangkaian listrik sel fotovoltaiik yang telah banyak dijelaskan dalam literatur. Biasanya, sel PV diwakili oleh sumber arus ( $I_{ph}$ ), satu atau dua dioda (D) di paralel dengan sumber arus, hambatan seri ( $R_s$ ) atau hambatan paralel ( $R_p$ ) atau keduanya terhubung. Datasheet dari panel PV yang disediakan oleh pabrikan biasanya mencakup beberapa parameter listrik dan termal seperti yang diberikan pada Tabel 4.1. Semua nilai ini diukur pada kondisi uji standar yaitu pada 1,5 massa udara (AM), 1000 W/m<sup>2</sup>, dan suhu 25 ° C.

Tabel 2.1 Parameter listrik dan thermal pada rangkaian fotovoltaiik

Parameters	Symbol [Unit]
<b>Electrical Parameters</b>	
Maximum Power Rating	$P_{max}$ [W <sub>p</sub> ]
Rated Current	$I_{MPP}$ [A]
Rated Voltage	$V_{MPP}$ [V]
Short Circuit Current	$I_{sc}$ [A]
Open Circuit Voltage	$V_{oc}$ [V]
<b>Thermal Parameters</b>	

Normal Operating Cell Temperature	NOCT [oC]
Temperature Co-efficient: Short Circuit Current	[A / oC]
Temperature Co-efficient: Open Circuit Voltage	[V / oC]

### Standard Test Conditions (STC)

Air Mass	AM = 1.5
Irradiance	G=1000W/ m2
Cell Temperature	Tcell = 25oC

---

#### 2.10.1 Model Ideal Sel Surya

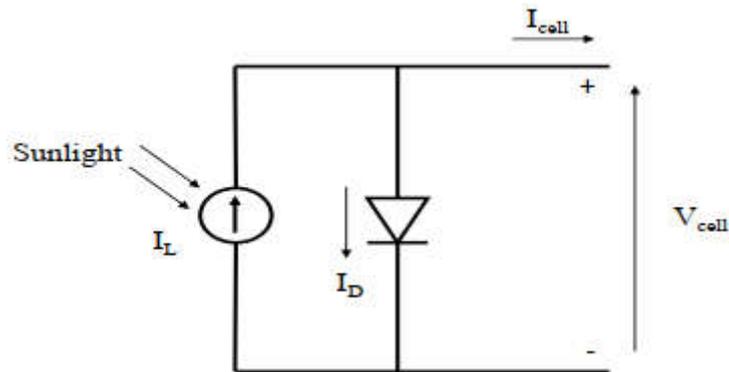
Dalam kondisi ideal, sel surya secara elektronik setara dengan sumber arus yang di paralel dengan dioda seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 2.12. Arus yang dihasilkan cahaya, juga dikenal sebagai photocurrent, direpresentasikan sebagai  $I_L$ , arus dioda sebagai  $I_D$ , arus bersih dan tegangan terminal sel surya masing-masing sebagai  $I_{cell}$  dan  $V_{cell}$ . Arus bersih  $I_{cell}$  dari sel PV diberikan sebagai berikut:

$$I_{cell} = I_L - I_D \quad (2.8)$$

Substitusi  $I_D$  dengan persamaan 2.6 menjadi:

$$I_{cell} = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_{cell}}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (2.9)$$

Photocurrent  $I_L$  meningkat secara linier dengan insulasi matahari. Jika arus dioda  $I_D$  kecil, maka akan lebih banyak arus yang dikirimkan oleh sel PV. Faktor idealitas dioda  $n$  menunjukkan seberapa dekat dioda mengikuti persamaan dioda yang ideal (Archer and Hill, 2001). Nilai  $n$  lebih besar dari 1 mewakili kondisi non-ideal, sedangkan  $n = 1$  mewakili perilaku ideal dioda.

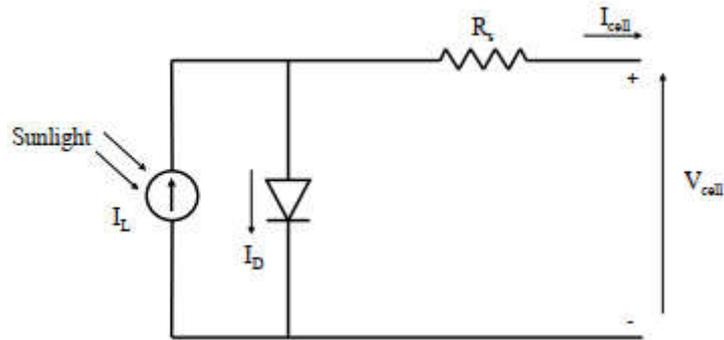


Gambar 2.13 Model ideal sel fotovoltaik (Sarkar, 2016)

Model sel ideal memiliki 3 parameter untuk mendapatkan  $I_L$  photocurrent, dark current  $I_0$ , dan *diode ideality factor*  $A$ . Oleh karena itu, model yang ideal ini juga disebut model 3-p (3 parameter) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1. Model sel ideal ini dapat digunakan untuk menunjukkan konsep dasar sel PV tetapi tidak pernah digunakan untuk mensimulasikan kondisi operasi yang sebenarnya. Ini karena ada beberapa keterbatasan dalam praktik sel PV (Castaner and Silvestre, 2002). Rugi hambatan seri, rugi hambatan shunt, rekombinasi di daerah muatan ruang sel surya yang non-ohmik, dan non-idealitas difusi diode semuanya menunjukkan bahwa model dioda tunggal yang ideal tidak cukup untuk secara akurat mewakili daya maksimum yang di kirim oleh sel PV (Luque and Hegedus, 2011).

### 2.10.2 Model Dioda Tunggal $R_s$

Arus yang dihasilkan dalam sel fotovoltaik mengalir melalui bahan semikonduktor yang tidak banyak terdapat pendopingan sehingga dapat menunjukkan nilai resistivitas (Ma et al., 2014). Selain itu, ketahanan metal grid, kontak dan arus pengkabelan juga berkontribusi terhadap total kerugian hambatan seri. Biasanya, penjumlahan hambatan ( $R_s$ ) ditambahkan secara seri dengan model rangkaian ideal untuk merepresentasikan kerugian seri ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 (Ma et al., 2014).



Gambar 2.14 Sel fotovoltaik model diode tunggal  $R_s$  (Sarkar, 2016)

Model ini disebut model  $R_s$  dioda tunggal karena penambahan resistor yang dijumlahkan secara seri,  $R_s$  arus bersih mengalir melalui sel,  $I_{cell}$  sekarang menjadi:

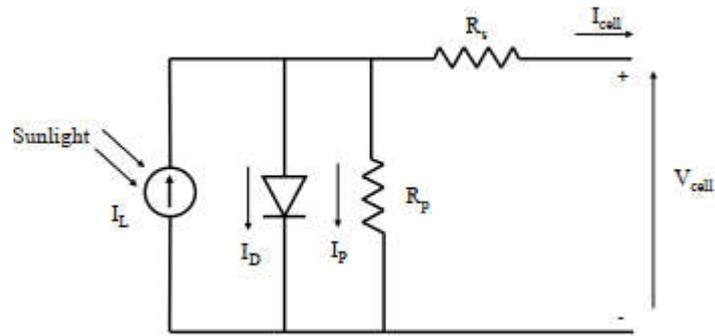
$$I_{cell} = I_L - I_D \quad (2.10)$$

$$I_{cell} = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_{cell} + I_{cell} R_s}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (2.11)$$

Dari persamaan (2.11) dapat dilihat bahwa sekarang ada 4 parameter yang tidak diketahui:  $I_L$  photocurrent, arus jenuh balik  $I_0$ , faktor idealitas diode  $A$ , dan yang baru ditambahkan penjumlahan resistor seri  $R_s$ . Oleh karena itu model ini dinamakan sebagai model 4-p. Namun, dalam penelitian terbaru ditunjukkan bahwa model 4-p yang mengabaikan efek hambatan shunt tidak benar benar sesuai dengan data eksperimen I-V dan P-V.

### 2.10.3 Model Dioda Tunggal $R_p$

Karena sel surya terbuat dari wafer luas, atau dari bahan film tipis yang luas, sejumlah kerugian hambatan shunt terjadi pada lapisan n sel PV p-n junction. Korsleting yang dilokalisasi atau hubungan pendek dari batas sel adalah bentuk yang paling umum dari kehilangan shunt (shunt losses) (Castaner and Silvestre, 2002). Model dioda tunggal  $R_p$  yang memiliki kedua resistansi seri  $R_s$  dan resistansi shunt  $R_p$  ditunjukkan dalam gambar 2.15. Karena ada 5 parameter yang tidak dikenal dalam model ini maka disebut model 5-p.



Gambar 2.15 Sel fotovoltaik model diode tunggal  $R_p$  (Sarkar, 2016)

Arus yang melalui hambatan paralel,  $I_p$  dapat diberikan sebagai:

$$I_p = \frac{V_{cell} + IR_s}{R_p} \quad (2.12)$$

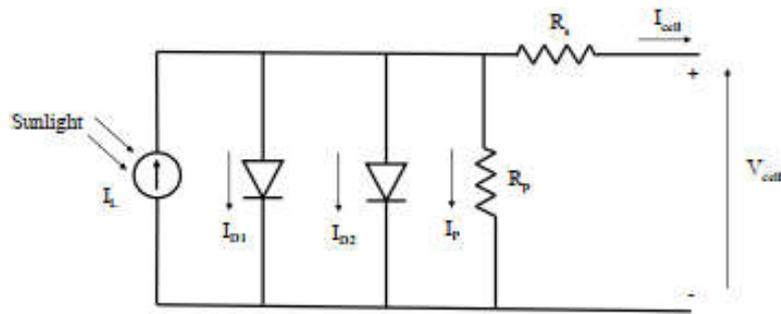
Persamaan model 5-p menjadi:

$$I_{cell} = I_L - I_D - I_p \quad (2.13)$$

$$I_{cell} = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_{cell} + I_{cell} R_s}{V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + IR_s}{R_p} \quad (2.14)$$

#### 2.10.4 Model Dua Dioda

Meskipun, model 5-p yang umum digunakan dapat mencapai tingkat akurasi yang dapat diterima, tetapi pada kenyataannya, arus jenuh dari sel fotovoltaik adalah superposisi linier dari difusi muatan dan rekombinasi pada lapisan pengisian ruang. Oleh karena itu representasi listrik PV sel yang lebih akurat dapat dilakukan oleh dua dioda Shockley secara paralel dengan sumber arus dan rangkaian yang terkait dan hambatan shunt (Castaner and Silvestre, 2002). Model ini lebih relevan pada bias tegangan rendah yaitu pada operasi tingkat radiasi rendah dari sel PV (Luque and Hegedus, 2011). Gambar 2.16 mengilustrasikan sirkuit dari model ini.



Gambar 2.16 Sel fotovoltaik model dua diode (Sarkar, 2016)

Persamaan rangkaian ekuivalen dari dua model dioda diberikan sebagai berikut:

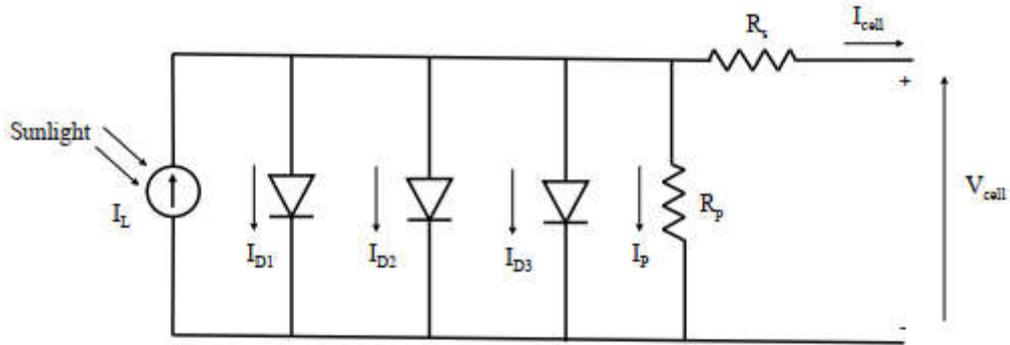
$$I_{cell} = I_L - I_{D1} - I_{D2} - I_p \quad (2.15)$$

$$I_{cell} = I_L - I_{01} \left[ \exp \left( \frac{V_{cell} + I_{cell} R_s}{V_{T1}} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp \left( \frac{V_{cell} + I_{cell} R_s}{V_{T2}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + I_{cell} R_s}{R_p} \quad (2.16)$$

Jumlah parameter meningkat menjadi 7 pada model dua dioda. Untuk mengurangi jumlah yang tidak diketahui faktor idealitas dioda pertama biasanya diambil sebagai 1 dan faktor faktor dioda kedua diambil sebagai 2. Asumsi ini dilakukan berdasarkan perkiraan rekombinasi Schokley-Read-Hall dalam lapisan muatan ruang fotodioda (Sah et al., 1957). Sayangnya, asumsi ini tidak selalu benar (McIntosh et al., 2000).

### 2.10.5 Model Tiga Dioda

Untuk mengambil pengaruh batas butir dan kebocoran arus melalui perifer menjadi pertimbangan dioda lain dapat ditambahkan secara paralel dengan dua dioda lain dari model dua dioda (Nishioka et al., 2007). Model ini memiliki 9 parameter dan membutuhkan proses solusi yang benar-benar rumit. Sebagian besar waktu, mengabaikan beberapa parameter dilakukan untuk mengurangi jumlah persamaan model ini. Gambar 2.17 menunjukkan diagram sirkuit dari model ini.



Gambar 2 17 Sel fotovoltaiik model tiga diode (Sarkar, 2016)

Persamaan arus dari model ini adalah:

$$I_{cell} = I_L - I_{D1} - I_{D2} - I_{D3} - I_P \quad (2.17)$$

$$I_{cell} = I_L - I_{01} \left[ \exp \left( \frac{V_{cell} + I_{cell} R_s}{V_{T1}} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp \left( \frac{V_{cell} + I_{cell} R_s}{V_{T2}} \right) - 1 \right] - I_{03} \left[ \exp \left( \frac{V_{cell} + I_{cell} R_s}{V_{T3}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + I_{cell} R_s}{R_p} \quad (2.18)$$

Model ini biasanya digunakan untuk mengekstraksi sifat listrik dari sel surya Si multi-kristal. Karena kerumitan proses ekstraksi parameter dari model tiga dioda, penggunaan model ini sangat terbatas (Ma et al., 2014).

