



TESIS - SF142502

**PENGARUH OPTIMASI CELAH PITA ENERGI DAN
KETEBALAN LAPISAN TIPE-i PADA EFISIENSI SEL
SURYA SILIKON AMORF SAMBUNGAN p-i-n**

IGNATIO BENIGNO

1115 201 008

DOSEN PEMBIMBING

Prof. Dr. Darminto, M.Sc

PROGRAM MAGISTER

BIDANG KEAHLIAN FISIKA MATERIAL

PROGRAM STUDI FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2017



TESIS - SF142502

**PENGARUH OPTIMASI CELAH PITA ENERGI DAN
KETEBALAN LAPISAN TIPE-i PADA EFISIENSI SEL
SURYA SILIKON AMORF SAMBUNGAN p-i-n**

IGNATIO BENIGNO

1115 201 008

DOSEN PEMBIMBING

Prof. Dr. Darminto, M.Sc

PROGRAM MAGISTER

BIDANG KEAHLIAN FISIKA MATERIAL

PROGRAM STUDI FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2017

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



TESIS - SF142502

**EFFECT OF INTRINSIC LAYER ENERGY GAP AND
THICKNESSES OPTIMIZATION ON THE EFFICIENCY
OF p-i-n AMORPHOUS SILICON SOLAR CELL**

IGNATIO BENIGNO

1115 201 008

SUPERVISOR

Prof. Dr. Darminto, M.Sc

MAGISTER PROGRAM

STUDY ON MATERIAL PHYSICS

DEPARTMENT OF PHYSICS

FACULTY MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCES

INSTITUTE OF TECHNOLOGY SEPULUH NOVEMBER SURABAYA

2017

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Sains (M.Si)
di
Institut Teknologi Sepuluh November**

**oleh:
Ignatio Benigno
NRP. 1115 201 008**

**Tanggal Ujian : 8 Juni 2017
Periode Wisuda : September 2017**

Disetujui oleh :

- | | | |
|--|---------------------|---|
| 1. Prof. Darminto, M.Sc.
NIP. 19600303.198701.1.002 | (Pembimbing) | () |
| 2. Dr. Mochamad Zainuri, M.Si.
NIP. 19640130.199002.1.001 | (Penguji) | () |
| 3. Dr. Malik Anjelh Baqiya, M.Si.
NIP. 19821020.200812.1.003 | (Penguji) | () |

**Dekan Fakultas MIPA
Institut Teknologi Sepuluh November**



Prof. Dr. Basuki Widodo, M.Sc.
NIP. 19650605.198903.1.002

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PENGARUH OPTIMASI CELAH PITA ENERGI DAN KETEBALAN LAPISAN TIPE-*i* PADA EFISIENSI SEL SURYA SILIKON AMORF SAMBUNGAN *p-i-n*

Nama : Ignatio Benigno
NRP : 1115201008
Pembimbing : Prof. Dr. Darminto, M.Sc.

ABSTRAK

Sel surya silikon amorf dengan struktur *p-i-n* telah berhasil difabrikasi diatas permukaan kaca yang terlapisi oleh ITO dengan ukuran 10 cm². Proses fabrikasi menggunakan Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) pada frekuensi 13,56 MHz. Aliran gas hidrogen pada proses deposisi diketahui sebagai faktor pasifasi kecacatan pada ikatan atom Silikon. Dalam penyusunan sel surya *p-i-n*, faktor celah pita energi sangat menentukan peforma sel surya dalam mengabsorpsi energi foton sinar matahari. Pada proses deposisi lapisan intrinsik, kelajuan gas SiH₄ diatur tetap pada 2,5 sccm sedangkan variasi dilakukan pada parameter pelarutan gas hidrogen 0 sccm – 90 sccm untuk memperoleh celah pita energi yang tepat serta peforma sel surya yang stabil. Celah pita energi yang dimiliki oleh lapisan tipe-*p* dan tipe-*n* adalah 2,0 eV dan 2,2 eV pada ketebalan berturut-turut 64 nm dan 36 nm. Optimasi dilakukan pada lapisan intrinsik dengan variasi celah pita energi 1,4 eV, 1,6 eV, dan 1,9 eV pada ketebalan 400 nm. Efisiensi sel surya yang dihasilkan meningkat dari 4,8% hingga 5,61% berdasarkan variasi celah pita energi. Optimasi ketebalan pada penelitian ini dilakukan pada lapisan intrinsik dengan variasi ketebalan 400 nm, 500 nm dan 600 nm. Variasi ketebalan yang berbeda menunjukkan adanya peningkatan efisiensi sel surya hinga 5,78%.