## 2.11 Permodelan Numerik sel Surya

Dengan kondisi batas yang tepat di bawah kondisi steady-state dan di bawah gangguan sinusoidal kecil, AFORS-HET dapat mensimulasikan struktur semikonduktor satu dimensi dengan metode numerik (Stangl et al., 2004). Untuk melakukan hal ini, gabungan persamaan diferensial parsial diubah menjadi persamaan aljabar non-linier yang ditetapkan oleh metode beda hingga. Pada kondisi bulk, persamaan Poisson satu dimensi dan persamaan transportasi untuk elektron dan lubang dipecahkan:

$$\frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{q} \frac{\partial^2 \phi(x,t)}{\partial x^2} = p(x,t) - n(x,t) + N_D - N_A + \sum_{defect} \rho_t(x,t) \quad (2.19)$$

$$-\frac{1}{q} \frac{\partial j_n(x,t)}{\partial x} = G_n(x,t) - R_n(x,t) - \frac{\partial}{\partial t} n(x,t) \quad (2.20)$$

$$\frac{1}{q} \frac{\partial j_p(x,t)}{\partial x} = G_p(x,t) - R_p(x,t) - \frac{\partial}{\partial t} p(x,t) \quad (2.21)$$

Di mana,  $n$  adalah kerapatan elektron,  $p$  adalah kerapatan lubang, dan  $\phi$  adalah potensial listrik untuk sistem persamaan diferensial yang diselesaikan.  $q$  adalah muatan elektron, " $0$ ,"  $r$  adalah konstanta dielektrik absolut dan relatif,  $N_D$ , dan  $N_A$  adalah konsentrasi donor dan akseptor. Fungsi distribusi  $f_t$  menggambarkan muatan yang disimpan dalam cacat, menentukan probabilitas yang cacat dengan kepadatan cacat  $N_t$  pada posisi  $E$  dalam celah pita ditempati dengan elektron:

$$\rho_t(x,t) = -\int dE f_t(E,x,t) N_t(E) \quad (2.22)$$

Defect tipe donor:

$$\rho_t(x,t) = \int dE (1 - f_t(E,x,t)) N_t(E) \quad (2.23)$$

Arus elektron  $j_n$ , dan arus hole  $j_p$  saat ini digerakkan oleh gradien dari quasi Fermi energi  $E_{Fn}$  yang setara dengan jumlah difusi dan arus drift dengan mobilitas  $\mu_n$ , atau  $\mu_p$  dalam jumlah besar. Ini dapat dinyatakan sebagai:

$$j_n(x,t) = q\mu_n n(x,t) \frac{\partial E_{Fn}(x,t)}{\partial x} = -\frac{\mu_n kT}{q} \frac{\partial n(x,t)}{\partial x} + \mu_n n(x,t) \frac{\partial \phi(x,t)}{\partial x} \quad (2.24)$$

$$j_p(x,t) = q\mu_p p(x,t) \frac{\partial E_{Fp}(x,t)}{\partial x} = -\frac{\mu_p kT}{q} \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} + \mu_p p(x,t) \frac{\partial \phi(x,t)}{\partial x} \quad (2.25)$$

Ketika struktur diterangi, laju pembangkitan optik super-bandgap (untuk  $hc/\lambda > E_g$ ) dari pita valensi ke pita konduksi dari lapisan semikonduktor dapat diperoleh dengan asumsi sederhana penyerapan Lambert-Beer dengan menentukan koefisien penyerapan spektral  $\alpha$  dari setiap lapisan. Untuk generasi sub-bandgap (untuk  $hc/\lambda < E_g$ ) dari cacat ke konduksi atau pita valensi dapat didefinisikan dengan menetapkan koefisien emisi optik untuk keadaan cacat:

$$e_n^0(E,x) = \sigma_n^0 N_C \phi(\tau,x) \vartheta(E_C - E - \frac{hc}{\tau}) \quad (2.26)$$

$$e_p^0(E, x) = \sigma_p^0 N_V \phi(\tau, x) \vartheta(E - E_V - \frac{hc}{\tau}) \quad (2.27)$$

Dimana  $e_n^0(E)$ ,  $e_p^0(E) \neq 0$ , dan  $\sigma_n^0$ ,  $\sigma_p^0$  penampang lintang optik,  $\phi(\tau, x)$  adalah spektrum fluk foton, dengan panjang gelombang  $\tau$  pada posisi  $x$ ,  $N_C$  dan  $N_V$  adalah kerapatan pita valensi dan pita konduksi, sedangkan  $E_C$  dan  $E_V$  adalah energi pita konduksi dan valensi dan  $\vartheta(E) = 1$  untuk  $E \leq 0$ ,  $\vartheta(E) = 0$  untuk  $E > 0$ .

Sekarang, untuk rekombinasi dari pita konduksi ke dalam pita valensi yang mungkin terjadi secara langsung disebut rekombinasi pita ke pita, atau rekombinasi Auger. Rekombinasi juga dapat terjadi karena cacat melalui status perangkap yang disebut rekombinasi Shockley-Read-Hall atau rekombinasi SRH. Rekombinasi SRH dapat terjadi karena dua hal:

1. Sebuah elektron (atau lubang) terperangkap oleh keadaan energi di wilayah terlarang yang dimasukkan melalui cacat pada kisi kristal. Cacat ini dapat secara tidak sengaja dimasukkan atau sengaja ditambahkan ke material, misalnya dalam doping material; dan
2. Jika sebuah lubang (atau elektron) bergerak ke kondisi energi yang sama sebelum elektron dipancarkan kembali secara termal ke pita konduksi, maka ia bergabung kembali.

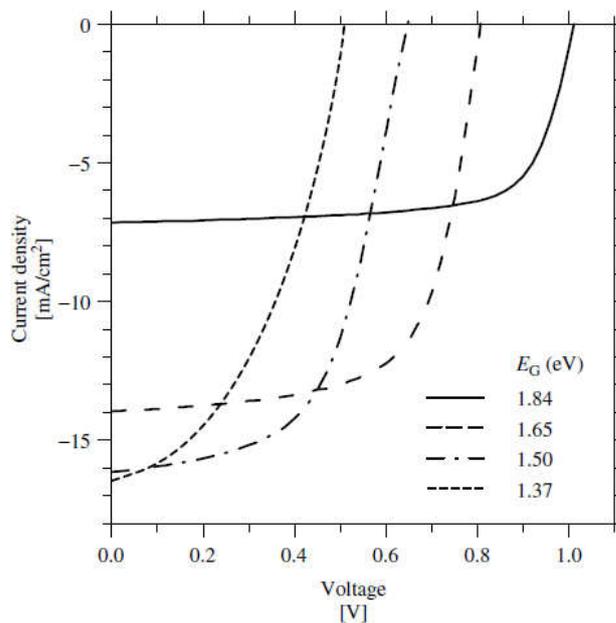
Besarnya laju rekombinasi secara keseluruhan di perlihatkan pada persamaan 2.28.

$$R_{n,p}(x, t) = R_{n,p}^{direct}(x, t) + R_{n,p}^{SRH}(x, t) \quad (2.28)$$

Derivasi secara rinci dari rekombinasi ini dapat ditemukan di (Stangl et al., 2004). Akhirnya, untuk kondisi batas, potensial listrik dari satu kontak diambil sebagai nol dan pada kontak kedua kondisi batas ditentukan yang berhubungan dengan tegangan sel eksternal atau arus ke kuantitas internal.

## 2.12 Rekayasa Bandgap Dengan Proses Alloying

Bahan paduan amorf dengan celah pita energi yang berbeda beda bisa didapatkan dengan cara menggabungkan material a-Si dengan unsur lain seperti Ge, C, O, dan N. Hal ini memungkinkan pemilihan kombinasi celah pita yang sesuai untuk pembuatan sel surya efisiensi tinggi. Karena celah pita dari paduan a-SiGe dapat disesuaikan antara 1.7 sampai 1.1 eV dengan cara mengatur jumlah Ge dalam paduan, maka material ini dapat digunakan sebagai lapisan penyerap bawah dengan celah pita energi yang rendah untuk sel surya multijunction.

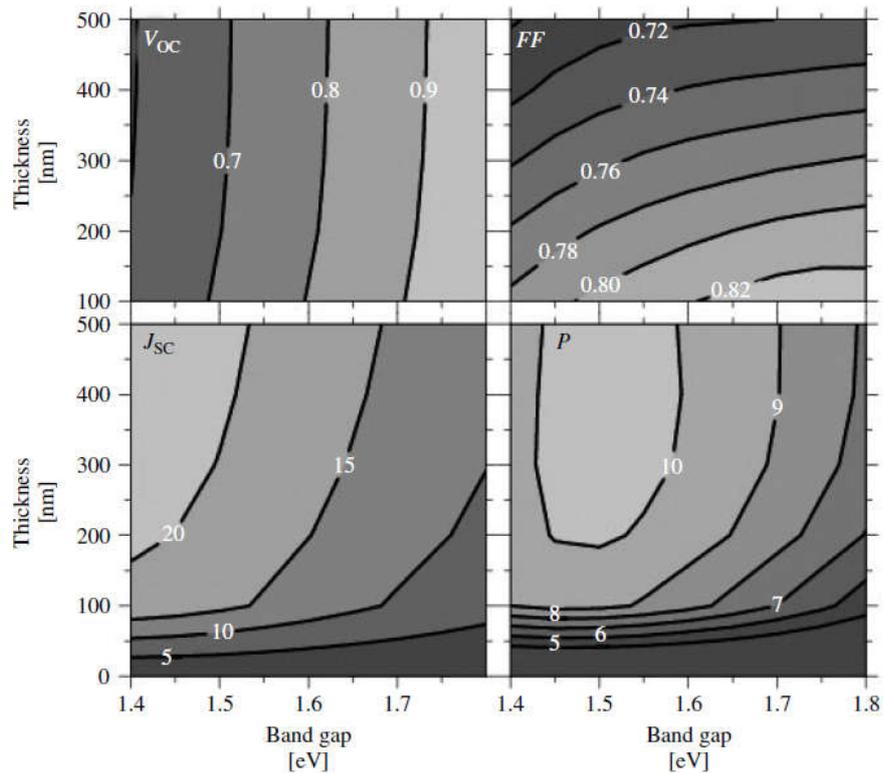


Gambar 2.18 Kinerja dari sel surya NIP a-Si dan a-SiGe dengan variasi konsentrasi Ge pada lapisan intrinsik i. Faktor pengisian untuk sel-sel ini masing – masing adalah 0.70, 0.62, 0.55, dan 0.43 untuk sel dengan celah pita i-layer 1.84, 1.65, 1.50, dan 1.37 eV (Pratima Agarwal et al., 2002).

Gambar 2.18 menunjukkan karakteristik J-V dari serangkaian sel surya SiGe dengan konsentrasi Ge yang berbeda pada lapisan-i (dengan ketebalan konstan, dan tanpa backreflector) (Pratima Agarwal et al., 2002). Karena celah pita dapat dikurangi dengan menggabungkan lebih banyak Ge di lapisan i,  $V_{OC}$  turun dan  $J_{SC}$  naik (dengan ketebalan konstan), sesuai dengan tren perhitungan pada Gambar 2.19.

Faktor pengisian sel juga mengalami penurunan sesuai dengan penurunan celah pita energi. Hal ini dapat terjadi karena defect density mengalami

peningkatan pada material paduan. Seiring dengan peningkatan defect density pada lapisan i, kinerja sel surya pada akhirnya akan didominasi oleh perangkap photocarrier pada cacat dan bukan pada perangkap ekor pita. Secara kasar, dapat dianggap bahwa jebakan defek berfungsi sebagai pengurangan "kumpulan panjang" yang berguna untuk menentukan ketebalan lapisan intrinsik yang tepat.



Gambar 2 19 Model perhitungan  $J_{sc}$  (mA / cm<sup>2</sup>), rangkaian terbuka Voltage  $V_{oc}$ , (V), faktor pengisian  $FF$ , dan power  $P$  di menggunakan AM1.5 iluminasi untuk sel surya pin berbasis a-Si:H dengan variasi celah lapisan intrinsik dan ketebalan. Tidak ada reflektor belakang atau efek tekstur yang disertakan (Pratima Agarwal et al., 2002).

### 2.13 Efisiensi kuantum

Efisiensi kuantum (QE) didefinisikan sebagai tingkat keefektifan dari fluks radiasi untuk menghasilkan parameter yang dapat diukur seperti suhu, arus, dll (Zalewski and Hoyt, 1991). QE dibagi menjadi dua yaitu QE internal dan QE eksternal, tergantung pada bagian cahaya yang mengambil bagian dalam pembentukan efek ini. QE internal untuk fotodiode adalah jumlah pasangan

elektron dan lubang yang dibuat per foton yang diserap, sedangkan QE eksternal adalah jumlah pasangan elektron dan lubang yang dibuat per foton kejadian. QE secara umum dinyatakan sebagai fungsi dari salah satu parameter seperti panjang gelombang, koefisien penyerapan, frekuensi, dll. Pada panjang gelombang tertentu jika foton insiden sepenuhnya diserap dan semua pembawa minoritas yang dihasilkan berkontribusi terhadap arus, maka QE pada panjang gelombang tertentu dikatakan bersatu (unity). Kehilangan refleksi optik, rekombinasi pembawa, cacat, ketebalan lapisan pasif, tingkat doping, dll, telah dianggap sebagai parameter penting yang menyebabkan pengurangan QE. Fotodioda berbasis silikon umumnya telah diproduksi sedemikian rupa sehingga QE internalnya dekat dengan daerah unity terutama di daerah yang terlihat dari spektrum elektromagnetik. Namun, karena mekanisme kerugian yang disebutkan di atas, diharapkan ada beberapa defleksi dari unity, yang disebut defisiensi QE internal.

Persentase jumlah foton yang berkontribusi terhadap terbentuknya arus foton didefinisikan sebagai QE eksternal dan diberikan oleh (Zalewski and Hoyt, 1991):

$$EQE(\tau) = \frac{Rhc}{q\tau} \quad (2.29)$$

di mana R adalah responsivitas fotodioda yang diberikan sebagai arus terukur per insiden radiasi, c adalah kecepatan cahaya dalam ruang hampa, q adalah muatan elektron,  $\lambda$  adalah panjang gelombang cahaya dan h konstanta Planck. Beberapa bagian dari berkas cahaya akan dipantulkan dari permukaan fotodioda. Persentase kontribusi dari foton yang tersisa ke photocurrent atau ke reflektansi  $\rho$  disebut sebagai QE internal, diberikan sebagai (Zalewski and Hoyt, 1991):

$$IQE(\tau) = \frac{Rhc}{q\tau(1-\rho)} = \frac{EQE}{(1-\rho)} \quad (2.30)$$

## **BAB 3**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Rancangan Penelitian**

Penelitian ini dilakukan dengan metode numerik menggunakan bantuan dari perangkat lunak *automat for simulation of heterostructures* (AFFORS-HET) untuk mempelajari mekanisme fisis dan optik dari sel surya p-i-n berbasis amorfus silikon terhidrogenasi (a-Si:H). Optimisasi sel surya dilakukan dengan mevariasikan nilai celah pita energi dan ketebalan lapisan untuk lapisan n, lapisan intrinsik dan lapisan p. Sementara untuk konsentrasi doping dilakukan pada lapisan n dan lapisan p. Penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan diantaranya:

1. Mensimulasikan sel surya single junction berstruktur p-i-n untuk mendapatkan nilai *fill factor* (FF), tegangan terbuka ( $V_{oc}$ ), rapat arus ( $J_{sc}$ ) dan efisiensi ( $\eta$ ) dengan bantuan perangkat lunak AFFORS-HET.
2. Mensimulasikan sel surya single junction berstruktur p-i-n dengan variasi bandgap, ketebalan lapisan dan konsentrasi doping lapisan p dan n untuk mendapatkan nilai *fill factor* (FF), tegangan terbuka ( $V_{oc}$ ), rapat arus ( $J_{sc}$ ) dan efisiensi ( $\eta$ ) dengan bantuan perangkat lunak AFFORS-HET.
3. Melakukan analisis terhadap hasil simulasi pada poin 1 dan 2.

#### **3.2 Waktu dan Tempat Penelitian**

Penelitian ini akan dilakukan selama satu semester, dimulai dari penyusunan proposal, simulasi dan karakterisasi sel surya sampai dengan penyusunan laporan akhir. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Pemodelan Material dan Komputasi Departemen Teknik Material ITS dan Laboratorium Material Maju Departemen Fisika ITS.

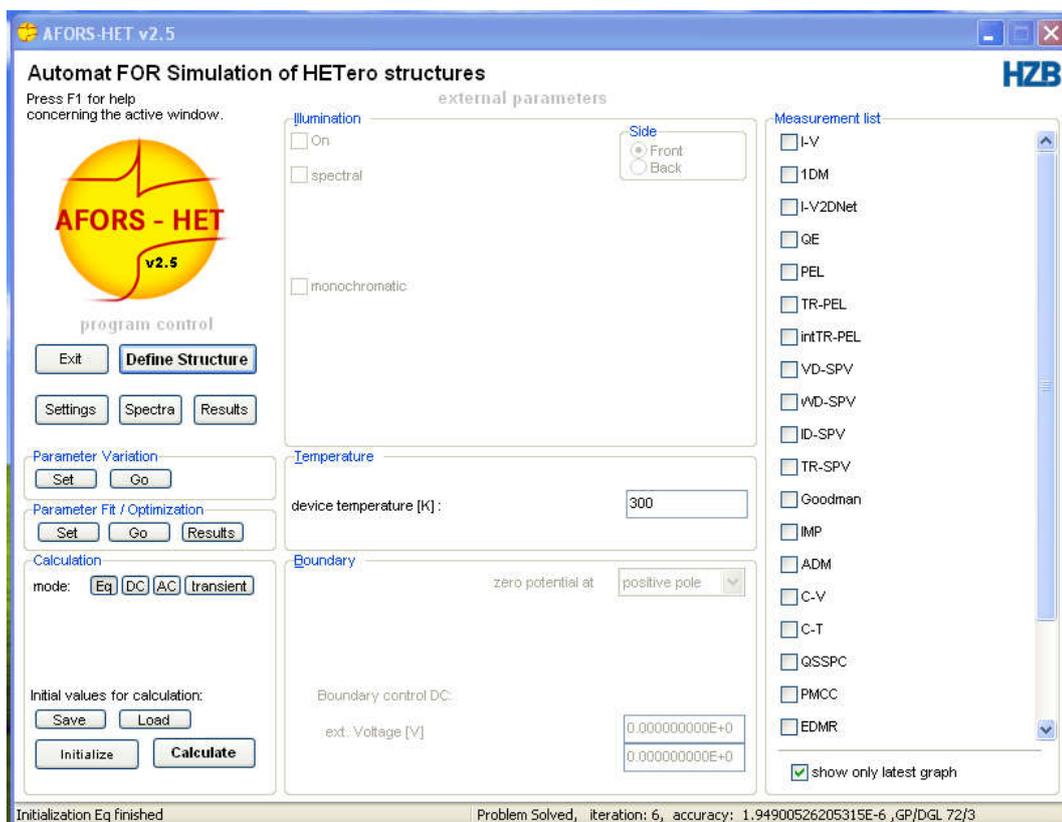
#### **3.3 Langkah Kerja**

##### **3.3.1 Deskripsi Software AFORS-HET**

Software AFORS-HET merupakan program komputer yang dikembangkan untuk menghitung proses simulasi yang berkaitan dengan rapat

pembawa muatan, laju rekombinasi, proses aliran elektron dan hole, struktur pita, medan listrik dan rapat arus dan lain-lain pada lapisan penyusun sel surya. Model matematis yang dikembangkan pada software ini dilakukan dengan memecahkan persamaan Poisson dan persamaan kontinuitas didasarkan pada statistic Maxwell-Boltzmann untuk seluruh lapisan sel surya berbasis a-Si:H (Varache, dkk, 2015). Simulasi model sel surya dibagi menjadi dua bagian yaitu simulasi model optic dan listrik. Pada simulasi model optik laju generasi lokal  $G(x,t)$  dihitung berdasarkan pada jumlah pembawa muatan (elektron dan hole) yang terbentuk perdetik persatuan volume pada saat  $t$  dan posisi  $x$  dalam lapisan semikonduktor (sel surya) akibat proses absorpsi cahaya dengan meninjau pengaruh refleksi internal dan eksternal, superposisi koheren perambatan cahaya atau hamburan cahaya pada permukaan internal.

Gambaran fisis tentang model listrik pada software AFORS-HET dilakukan dengan meninjau rapat pembawa muatan lokal  $n(x,t)$ ,  $p(x,t)$  dan potensial listrik lokal  $\phi(x,t)$  pada masing-masing lapisan sel surya berdasarkan syarat batas yang diberikan. Secara umum gambaran fisis yang diberikan pada simulasi optic dan listrik dalam bentuk kuantitas internal sel, seperti diagram pita energy, laju rekombinasi lokal, arus sel lokal dan pergeseran fase lokal. Tampilan visual software AFORS-HET ditunjukkan pada gambar 3.1

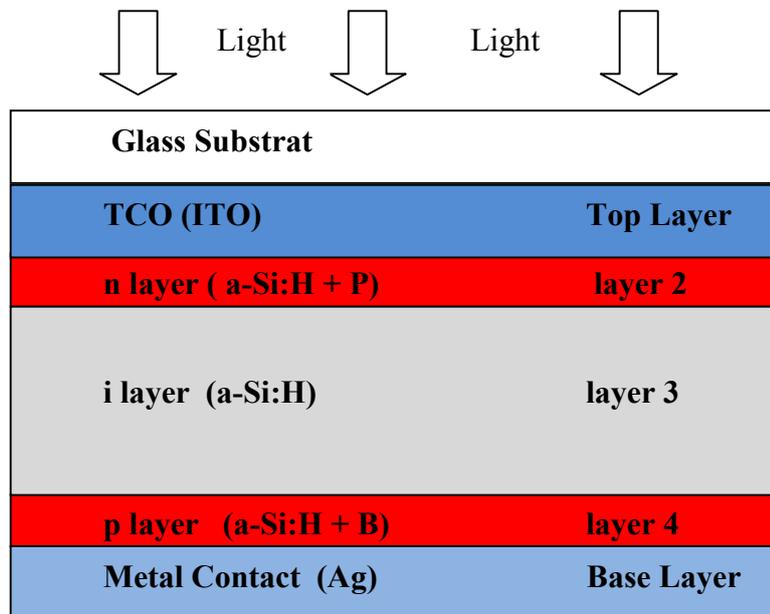


Gambar 3. 1 Tampilan visual software AFORS-HET (Stangl et al., 2004)

### 3.3.2 Simulasi Sel Surya a-Si:H dengan AFORS-HET

Software AFORS-HET digunakan untuk mensimulasi sel surya struktur p-i-n, dimana struktur sel surya yang digunakan pada simulasi ini terdiri dari substrat glass, lapisan *transparent conducting oxide* (TCO) menggunakan material *indium tin oxide* (ITO), lapisan p menggunakan material (a-Si:H) yang di doping dengan Boron (B) bertindak sebagai *emiter layer*, lapisan intrinsic (i) menggunakan material (a-Si:H) bertindak sebagai *absorber*, lapisan n menggunakan material (a-Si:H) yang di doping dengan Phospor (P) bertindak sebagai *window layer* dan kontak metal (Ag). Struktur lengkap dari sel surya p-i-n adalah (Glass/ITO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/a-Si:H(p)/Ag). Simulasi dilakukan dengan mengeksplorasi lapisan p, lapisan intrinsik, dan lapisan n dengan memvariasikan ketebalan, celah pita energi dan konsentrasi doping  $N_D$  dan  $N_A$ .

Skema simulasi sel surya struktur p-i-n berbasis a-Si:H ditunjukkan pada Gambar 3.2



Gambar 3. 2 Skema sel surya struktur p-i-n berbasis a-Si:H

### 3.3.2.1 Parameter – parameter simulasi sel surya p-i-n

Gambar 3.2 menunjukkan diagram skematik untuk sel surya yang disimulasikan menggunakan perangkat lunak AFORS-HET. Secara rinci, simulasi perangkat numerik dilakukan untuk TCO (80 nm)/lapisan n (10 nm)/lapisan i (300 nm)/lapisan p (10 nm)/Ag (80 nm). Untuk semua sel, lapisan n atas (Layer 2) lapisan i (layer 3 ) dan lapisan p bawah (Layer 4) memiliki celah pita dan ketebalan bervariasi sesuai dengan optimisasi yang dilakukan. Demikian juga dengan konsentrasi doping  $N_A$  dan  $N_D$ , nilai nya bervariasi sesuai dengan optimalisasi yang dilakukan. Celah pita dan ketebalan lapisan n atas (lapisan 2), lapisan aktif (lapisan 3) dan lapisan p bawah (lapisan 4) yang tidak di optimisasi diambil konstan 1,7 eV. Sementara itu nilai konsentrasi  $N_A$  dan  $N_D$  yang tidak di optimisasi diambil konstan  $7.47 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  dan  $6.89 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Nilai ketebalan lapisan n, lapisan i dan lapisan p yang tidak di optimisasi di buat tetap

sebesar 10 nm, 300 nm dan 10 nm. Parameter-parameter yang lain yang tidak dilakukan optimisasi di buat tetap dan secara lengkap di tunjukkan pada tabel 3.1

Tabel 3. 1 Parameter simulasi sel surya p-i-n a-Si:H

<b>Parameter</b>	<b>a-Si:H (n)</b>	<b>a-Si:H (i)</b>	<b>a-Si:H (p)</b>
Thickness (nm)	bervariasi	bervariasi	bervariasi
Dielectric constant	11.9	11.9	11.9
Electron affinity (eV)	4.03	3.9	3.9
Band gap (eV)	bervariasi	bervariasi	bervariasi
Optical Gap (eV)	1.72	1.74	1.72
Effective conduction band density (cm <sup>-3</sup> )	1.00E+20	1.00E+20	1.00E+20
Effective valence band density (cm <sup>-3</sup> )	1.00E+20	1.00E+20	1.00E+20
Acceptor concentration, Na (cm <sup>-3</sup> )	bervariasi	0	0
Donor Concentration, Nd (cm <sup>-3</sup> )	0	1000	bervariasi
Electron mobility (cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> S <sup>-1</sup> )	20	20	50
Hole Mobility (cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> S <sup>-1</sup> )	5	5	5
Thermal velocity of electron (cms <sup>-1</sup> )	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07
Thermal velocity of hole (cms <sup>-1</sup> )	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07
Layer density (gcm <sup>-3</sup> )	2.328	2.328	2.328

### 3.3.2.2 Optimisasi Celah Pita Energi

Optimisasi celah pita energi dilakukan pada lapisan n, i dan p. Optimisasi dilakukan pada celah pita energi dari 1.6 eV hingga 2.4 eV dengan interval 0.1 eV. Parameter - parameter lainnya yang tidak dioptimisasi di input sesuai dengan data pada tabel 3.1. Tabel 3.2 memperlihatkan variasi bandgap pada lapisan n,i dan p pada temperatur 300°K dan power density 100 W/cm<sup>2</sup>.

Tabel 3. 2 Variasi bandgap pada lapisan p, i dan n

<b>Sampel</b>	<b>layer</b>	<b>Thickness (nm)</b>	<b>Band gap (eV)</b>	<b>Doping (cm-3)</b>
1	Lapisan n	10	1.6 - 2.4	$6.89 \times 10^{19}$
	Lapisan i	300	1.7	1000
	Lapisan p	10	2.0	$7.47 \times 10^{19}$
2	Lapisan n	10	2.0	$6.89 \times 10^{19}$
	Lapisan i	300	1.6 - 2.4	1000
	Lapisan p	10	2.0	$7.47 \times 10^{19}$
3	Lapisan n	10	2.0	$6.89 \times 10^{19}$
	Lapisan i	300	1.7	1000
	Lapisan p	10	1.6 - 2.4	$7.47 \times 10^{19}$

### 3.3.2.3 Optimisasi ketebalan lapisan

Optimisasi ketebalan lapisan di aplikasikan pada lapisan n, i dan p. Pada lapisan n, ketebalan lapisan bervariasi antara 5 nm hingga 50 nm dengan interval 5 nm. Lapisan i bervariasi antara 100 nm hingga 1000 nm dengan interval 100 nm dan lapisan p bervariasi dari 5 nm hingga 50 nm dengan interval 5 nm.

Tabel 3. 3 Variasi ketebalan pada lapisan p, i dan n

<b>Sampel</b>	<b>layer</b>	<b>Thickness (nm)</b>	<b>Band gap (eV)</b>	<b>Doping (cm-3)</b>
1	Lapisan n	5 - 50	2.0	$6.89 \times 10^{19}$
	Lapisan i	300	1.7	1000
	Lapisan p	10	2.0	$7.47 \times 10^{19}$
2	Lapisan n	10	2.0	$6.89 \times 10^{19}$
	Lapisan i	100 – 1000	1.7	1000
	Lapisan p	10	2.0	$7.47 \times 10^{19}$
3	Lapisan n	10	2.0	$6.89 \times 10^{19}$
	Lapisan i	300	1.7	1000
	Lapisan p	5 - 50	2.0	$7.47 \times 10^{19}$

### 3.3.2.4 Optimisasi pendopingan

Optimisasi doping di aplikasikan pada lapisan n dan p dengan variasi antara  $1 \times 10^{18} - 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ . Parameter –parameter yang lain sesuai dengan tabel 3.1. Parameter –parameter lebih lengkap diperlihatkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3. 4 Variasi doping pada lapisan p dan n

Sampel	layer	Thickness (nm)	Band gap (eV)	Doping (cm-3)
1	Lapisan n	10	2.0	$10^{19} - 10^{21}$
	Lapisan i	300	1.70	1000
	lapisan p	10	2.0	$7.47 \times 10^{19}$
2	Lapisan n	10	2.0	$6.89 \times 10^{19}$
	Lapisan i	300	1.70	1000
	lapisan p	10	2.0	$10^{18} - 10^{20}$

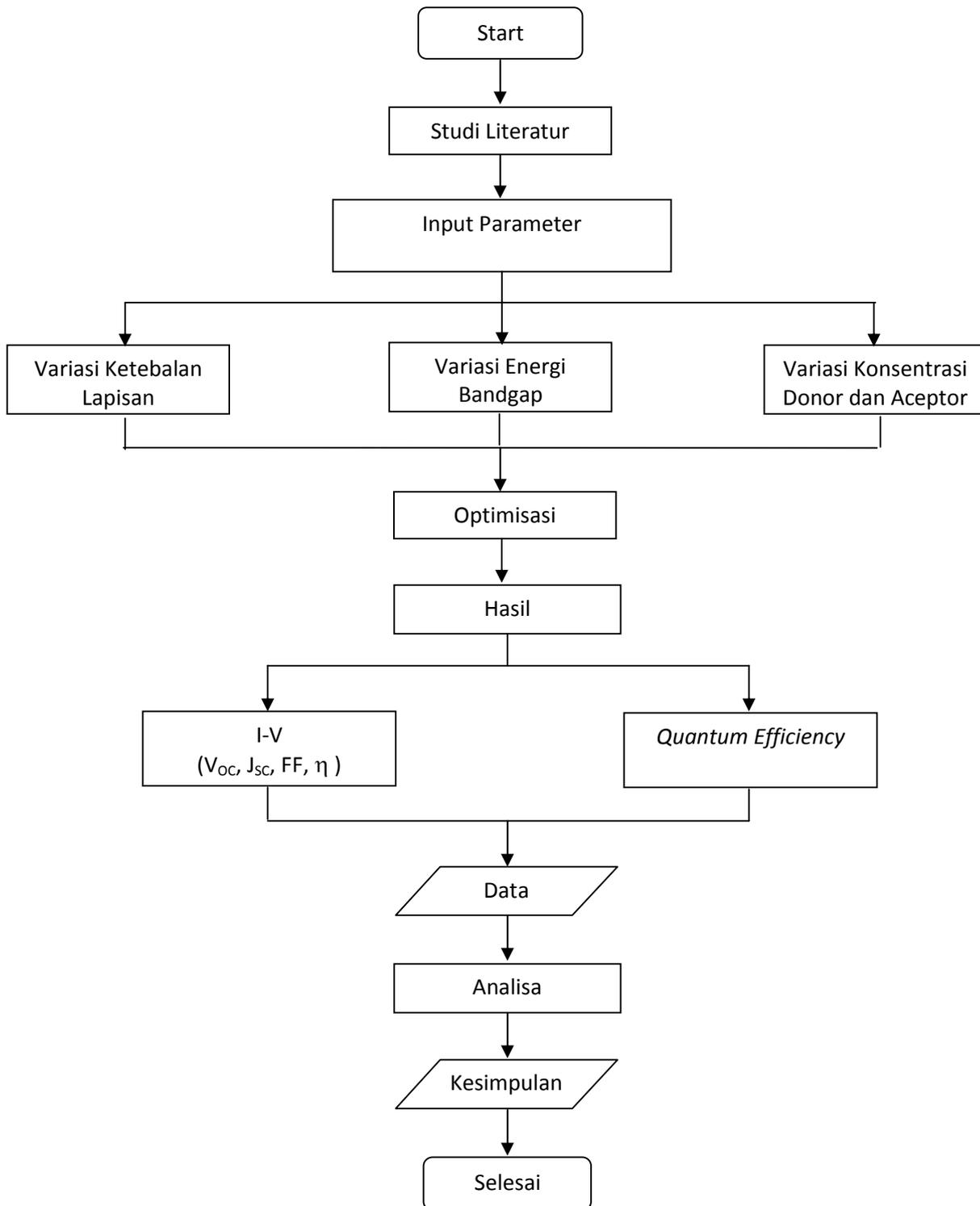
### 3.4 Ringkasan Penelitian

Ringkasan dari parameter-parameter yang di optimisasi terdapat pada tabel 3.5.

Tabel 3. 5 Variasi parameter – parameter simulasi sel surya tipe a-Si:H

No	Variasi	Lapisan		
		n	i	p
1	Ketebalan	5 nm – 50 nm (interval 5 nm )	100 nm – 1000 nm ( interval 100 nm )	5 nm – 50 nm (interval 5 nm )
2	Bandgap	1.6 eV – 2.4 eV (interval 0.1 eV)	1.6 eV – 2.4 eV (interval 0.1 eV)	1.6 eV – 2.4 eV (interval 0.1 eV)
3	Doping	$10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , $10^{21} \text{ cm}^{-3}$	-	$10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , $10^{20} \text{ cm}^{-3}$

### 3.5 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 3 Diagram alir penelitian

## **BAB 4**

### **ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN**

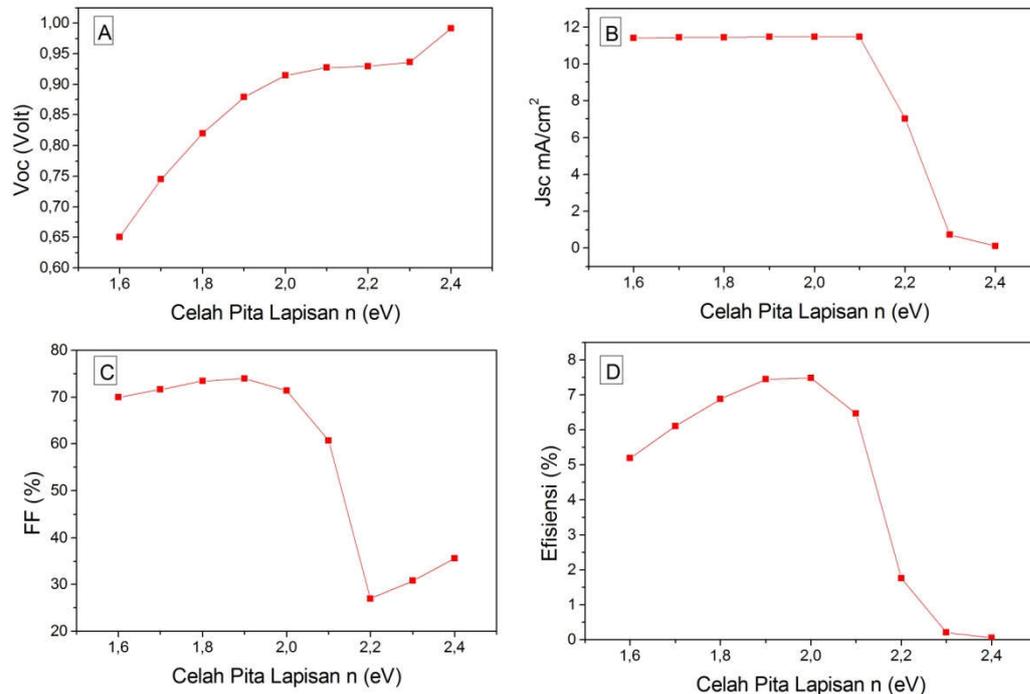
#### **4.1 Optimisasi Celah Pita Energi**

Pada penelitian ini, optimisasi celah pita energi pada tiap – tiap lapisan sel surya p-i-n berbasis a-Si:H untuk mendapatkan hasil yang efisien telah berhasil dilakukan. Pada saat proses optimisasi, celah pita energi dibuat bervariasi dari 1.6 eV – 2.4 eV. Nilai – nilai celah pita energi ini diambil untuk proses simulasi dengan dasar dari penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Dr. Yoyok Cahyono dari Departemen Fisika ITS pada tahun 2012. Hasil penelitian tersebut memperlihatkan bahwa dengan perubahan-perubahan yang dilakukan pada parameter deposisi, di dapatkan hasil celah pita energi pada a-Si:H antara 1.6 eV hingga 2.4 eV. Sementara itu untuk nilai akseptor ( $N_a$ ) dan nilai donor ( $N_d$ ) pada saat optimisasi celah pita energi dibuat tetap masing – masing  $7.47 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  dan  $6.89 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

##### **4.1.1 Optimisasi celah pita energi pada lapisan n**

Celah pita lapisan n memiliki peran yang sangat penting pada saat cahaya masuk ke dalam sel surya. Selama optimisasi celah pita lapisan n, nilai celah pita pada lapisan i dan lapisan p dibuat tetap 1.7 eV dan 2.0 eV. Ketebalan lapisan n, lapisan i dan lapisan p masing-masing 10 nm, 300 nm dan 10 nm. Gambar 4.3a – d menunjukkan variasi tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ), kepadatan arus hubung singkat ( $J_{sc}$ ), faktor pengisian (FF) dan efisiensi ( $\eta$ ) terhadap celah pita lapisan n pada sel surya p-i-n berbasis a-Si:H. Dari Gambar 4.3a dapat dilihat bahwa  $V_{oc}$  mengalami peningkatan pada celah pita lapisan n dari 1,6 eV hingga 2,1 eV, kemudian mengalami saturasi pada kisaran 2.1 eV hingga 2,3 eV dan selanjutnya mengalami peningkatan kembali pada celah pita di atas 2.3 eV. Peningkatan  $V_{oc}$  yang diakibatkan oleh peningkatan celah pita lapisan n dapat dikaitkan dengan pengurangan rekombinasi elektron dan lubang (e-h). Selain itu peningkatan  $V_{oc}$  akibat adanya peningkatan celah pita lapisan n bisa juga terjadi karena adanya pemisahan tingkat energi kuasi-Fermi yang lebih besar. Meskipun  $V_{oc}$  secara umum mengalami peningkatan akibat adanya peningkatan celah pita lapisan n,

namun dari hasil pengamatan pada Gambar 4.3b,  $J_{sc}$  tetap konstan dengan peningkatan celah pita lapisan n dari 1.6 eV hingga 2,1 eV tetapi secara drastis menurun pada celah pita di atas 2.1 eV.



Gambar 4. 1 Variasi (a) Voc, (b)  $J_{sc}$ , (c) FF dan (d) efisiensi pada celah pita p-layer untuk sel surya p-i-n berbasis a-Si:H.

Peningkatan celah pita lapisan n dari 1.6 eV hingga 2.1 eV dapat menyebabkan peningkatan penyerapan foton pada lapisan i yang menghasilkan lebih banyak pasangan e-h, namun nilai  $J_{sc}$  yang tidak mengalami perubahan bisa saja terjadi karena adanya sebagian besar e - h yang bergabung kembali sebelum mengalami pemisahan. Sementara, berkurangnya  $J_{sc}$  dengan adanya peningkatan celah pita lapisan n di atas 2.1 eV bisa terjadi karena adanya kelebihan penyerapan foton yang dapat menimbulkan kehilangan panas (penyerapan hilang). Fill factor (FF) mengikuti tren yang sama seperti yang diamati dalam  $J_{sc}$  dan tetap konstan dengan peningkatan celah pita lapisan n dari 1.6 eV hingga 2.0 eV (gambar 4.1c), namun, secara drastis menurun antara 2.0 eV hingga 2.2 eV, kemudian naik kembali pada celah pita lapisan n di atas 2.2 eV. Nilai maksimum untuk Voc,  $J_{sc}$ , FF untuk variasi celah pita lapisan n masing – masing adalah

991.9 mV,  $11.4 \text{ mA/cm}^{-2}$  dan 74.5%. Pada gambar 4.3d dapat diamati bahwa efisiensi yang di hasilkan dari simulasi dengan variasi celah pita lapisan n menunjukkan tiga jenis perilaku yang berbeda (sama dengan  $I_{sc}$  dan FF). Awalnya efisiensi mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan celah pita lapisan n dari 1.6 eV hingga 1.9 eV, kemudian mengalami saturasi pada celah pita dari 1.9 eV hingga 2.0 eV dan turun secara bertahap dalam rentang celah pita dari 2.0 eV hingga 2.2 eV dan akhirnya mengalami penurunan secara drastis pada celah pita di atas 2.2 eV. Efisiensi maksimum didapatkan sebesar 7.5 % pada celah pita 1.96 eV pada ketebalan lapisan n 10 nm.

Untuk memahami perilaku efisiensi dengan celah pita lapisan n, dapat dijelaskan melalui distribusi flux pada Gambar 2.6. Sinar matahari dengan *flux* yang maksimum terletak pada celah pita energi 1.4 eV – 2.0 eV untuk spektrum merah hingga hijau. Semakin banyak *flux* spektrum sinar matahari yang diterima oleh sel surya, semakin banyak energi foton yang dapat terserap sesuai celah pita energi pada *window layer*. Terlihat bahwa efisiensi sel surya dengan celah pita lapisan n 1.6 eV hingga 1.9 eV memiliki efisiensi yang lebih baik daripada sel surya dengan celah pita yang lain karena adanya pengaruh distribusi foton sinar matahari yang lebih banyak.

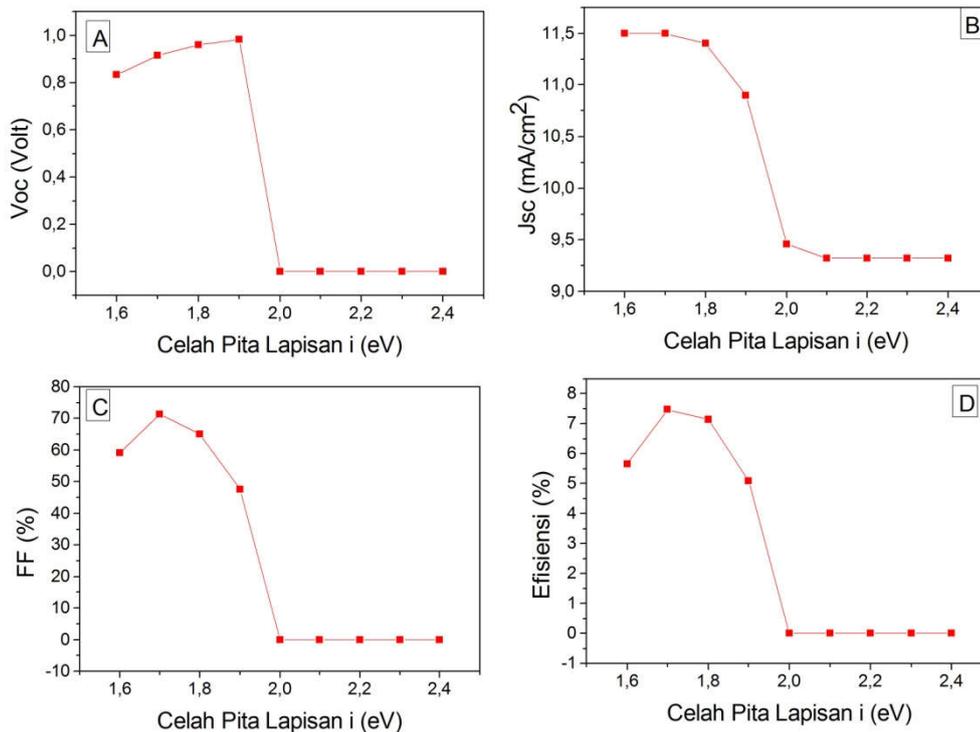
#### 4.1.2 Optimisasi celah pita energi pada lapisan i

Pada sel surya p-i-n, lapisan-i bertindak sebagai lapisan penyerap dan penyerapan cahaya sangat tergantung pada celah pita. Oleh karena itu, optimisasi celah pita lapisan i dilakukan untuk mewujudkan sel surya p-i-n yang efisien. Selama optimisasi celah pita lapisan-i, celah pita lapisan-p dan lapisan n dijaga konstan 2.0 eV. Gambar 4.2 a – d menunjukkan variasi  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , FF dan  $\eta$  dengan celah pita lapisan i. Nilai  $V_{oc}$  mengalami peningkatan dari 832.4 mV menjadi 982.2 mV dengan meningkatnya celah pita lapisan i dari 1.6 eV menjadi 1.9 eV. Sementara untuk celah pita lapisan i di atas 1.9 eV,  $V_{oc}$  mengalami penurunan cukup tajam. Peningkatan  $V_{oc}$  yang diakibatkan oleh peningkatan celah pita lapisan i dapat dikaitkan dengan pengurangan generasi pasangan e-h dan pemisahan yang tepat dari tingkat quasi Fermi karena elektron dan lubang dapat bergerak menuju lapisan masing masing sebelum rekombinasi. Namun celah pita

yang terlalu tinggi juga dapat mengakibatkan penurunan nilai Voc karena adanya kelebihan penyerapan foton yang dapat menimbulkan kehilangan panas.

Pada gambar 4.2b terlihat bahwa nilai Jsc turun landai dari 11.5 mA/cm<sup>2</sup> menjadi 10.9 mA/cm<sup>2</sup> akibat adanya kenaikan celah pita dari 1.6 eV hingga 1.8 eV, kemudian menurun tajam pada celah pita lapisan i di atas 1.8 eV. Penurunan Jsc akibat adanya kenaikan celah pita lapisan i dapat terjadi karena adanya pengurangan penyerapan cahaya sehingga menyebabkan generasi pasangan e-h berkurang. Hal ini dapat dijelaskan berdasarkan interaksi antara energi cahaya matahari ( $h\nu$ ) yang masuk ke dalam material dengan celah pita energi yang dimiliki oleh material tersebut. Ketika  $h\nu < E_g$ , dalam hal ini idealnya tidak ada cahaya yang terserap dalam melalui material, sementara jika  $h\nu = E_g$ , semua cahaya akan terserap dan meningkatkan jumlah pasangan e-h secara maksimal tanpa kehilangan panas, dan ketika  $h\nu > E_g$ , dalam hal ini meskipun cahaya akan terserap tetapi jumlah cahaya yang memiliki energi lebih tinggi dari celah pita material dapat menyebabkan hilangnya panas.

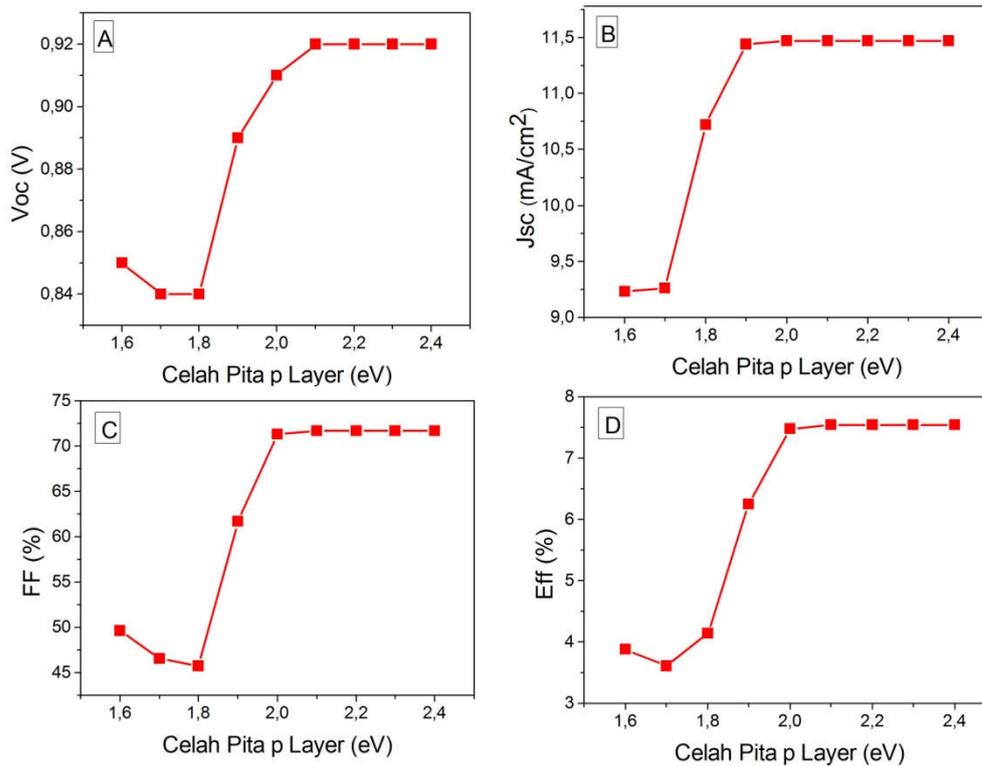
Gambar. 4.2 c dan d menunjukkan variasi FF dan  $\eta$  dengan celah pita lapisan i. Awalnya FF naik dari 59.2% menjadi 71.3% ketika celah pita 1.6 eV hingga 1.7 eV. Namun ketika celah pita di naikkan dari 1.8 eV hingga 2 eV, FF mengalami penurunan signifikan. Efisiensi memiliki pola yang sama dengan FF, awalnya mengalami kenaikan pada celah pita 1.6 eV hingga 1.7 eV kemudian menurun signifikan pada saat celah pita di naikkan di atas 1.8 eV. Efisiensi maksimum diperoleh pada celah pita lapisan i 1.7 eV. Efisiensi yang lebih tinggi Pada celah pita lapisan i dari 1.6 eV menjadi 1.7 eV dapat terjadi karena adanya penyerapan yang ideal pada lapisan i, sementara pada celah pita di atas 1.8 eV, foton yang terserap dalam lapisan-i tidak mencukupi untuk membentuk pasangan e-h sehingga terjadi penurunan efisiensi. Efisiensi adalah produk dari Voc dan Jsc, pada celah pita lapisan i yang rendah Voc yang dihasilkan juga rendah sehingga efisiensi yang diperoleh juga lebih rendah. Di sisi lain pada celah pita lapisan i tinggi (katakanlah 1.8 eV ke atas) Jsc yang dihasilkan kecil, hal ini juga dapat mengakibatkan efisiensi menjadi rendah. Nilai efisiensi maksimum yang di peroleh sebesar 7.5% dengan Voc, Jsc dan FF masing-masing 914.3 mV, 11.5 mA/cm<sup>2</sup> dan 71.3%.



Gambar 4. 2 Variasi (a) Voc, (b) Jsc, (c) FF dan (d) efisiensi pada celah pita i-layer untuk sel surya p-i-n berbasis a-Si:H.

#### 4.1.3 Optimisasi celah pita pada lapisan p

Efisiensi sel surya p-i-n a-Si:H sangat bergantung pada celah pita lapisan n dan lapisan i. Namun, jika lapisan p, i dan n merupakan lapisan tipis, celah pita lapisan p juga dapat mempengaruhi efisiensi sel surya secara signifikan. Selama proses simulasi, celah pita lapisan n dan lapisan i di jaga konstan masing-masing 2.0 eV dan 1.7 eV, sementara untuk celah pita lapisan p bervariasi dari 1.6 eV hingga 2.4 eV. Dari Gambar 4.3 a dapat di lihat bahwa Voc mengalami penurunan dari 846.4 mV menjadi 838.9 mV pada celah pita 1.6 eV menjadi 1.7 eV. Kemudian nilai Voc sedikit mengalami kenaikan menjadi 840 mV pada celah pita 1.8 eV dan naik tajam setelah melewati celah pita 1.8 eV, selanjutnya terjadi saturasi pada celah pita di atas 2.1 eV.



Gambar 4. 3 Variasi (a) Voc, (b) Jsc, (c) FF dan (d) efisiensi pada celah pita p-layer untuk sel surya p-i-n berbasis a-Si:H.

Pada saat energi foton dari cahaya matahari mengenai sel surya, maka energi foton tersebut akan mengenai lapisan n terlebih dahulu, dalam hal ini lapisan n bertindak sebagai window layer. Karena saat simulasi berlangsung nilai celah pita lapisan n di jaga 2.0 eV, maka energi foton yang lebih besar atau sama dengan 2.0 eV akan di serap oleh lapisan n, sementara energi foton yang lebih kecil akan di transmisikan oleh lapisan n ke lapisan selanjutnya yaitu lapisan i. Proses yang sama akan terjadi pada lapisan i, energi foton sebesar 1.7 eV atau lebih besar akan di serap oleh lapisan i sementara energi foton yang lebih kecil akan di transmisikan ke lapisan p. Di lapisan p, sebagian kecil energi foton akan terserap, namun karena ketebalan lapisan p rendah maka sebagian besar dari energi foton akan di transmisikan ke kontak belakang dan di pantulkan kembali ke lapisan p yang selanjutnya akan tertransmisikan ke lapisan i. Kumpulan energi foton yang terserap ini selanjutnya akan membentuk pasangan elektron dan

lubang, kemudian pada persimpangan p-n pasangan elektron dan lubang akan terpisah, dimana elektron akan bergerak ke lapisan p sementara hole akan bergerak ke lapisan n. Aliran elektron dan hole yang telah tereksitasi akan menjadi arus listrik sedangkan beda potensial antara lapisan atas dan lapisan bawah akan menjadi tegangan listrik.

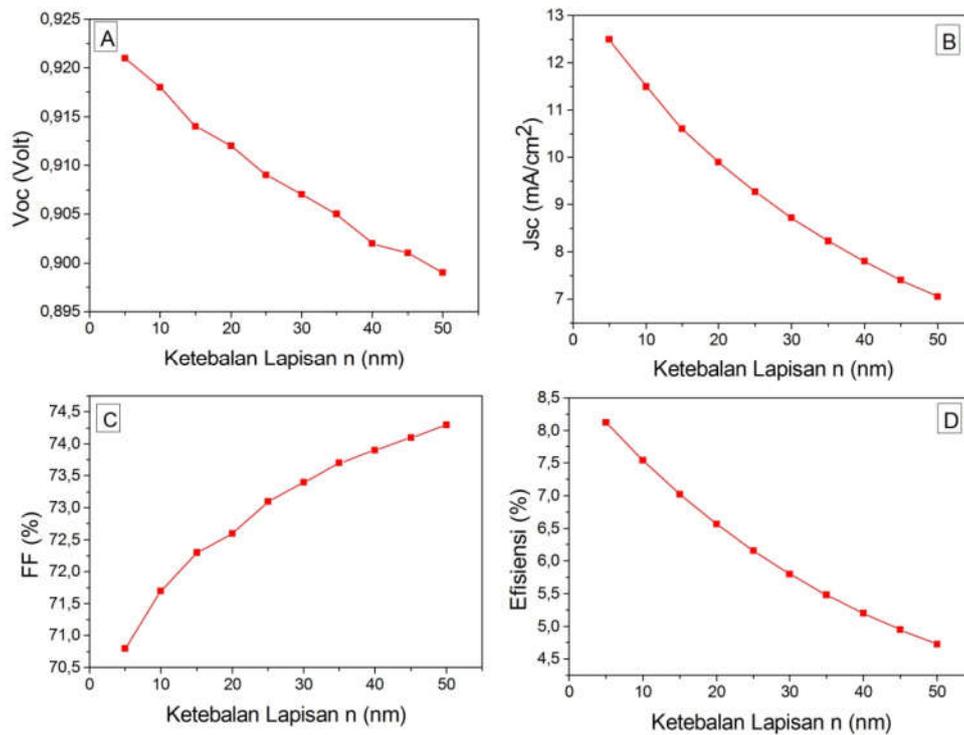
Pada gambar 4.3b diperlihatkan bahwa  $J_{sc}$  tidak mengalami perubahan pada celah pita 1.6 eV hingga 1.7 eV.  $J_{sc}$  mulai mengalami peningkatan yang cukup tajam pada celah pita 1.8 eV hingga 2.0 eV dan mengalami saturasi atau kejenuhan setelah melewati 2.0 eV. Besarnya  $J_{sc}$  pada sel surya tergantung pada banyaknya pasangan elektron hole yang terbentuk yang kemudian mengalami pemisahan di daerah persimpangan p-n (area deplesi). Jika di lihat pada gambar 4.6 a-d, dapat teramati bahwa sel surya a-Si:H p-i-n mengalami nilai optimum pada saat celah pita lapisan p 2.0 eV. Hal ini dapat terjadi karena lapisan p hanya menerima sinar yang di transmisikan oleh lapisan i saja, sementara lapisan i memiliki celah pita 1.7 eV, sehingga foton dengan energi sekitar 1.7 eV dapat terserap dengan baik oleh lapisan i. Selain itu lapisan i di desain memiliki ketebalan yang cukup besar sekitar 300nm sehingga akan banyak foton yang terserap, tidak hanya foton dengan energi 1.7 eV saja namun juga mampu menyerap foton – foton yang masih berdekatan dengan 1.7 eV. Karena celah pita lapisan p yang digunakan saat simulasi 2.0 eV, maka energi foton di bawah 1.7 eV yang di transmisikan dari i-layer akan di transmisikan kembali oleh lapisan p ke lapisan kontak belakang. Kemudian oleh kontak belakang energi foton ini akan di pantulkan kembali ke lapisan p dan selanjutnya akan di transmisikan kembali ke lapisan i. Sementara itu, energi foton di atas 1.7 eV yang telah di transmisikan oleh lapisan i ke lapisan p akan di serap oleh lapisan p kemudian terbentuk pasangan elektron hole di lapisan tersebut. Secara teori sebenarnya lapisan i tidak dapat mentransmisikan foton dengan energi di atas 1.7 eV karena celah pita lapisan i adalah 1.7 eV, namun karena banyaknya foton yang masuk ke lapisan i tidak dapat terserap semua sehingga sebagian di transmisikan ke lapisan p. Pada simulasi dengan variasi celah pita p-layer di dapatkan nilai efisiensi maksimum 7.5% dengan nilai  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$  dan FF masing-masing 916.5 eV, 11.5 mA dan 75%.

## 4.2 Optimisasi Ketebalan Lapisan

Pada bagian ini dilakukan optimisasi ketebalan lapisan dari sel surya p-i-n a-Si:H untuk pengembangan sel surya p-i-n yang lebih efisien. Selama optimisasi ketebalan, nilai celah pita dari lapisan p, lapisan-i dan lapisan-n masing-masing 2.0 eV, 1,7 eV dan 2.0 eV. Na  $7.47 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  dan Nd  $6.89 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Lapisan-n bertindak sebagai window layer. Ketebalan lapisan n bervariasi dari 5 nm hingga 50 nm. Lapisan i di buat lebih tebal karena difungsikan untuk memaksimalkan proses penyerapan cahaya. Ketebalan lapisan i bervariasi dari 100 nm hingga 1000 nm. Sementara lapisan p bertindak sebagai lapisan emitor, ketebalan lapisan p bervariasi dari 5 nm hingga 50 nm. Ketebalan lapisan n dan lapisan p dari 5 nm hingga 50 nm di ambil untuk proses simulasi dengan pertimbangan bahwa kebutuhan ketebalan lapisan n dan lapisan p adalah sekecil mungkin agar tidak mengganggu proses penyerapan cahaya pada lapisan i. Sementara lapisan i di butuhkan ketebalan yang lebih besar agar penyerapan cahaya lebih maksimal. Nilai 100 nm hingga 1000 nm di pilih untuk simulasi karena merujuk dari penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Benigno pada tahun 2017. Penelitian dari Benigno memperlihatkan bahwa Efisiensi sel surya p-i-n yang di akibatkan oleh ketebalan lapisan i mengalami kenaikan seiring dengan kenaikan ketebalan dari 300 nm hingga 500 nm. Data efisiensi yang diperlihatkan masih menunjukkan tren naik dan belum diketahui sampai sejauh mana tren kenaikan tersebut akan berhenti. Dari dasar itulah maka pada simulasi ini di buat ketebalan lapisan i dari 100 nm hingga 1000 nm untuk melihat lebih jauh tren kenaikan dari efisiensi sel surya p-i-n terhadap ketebalan lapisan i.

### 4.2.1 Optimisasi ketebalan lapisan n

Lapisan-n bertindak sebagai window layer yaitu tempat dimana cahaya masuk ke dalam sel. Oleh karena itu, ketebalannya memainkan peran penting dalam penyerapan foton dan generasi pasangan e-h dalam lapisan-i. Selama optimisasi ketebalan lapisan n, masing-masing ketebalan lapisan i dan lapisan p adalah 300 nm dan 10 nm. Nilai minimum ketebalan lapisan n yang digunakan adalah 5 nm, karena secara eksperimen sulit untuk mengontrol ketebalan lapisan di bawah 5 nm selama proses deposisi.



Gambar 4. 4 Variasi (a) Voc, (b) Jsc, (c) FF dan (d) efisiensi pada ketebalan n-layer untuk sel surya p-i-n berbasis a-Si:H.

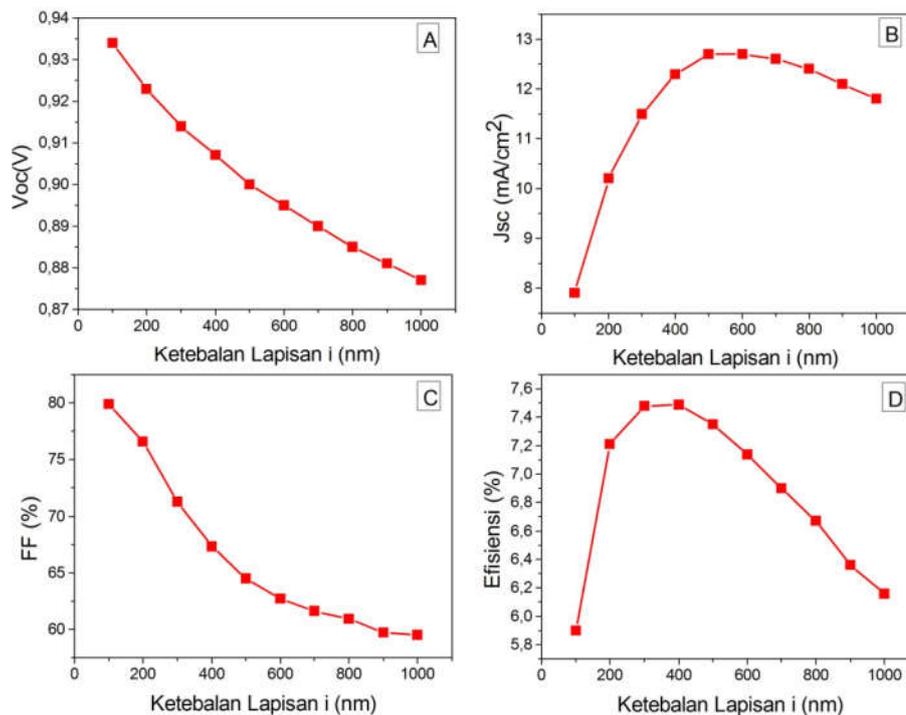
Gambar 4.4a – d menunjukkan variasi Voc, Jsc, FF dan  $\eta$  dengan ketebalan lapisan n. Dari hasil simulasi didapatkan Voc mengalami penurunan dari 915.4 mV menjadi 891.7 mV. Sementara itu Jsc juga mengalami hal yang sama, ditemukan terus menurun dari 12.5 mA / cm<sup>2</sup> menjadi 07.06 mA / cm<sup>2</sup> dengan meningkatnya ketebalan lapisan n dari 5 nm menjadi 50 nm. Jika di lihat dari gambar 4.4a-d terlihat jelas bahwa peningkatan ketebalan lapisan n sangat berpengaruh pada performa dari sel surya. Hal ini dapat terjadi karena peningkatan ketebalan lapisan n akan mengurangi jumlah foton yang di terima oleh lapisan i. Karena lapisan n adalah lapisan yang di fungsikan sebagai jendela tempat masuknya foton, maka semakin tipis lapisan n maka akan semakin banyak foton yang di transmisikan ke lapisan i, yang selanjutnya akan membentuk pasangan elektron dan hole. Semakin banyak pasangan elektron dan hole yang terbentuk akan mengakibatkan semakin tinggi Jsc yang di dihasilkan oleh sel surya. Di sisi lain FF menunjukkan perilaku yang sebaliknya, yakni mengalami kenaikan dari 70% menjadi 74% akibat adanya kenaikan ketebalan lapisan n, akan tetapi

prosentase kenaikannya tidak begitu besar. Nilai  $\eta$  mengikuti tren yang sama seperti yang diamati dalam Voc dan Jsc yaitu menurun dari 8% menjadi 4.7% ketika ketebalan lapisan n meningkat dari 5 nm menjadi 50 nm.  $\eta$  sangat tergantung pada Voc dan Jsc tetapi Jsc memiliki peran lebih dominan terhadap nilai  $\eta$ . Penurunan nilai Jsc dengan meningkatnya ketebalan lapisan n secara dominan menurunkan nilai  $\eta$ . Efisiensi maksimum yang di dapatkan pada simulasi ini adalah 8% dengan nilai Voc, Jsc dan FF masing-masing 915.4 mV, 12.5 mA / cm<sup>2</sup> dan 70%.

#### 4.2.2 Optimisasi ketebalan lapisan i

Pada sel surya a-Si:H, lapisan i bertindak sebagai lapisan penyerap cahaya sehingga celah pita energi dan ketebalan lapisan memiliki peranan yang sangat penting untuk meningkatkan kinerja sel. Pada simulasi ini dilakukan optimisasi ketebalan lapisan-i dengan ketebalan lapisan-p dan lapisan -n sebesar 10 nm. celah pita untuk lapisan -n, lapisan -i dan lapisan p masing -masing 2.0 eV, 1.7 eV dan 2.0 eV dengan konsentrasi doping Na  $7.47 \times 10^{19}$  dan Nd  $6.89 \times 10^{19}$ .

Gambar 4.5a – d menunjukkan variasi Voc, Jsc, FF dan  $\eta$  dengan ketebalan lapisan i. Nilai Voc mengalami penurunan dari 933.7 eV menjadi 876.6 eV pada ketebalan lapisan -i dari 100 nm hingga 1000nm . Di sisi lain, nilai Jsc didapatkan meningkat dari 7.4 mA/cm<sup>2</sup> menjadi 12.6 mA/ m<sup>2</sup> dengan meningkatnya ketebalan lapisan-i dari 100 nm menjadi 500 nm, kemudian mengalami saturasi pada ketebalan 500 nm hingga 600 nm dan mengalami penurunan pada ketebalan lapisan -i di atas 600 nm . Perubahan nilai Jsc yang diakibatkan oleh meningkatnya ketebalan lapisan i sangat besar dan secara dominan mempengaruhi  $\eta$  sel. Hal ini dapat terjadi karena peningkatan ketebalan lapisan dapat meningkatkan penyerapan foton dalam lapisan-i. Hal ini menyebabkan pembentukan sejumlah besar pasangan e-h dan karenanya nilai Jsc yang mengalir melalui sel surya menjadi besar. Nilai  $\eta$  didapatkan meningkat dari 5.9% menjadi 7.5% dengan meningkatnya ketebalan lapisan-i dari 100 nm menjadi 400 nm.



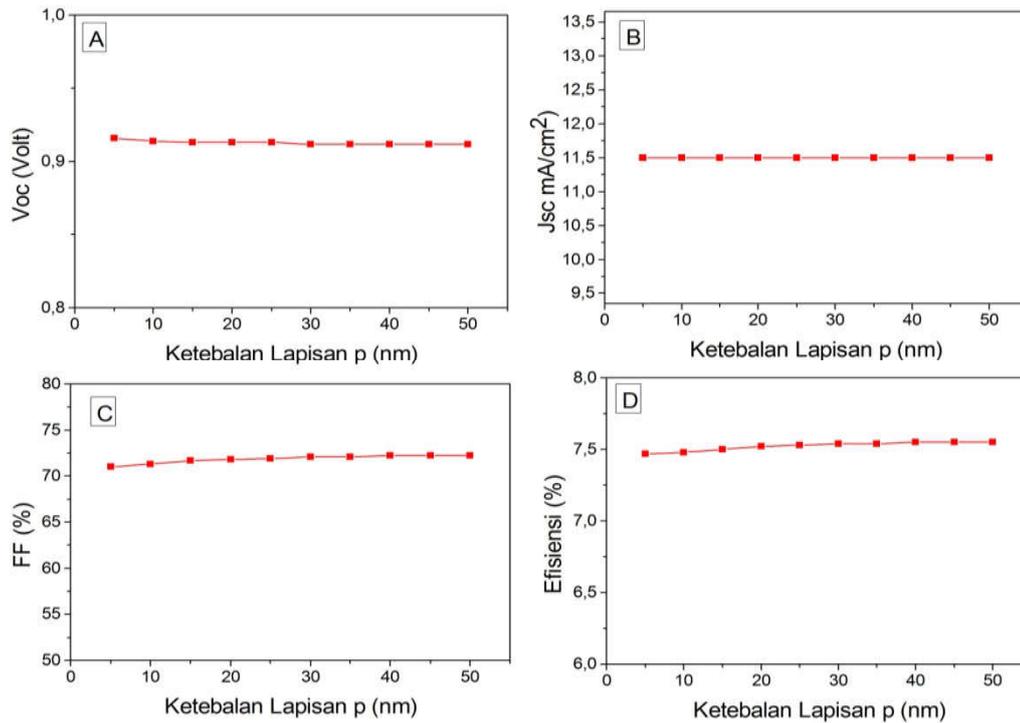
Gambar 4. 5 Variasi (a) Voc, (b) Jsc, (c) FF dan (d) efisiensi pada ketebalan i-layer untuk sel surya p-i-n berbasis a-Si:H.

Berdasarkan hasil pengamatan, efisiensi yang lebih tinggi di dapatkan pada nilai Jsc yang lebih tinggi dengan ketebalan lapisan i yang ideal. Berdasarkan hasil simulasi, dapat dilihat bahwa ketebalan ideal dari lapisan i adalah antara 300 nm hingga 400nm. walaupun ketebalan lapisan dapat meningkatkan penyerapan sinar matahari, namun perlu di ketahui bahwa untuk material amorf, dimana material ini memiliki banyak cacat akibat adanya ikatan menjuntai (dangling bond) maka penyerapan cahaya yang terlalu besar justru akan mengakibatkan material cepat mengalami kerusakan yang berakibat pada menurunnya sifat listrik dan optik dari material tersebut. Hal ini berbeda dengan sel surya p-i-n berbahan  $\mu\text{c-Si:H}$ . Sel surya p-i-n berbahan  $\mu\text{c-Si:H}$  mampu menyerap sinar matahari dengan baik seiring dengan peningkatan ketebalan lapisan i. Berdasarkan penelitian yang dilakuakn oleh Sharma, dkk, efisiensi sel surya mengalami kenaikan cukup besar seiring dengan peningkatan ketebalan lapisan i. bahkan dari hasil penelitian yang telah dilakukan, efisiensi terus mengalami kenaikan hingga ketebalan lapisan i sebesar 2000 nm. (Sharma,dkk.,

2013). Perbedaan sifat yang terjadi antara bahan  $\mu\text{-Si:H}$  dan  $\text{a-Si:H}$  adalah karena adanya perbedaan struktur kristal, dimana pada struktur kristal  $\text{a-Si:H}$  terdapat beberapa persen defect. Dari sini dapat diambil kesimpulan bahwa terjadinya penurunan efisiensi karena adanya peningkatan ketebalan lapisan i pada sel surya berbahan  $\text{a-Si:H}$  adalah karena adanya defect tersebut. Hal ini bisa terjadi karena pada saat terjadi aliran elektron dan hole pada sel surya maka elektron dan hole tersebut banyak yang terjebak di area defect yang mengakibatkan menurunnya arus foton dari sel surya. Terjebak nya elektron dan hole pada area defect mengakibatkan naiknya laju rekombinasi Shockley-Read-Hall dan pada akhirnya dapat menaikkan besarnya laju rekombinasi secara keseluruhan. Perhitungan laju rekombinasi dapat dilihat pada persamaan 2.28.

#### 4.2.3 Optimisasi ketebalan lapisan p

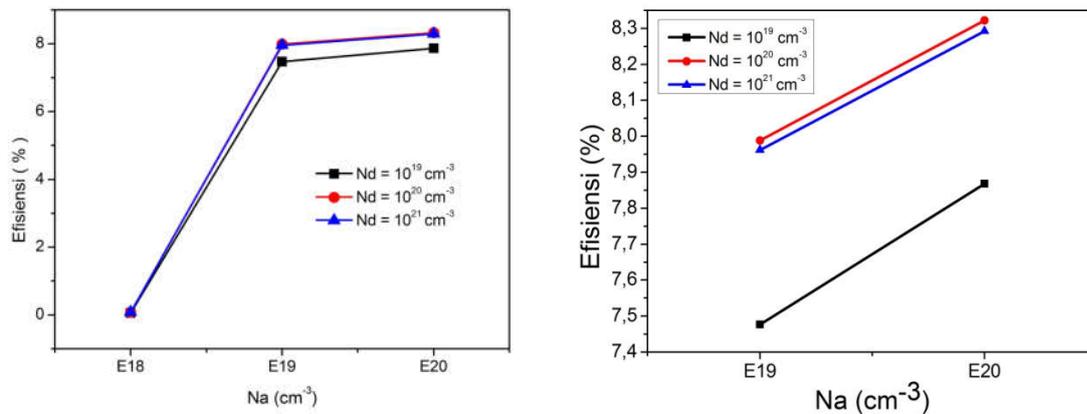
Optimisasi ketebalan lapisan p dilakukan dengan variasi 5 nm hingga 50 nm pada ketebalan lapisan n dan lapisan i masing-masing 10 nm dan 300 nm. Celah pita energi di buat tetap untuk lapisan n, lapisan i dan lapisan p masing-masing 2.0 eV, 1.7 eV dan 2.0 eV dengan  $N_a 7.47 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  dan  $N_d 6.89 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Gambar 4.6a-d memperlihatkan bahwa nilai  $V_{oc}$  mengalami sedikit sekali penurunan dari 916.5 mV menjadi 912.2 mV pada ketebalan lapisan p 5 nm hingga 50 nm. Di sisi lain,  $J_{sc}$  tidak mengalami perubahan sama sekali dengan meningkatnya ketebalan lapisan p,  $J_{sc}$  tetap konstan pada nilai 11.5 mA /  $\text{cm}^2$ . Nilai-nilai FF dan  $\eta$  juga mengikuti tren yang sama seperti yang diamati pada  $J_{sc}$  masing-masing 71% dan 7.5%. Dari hasil pengamatan ini dicatat bahwa ketebalan lapisan -p tidak memiliki efek nyata pada parameter sel surya. Pada sel surya jenis p-i-n dengan penyinaran dari lapisan n, maka lapisan p bertindak sebagai emiter layer dan menjadi lapisan ke tiga setelah lapisan n dan lapisan i. Sebagai lapisan ke tiga tentu tidak banyak foton yang masuk ke dalam lapisan p dan terserap. Hal ini dapat terjadi karena penyerapan secara maksimal sudah terjadi pada lapisan i sehingga sisa foton yang terserap oleh lapisan p tidak banyak. Meskipun lapisan p di buat dengan ketebalan yang besar, namun jika foton yang masuk ke dalam lapisan p hanya sedikit tentu tidak memiliki pengaruh yang berarti untuk peningkatan performa dari sel surya.



Gambar 4. 6 Variasi (a) Voc, (b) Jsc, (c) FF dan (d) efisiensi pada ketebalan p-layer untuk sel surya p-i-n berbasis a-Si:H.

### 4.3 Optimisasi Konsentrasi Pembawa Muatan

Setelah optimisasi celah pita dan ketebalan lapisan, dilakukan pula optimisasi konsentrasi akseptor (Na) dan konsentrasi donor (Nd). Selama optimisasi Na dan Nd, nilai-nilai celah pita p, i, dan n masing-masing 2.0 eV, 1.7 eV dan 2.0 eV. Sementara untuk ketebalan lapisan p, i dan n masing – masing 10 nm, 300 nm dan 10 nm. Dari Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa efisiensi mengalami peningkatan dengan meningkatnya Na dan Nd. Pada Gambar 4.7a dapat dilihat bahwa untuk Na dari  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  hingga  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  dengan Nd  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  terdapat kenaikan efisiensi yang cukup besar dari 0.6% menjadi 7.9%. nilai ini semakin meningkat seiring dengan peningkatan nilai Nd. Efisiensi tertinggi di dapatkan pada saat nilai Na dan Nd  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  sebesar 8.3% (Gambar 4.7b). Untuk mengetahui lebih detail mengenai pengaruh Na dan Nd terhadap efisiensi bisa dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4. 7 (a) Variasi Na dan Nd terhadap efisiensi sel surya p-i-n berbasis a-Si:H. (b) Perbesaran Grafik (a) pada area Na E19 dan Na E20.

Peningkatan efisiensi akibat adanya kenaikan Na dan Nd dapat terjadi karena Na memiliki pengaruh signifikan terhadap pembawa muatan positif pada sel surya lapisan p. Sementara Nd memiliki pengaruh signifikan terhadap pembawa muatan negatif dari lapisan n. Jika pada saat simulasi, nilai Na diperbesar maka artinya jumlah pembawa muatan positif (hole) pada lapisan p juga semakin besar. Dengan cara yang sama jika nilai Nd diperbesar maka jumlah pembawa muatan negatif (elektron bebas) pada lapisan n juga semakin besar. Dari penjelasan ini dimengerti bahwa dengan peningkatan Na maka jumlah hole yang terbentuk pada lapisan p akan semakin banyak, sementara itu peningkatan Nd juga dapat meningkatkan jumlah elektron bebas pada lapisan n, sehingga saat terkena energi foton dari sinar matahari maka akan banyak terjadi eksitasi elektron yang mengakibatkan adanya aliran elektron dan hole yang lebih banyak yang mengakibatkan terjadinya peningkatan arus dan tegangan yang pada akhirnya dapat meningkatkan efisiensi sel surya. Efisiensi sel surya adalah produk dari tegangan dan arus yang dihasilkan oleh sel surya sehingga pada saat tegangan dan arus mengalami kenaikan maka efisiensi juga mengalami kenaikan. Perhitungan nilai efisiensi dapat dilihat pada Persamaan 2.7. Dari hasil simulasi secara keseluruhan di dapatkan nilai maksimum dari efisiensi adalah 8.3 %, pada nilai Voc, Jsc dan FF masing-masing 944.5 mV, 11.4 mA/cm<sup>2</sup> dan 77.3 %. Hasil ini di dapatkan pada nilai celah pita energi lapisan n, i dan p masing – masing 2.0 eV,

1.7 eV dan 2.0 eV. Ketebalan lapisan n, i dan p masing – masing 10 nm, 300 nm, dan 10 nm pada nilai Na dan Nd  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ .

Beberapa peneliti yang pernah melakukan studi yang hampir sama dengan penelitian ini adalah Sharma,dkk dan Benigno. Sharma, dkk pada tahun 2013 telah melakukan simulasi menggunakan perangkat lunak AFORS-HET untuk optimisasi mikrokrystalin silikon terhidrogenasi ( $\mu\text{c-Si:H}$ ). Parameter –parameter yang di optimisasi adalah celah pita energi, ketebalan lapisan dan konsentrasi donor dan aseptor. Nilai celah pita energi sel surya p-i-n  $\mu\text{c-Si:H}$  di optimisasi dari 1.2 eV hingga 1.5 eV untuk semua lapisan p, i dan n. Ketebalan lapisan p di optimisasi dari 5 nm hingga 20 nm, ketebalan lapisan i 400 nm hingga 2000 nm dan ketebalan lapisan n dari 10 nm hingga 50 nm, serta Na dan Nd di optimisasi dari  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  hingga  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . Selama proses optimisasi, parameter – parameter tetap yang digunakan untuk celah pita energi lapisan p, i dan n adalah 1.2 eV. Ketebalan lapisan p, i dan n masing-masing 5 nm, 400 nm dan 30 nm serta nilai Na dan Nd adalah  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

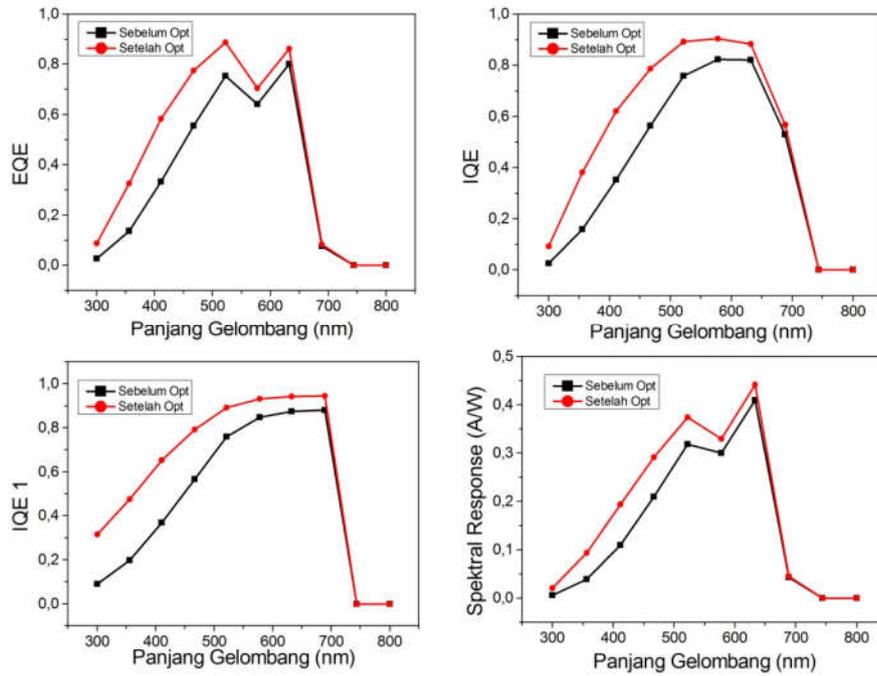
Dari hasil simulasi yang telah dilakukan dapat di lihat bahwa untuk optimisasi pada parameter celah pita energi, efisiensi optimum yang didapatkan berkisar antara 9.6 % hingga 10.3 %. Untuk hasil optimisasi pada ketebalan lapisan, di peroleh hasil efisiensi optimum sebesar 14.6% yang di dapatkan pada ketebalan lapisan i sebesar 2000 nm. Bahkan jika dilihat dari hasil simulasi, tren yang terjadi masih mengalami kenaikan sehingga jika ketebalan lapisan i di tambah mungkin efisiensi masih bisa lebih tinggi lagi. Sementara untuk optimisasi Na dan Nd di dapatkan efisiensi optimum sebesar 17% pada Na dan Nd  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . Hasil-hasil simulasi dari Sharma,dkk tentu lebih baik jika dibandingkan dengan hasil simulasi yang kami lakukan yang hanya mendapat efisiensi sebesar 7.5% - 8.3% . Namun mengingat material yang digunakan oleh Sharma, dkk dalam simulasi ini adalah material kristalin maka menjadi hal yang wajar jika hasil yang didapatkan lebih besar dari bahan a-Si:H yang mana merupakan bahan amorfus. Material kristalin memang memiliki struktur kristal yang lebih baik jika dibandingkan dengan bahan amorfus, selain itu bahan kristalin juga memiliki daya hantar listrik yang lebih baik.

Benigno, pada tahun 2017 telah melakukan eksperimen pembuatan sel surya p-i-n berbahan a-Si:H menggunakan alat PECVD. Parameter-parameter yang di optimisasi pada penelitian ini adalah celah pita energi pada lapisan i dan ketebalan lapisan i. Lapisan i di optimisasi menggunakan celah pita energi sebesar 1.4 eV, 1.6 eV dan 1.9 eV. Sementara ketebalan lapisan i di buat dari 400 nm hingga 600 nm dengan interval 100 nm. Lapisan p dan lapisan n di buat tetap dengan celah pita energi 2.0 eV dan ketebalan lapisan p dan n sebesar 50 nm. Dari hasil eksperimen di perlihatkan bahwa nilai efisiensi optimum untuk optimisasi celah pita energi di dapatkan sebesar 5.6 % , di dapatkan pada celah pita energi lapisan i sebesar 1.6 eV. Sementara untuk efisiensi optimum dari optimisasi ketebalan lapisan i di dapatkan sebesar 5.8% pada ketebalan lapisan i 600 nm. Jika dibandingkan dengan hasil eksperimen dari benigno ini, maka hasil simulasi yang kami lakukan memiliki nilai efisiensi yang lebih besar. Nilai efisiensi yang lebih besar ini di dapatkan pada optimisasi ketebalan lapisan n yang bisa mendapatkan efisiensi sebesar 8.1 %, sementara benigno tidak melakukan optimisasi di lapisan n. Selain itu kami juga melakukan optimisasi pada Na dan Nd yang dapat menghasilkan efisiensi sebesar 8.3%, sementara benigno juga tidak melakukan optimisasi di parameter tersebut.

#### **4.4 Hasil Efisiensi Kuantum**

Pada Gambar 4.8 diperlihatkan hasil dari simulasi sel surya di tinjau dari sifat optik. Dari gambar ini diperlihatkan perbandingan antara sel surya sebelum optimisasi dan setelah optimisasi. Nilai *external quantum efficiencies* (EQE), *internal quantum efficiencies* (IQE), *correction of internal quantum efficiencies* (IQE 1) dan *spektral response* dari sel surya yang telah di optimisasi mengalami kenaikan signifikan dibandingkan sebelum optimisasi. Nilai optimum di dapat pada panjang gelombang antara 500 nm hingga 650 nm. Pola penyerapan cahaya matahari dari sel surya sebelum dan sesudah optimisasi tidak mengalami perubahan, namun pada sel surya yang telah di optimisasi, jumlah cahaya yang terserap pada panjang gelombang 300 nm – 650 (Cahaya tampak) mengalami kenaikan. Dari hasil simulasi di dapatkan efisiensi kuantum mengalami kenaikan dari 55% menjadi 75%, terjadi kenaikan sekitar 20% setelah dilakukan

optimisasi. Kenaikan efisiensi kuantum sebesar 20% dapat meningkatkan efisiensi sel surya dari 3.1 % menjadi 8.3 %.



Gambar 4. 8 Perbandingan hasil sebelum dan sesudah optimisasi untuk (a) EQE, (b) IQE, (c) IQE 1 dan (d) Spektral response pada sel surya p-i-n a-Si:H

*Halaman ini sengaja di kosongkan*

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis data yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa celah pita energi, konsentrasi doping dan ketebalan lapisan memiliki pengaruh terhadap sifat listrik sel surya, dalam hal ini berupa efisiensi yang dihasilkan oleh sel surya. Namun untuk optimisasi ketebalan pada lapisan p, pengaruh terhadap efisiensi tidak terlalu signifikan. Efisiensi tertinggi yang dapat dicapai dari hasil optimisasi adalah 8.3%, di dapatkan pada celah pita lapisan p, i dan n masing-masing 2.0 eV, 1.7 eV dan 2.0 eV pada ketebalan lapisan p, i dan n masing-masing 10 nm, 300 nm dan 10 nm, Na  $7.47 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  dan Nd  $6.89 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . Selain itu di tinjau dari sifat optiknya, terdapat kenaikan jumlah penyerapan cahaya sebesar 20% antara sebelum optimisasi dan setelah dilakukan optimisasi yang terjadi pada panjang gelombang antara 300 nm – 650 nm. Penggunaan parameter celah pita energi dan ketebalan lapisan yang tepat pada saat simulasi dapat mengakibatkan peningkatan serapan energi foton dari sinar matahari sehingga dapat memberikan hasil efisiensi yang lebih maksimal. Selain itu peningkatan konsentrasi donor Nd dan aseptor Na juga dapat meningkatkan pembawa muatan elektron dan hole sehingga pada saat sel surya terkena sinar matahari akan meningkatkan pasangan elektron dan hole yang mengakibatkan peningkatan arus dan tegangan yang pada akhirnya dapat meningkatkan efisiensi sel surya.

#### **5.2 Saran**

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Perlu dilakukan optimisasi lebih lanjut terhadap parameter – parameter yang lainnya untuk mendapatkan efisiensi yang lebih tinggi.
2. Perlu dilakukan eksperimen menggunakan parameter hasil optimisasi untuk verifikasi hasil simulasi.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- Archer, M.D., Hill, (2001), *Clean Electricity from Photovoltaics*, Imperial College Press, UK.
- Benigno, I., (2017), *Pengaruh Optimasi Celah Pita Energi dan Ketebalan Lapisan Tipe -i Pada Efisiensi Sel Surya Silikon Amorf Sambungan P-I-N*, Tesis Magister, Institut Teknologi 10 Nopember, Surabaya.
- Benigno, I., Darminto, D., 2017. Effect of Intrinsic Layer Energy Gap and Thicknesses Optimization on the Efficiency of p-i-n Amorphous Silicon Solar Cell. *IPTEK J. Sci.* 2.
- Castaner, L., Silvestre, S., (2002). *Modelling Photovoltaic Systems using Pspice*. John Wiley & Sons Inc. New York.
- Deng, X., Schiff, E., (2003), "Amorphous Silicone Based Solar Cells" dalam *Hanbook of Photovoltaic Science and Engineering*, eds. Luque, A., dan Hegedus, S., John Wiley & Sons, Chichester, hal 505 - 565.
- Fathi, E., Vygranenko, Y., Vieira, M., Sazonov, A., (2011). "Boron-doped nanocrystalline silicon thin films for solar cells". *Appl. Surf. Sci.* 257, hal. 8901–8905.
- Funde, A.M., Bakr, N.A., Kamble, D.K., Hawaldar, R.R., Amalnerkar, D.P., Jadkar, S.R., (2008). "Influence of hydrogen dilution on structural, electrical and optical properties of hydrogenated nanocrystalline silicon (nc-Si:H) thin films prepared by plasma enhanced chemical vapour deposition (PE-CVD)". *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 92, hal. 1217–1223.
- Hamers, E. a. G., Smets, A.H.M., Smit, C., Hoefnagels, J.P.M., Kessels, W.M.M., Sanden, M.C.M. van de, (2001). "Material properties and growth process of microcrystalline silicon with growth rates in excess of 1 nm/s" . *MRS Online Proc. Libr. Arch.* hal. 664.
- Kim, D.Y., Guijt, E., Si, F.T., Santbergen, R., Holovský, J., Isabella, O., van Swaaij, R.A.C.M.M., Zeman, M., (2015). "Fabrication of double- and triple-junction solar cells with hydrogenated amorphous silicon oxide (a-SiOx:H) top cell. Sol". *Energy Mater. Sol. Cells* 141, hal. 148–153.

- Luque, A., Hegedus, S., (2011). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. John Wiley & Sons. New York.
- Ma, T., Yang, H., Lu, L., (2014). "Solar photovoltaic system modeling and performance prediction". *Renew. Sustain. Energy Rev.* 36, 304–315.
- Marc, Schouten. (2013). *The nanostructure of hydrogenated amorphous silicon, examined by means of thermal annealing and light soaking*, Master of Science Thesis, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, Delft University of Technology. Netherlands
- McIntosh, K., Altermatt, P., Heiser, G., (2000). *Depletion-region recombination in silicon solar cells. When does  $mDR = 2$ ?*, James and James Science Publishers Ltd, London UK.
- Mukhopadhyay, S., Saha, S.C., Ray, S., 2001. "Role of Substrate Temperature on the Properties of Microcrystalline Silicon Thin Films". *Jpn. J. Appl. Phys.* 40, hal 6284.
- Nicolas, S.M. de, (2012). *a-Si: H/c-Si heterojunction solar cells: back side assessment and improvement.*, Thesis Ph.D., Université Paris Sud - Paris XI. Paris.
- Nishioka, K., Sakitani, N., Uraoka, Y., Fuyuki, T., (2007). "Analysis of multicrystalline silicon solar cells by modified 3-diode equivalent circuit model taking leakage current through periphery into consideration". *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 91, hal. 1222–1227.
- Poortmans, J., Arkhipov, V., (2006). *Thin Film Solar Cells: Fabrication, Characterization and Applications*. John Wiley & Sons. UK.
- Pratima Agarwal, H. Povolny, Han, S., X. Deng, (2002). "Study of a-SiGe:H films and n-i-p devices used in high efficiency triple junction solar cells". *Journal of Non-Crystalline Solids.*, Volumes 299–302, Part 2, hal. 1213-1218
- Prayogi, S., (2017). *Fabrikasi Sel Surya Berbasis a-Si:H Lapisan Intrinsik Ganda (P-ix-iy-N) Dengan PECVD dan Analisis Efisiensinya.*, Thesis Magister., Institut Teknologi 10 Nopember., Surabaya.

- Sah, C., Noyce, R.N., Shockley, W., (1957). "Carrier Generation and Recombination in P-N Junctions and P-N Junction Characteristics". *Proc. IRE 45*, hal. 1228–1243.
- Sarkar, N.I., (2016). *Design optimization of a-Si:H p-i-n,  $\mu$ c-Si:H p-i-n, and micromorph tandem PV cell*. Thesis Ph.D., Institute of Energy University of Dhaka. Bangladesh.
- Sharma, M., dkk., (2013)., " Optimization of band gap, thickness and carrier concentrations for the development of efficient microcrystalline silicon solar cells: A theoretical approach" *Solar Energy 97.*, hal. 176-185
- Sriprapha, K., Hongsingthong, A., Krajangsang, T., Inthisang, S., Jaroensathainchok, S., Limmanee, A., Titiroongruang, W., Sritharathikhun, J., (2013). "Development of thin film a-SiO:H/a-Si:H double-junction solar cells and their temperature dependence". *Thin Solid Films*, The proceedings of International Union of the Materials Research Society -International Conference in Asia 2012- IUMRS-ICA 2012 546, hal. 398–403.
- Stangl, R., Froitzheim, A., Kriegel, M., Brammer, T., Kirste, S., Elstner, L., Stiebig, H., Schmidt, M., Fuhs, W., (2004). "Aforshet, a numerical pc-program for simulation of heterojunction solar cells, version 1.1 (open-source on demand)", to be distributed for public use. *Proc 19th PVSEC.*, Paris
- Street, R.A., (1991). *Hydrogenated Amorphous Silicon* by R. A. Street., Cambridge University Press., UK
- Vet, B., Zeman, M., 2010. "Comparison of a-SiC:H and a-SiN:H as candidate materials for a p-i interface layer in a-Si:H p-i-n solar cells". *Energy Procedia.*, Proceedings of Inorganic and Nanostructured Photovoltaics (E-MRS 2009 Symposium B) 2, hal. 227–234.
- Wood, D.L., Tauc, J., (1972), "Weak Absorption Tails in Amorphous Semiconductors", *Phys. Rev. B 5*, hal. 3144–3151.
- Yahya, E., Agung Budiono, Zulkifli, (2003), "Pembuatan Sel Surya Lapisan Tipis a-Si:H Struktur p-i-n dengan *Plasma Enhanced Chemical Vapor*

- Deposition (PECVD)*", *Jurnal Penelitian ITS*, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya.
- Yuan, F., Li, Z., Zhang, T., Miao, W., Zhang, Z., (2014), "Enhanced light absorption of amorphous silicon thin film by substrate control and ion irradiation", *Nanoscale Res. Lett.* 9, hal. 173.
- Yulianto, B., (2017), *Memanen Energi Matahari*, Cetakan pertama, Penerbit ITB, Bandung.
- Zalewski, E.F., Hoyt, C.C., (1991). "Comparison Between Cryogenic Radiometry and the Predicted Quantum Efficiency of pn Silicon Photodiode Light Traps". *Metrologia* 28, 203–206.
- Zheng, X.X., Zhang, X.D., Yang, S.S., Xu, S.Z., Wei, C.C., Sun, J., Geng, X.H., Zhao, Y., 2012a. "Study of a-Si:H/a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H PIN Type Triple Junction Solar Cells in a Single Chamber System". *Phys. Procedia*, Volume 32, 308–313.

## BIOGRAFI PENULIS



Penulis mempunyai nama lengkap Ahmad Sholih, biasa disapa Sholih, lahir pada tanggal 15 Juli 1981 di Pati, Jawa Tengah. Penulis memulai pendidikan formal di Madrasah Ibtidaiyah (MI) Tanjung Sekar. Pendidikan dilanjutkan di SMPN 1 Pucak Wangi dan SMUN 1 Pati. Pada tahun 2001 penulis melanjutkan pendidikannya melalui studi kuliah Jurusan Fisika di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam ITS Surabaya. Setelah lulus pada tahun 2005, penulis sempat bekerja di PT. PURA GROUP kudu sebagai Staff Research and Development (R&D) dari tahun 2006 hingga tahun 2010. Pada bulan April tahun 2010 hingga sekarang, penulis bekerja di Departemen Fisika Fakultas Sains ITS Surabaya sebagai Staff Laboratorium. Sembari bekerja sebagai staff laboratorium di ITS, penulis juga mengambil studi master di Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS pada tahun 2016. Penulis menyelesaikan penelitian tesis di bidang sel surya dan berhasil lulus dengan gelar master pada bulan Maret tahun 2020.