Kata Kunci : sel surya silikon amorf, celah pita energi, efisiensi, ketebalan

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

EFFECT OF INTRINSIC LAYER ENERGY GAP AND THICKNESSES OPTIMIZATION ON THE EFFICIENCY OF p-i-n AMORPHOUS SILICON SOLAR CELL

By : Ignatio Benigno
Student Identity Number : 1115201008
Supervisor : Prof. Dr. Darminto, M.Sc.

ABSTRACT

Amorphous silicon solar cells with single p-i-n layer were grown on 10 cm² ITO coated glass substrates. Fabrication process done by using 13,56 MHz RF-Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD). Hydrogen flow on the deposition process is widely known to enable the passivation of the dangling bond on Silicon bonds. The passivation of dangling bond affects the band gap of each layer and cell performance in the absorption of photon. In the deposition process of intrinsic layer, SiH₄ gas flow is set constant at 2.5 sccm, while variation is done in hydrogen gas flow at 0 sccm – 90 sccm. Energy gaps obtained for p-layer and n-layer are 2.0 eV and 2.2 eV at thickness 64 nm and 36 nm respectively. Optimizations have been done for intrinsic layer which band gaps are 1.4 eV, 1.6 eV and 1.9 eV at thickness 400 nm. The solar cell efficiency was increased from 4.8% to 5.64% based on the band gaps variety. In addition, i-layer thicknesses were also varied from 400 nm, 500 nm and 600 nm. Thicknesses variation shows an increase of 5.78% in the solar cell efficiency.

Key Words: amorphous silicon solar cell, energy gap, efficiency, thicknesses

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur dan terimakasih atas karunia yang dilimpahkan oleh Tuhan Yang Maha Kuasa sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis dengan judul *“Pengaruh Optimasi Celah Pita Energi dan Ketebalan Lapisan Tipe-i Pada Efisiensi Sel Surya Silikon Amorf Sambungan p-i-n”*. Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat kelulusan dan pencapaian gelar Magister Fisika (M.Si) pada Program Pascasarjana Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Institut Teknologi Sepuluh November (ITS) Surabaya. Penyusunan tesis ini juga tidak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak selama proses penyelesaiannya, untuk itu dengan segenap hati penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Kedua orang tua dan saudara yang telah menyemangati, mendukung dan memberikan doa agar tesis dapat terselesaikan dengan baik dan tepat waktu.
2. Bapak Prof. Dr. Darminto, M.Sc., selaku dosen pembimbing dan dosen wali yang telah memandu penelitian dari awal hingga laporan terselesaikan.
3. Bapak Yoyok Cahyono, M.Si selaku dosen dalam tim sel surya yang telah mensupport tim selama proses deposisi dilakukan
4. Bapak Akidah selaku operator PECVD yang telah menyisihkan waktu dan kesempatan untuk membantu tim sel surya pada proses deposisi.
5. Tim Sel Surya Fisika ITS yang telah bersama-sama meneliti tiap lapisan pada sel surya ini,
6. Bapak Dr. Moch Zainuri dan Dr. Malik Anjelh Baqiya selaku penguji yang telah memberikan saran dan masukan pada tesis.
7. Bapak Prof. Ir. Eddy Yahya selaku ketua program studi Pascasarjana Fisika dan dosen Semikonduktor yang telah memberikan ilmu mendalam pada bidang sel surya.
8. Seluruh dosen Fisika ITS yang telah mendidik dan memberikan ilmu pada penulis.

9. Prof. Sugimin W.W dan seluruh tim dosen Pendidikan Fisika Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya yang telah menyemangati, mendukung dan memberikan ilmu fisika pada penulis.
10. Melania Rahajeng Purwaningsih yang telah setia menyemangati dan mendukung penulis agar menyelesaikan penelitian dan tesis tepat waktu.
11. Semua pihak yang tidak dapat ditulis satu persatu pada penyelesaian penelitian dan tesis.

Penulis berterimakasih dan bersyukur untuk segala bantuan yang diberikan. Semoga semua kebaikan diterima oleh Tuhan Yang Maha Kuasa dan mendapatkan balasan dari-Nya. Diakhir kata penulis berharap semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi penelitian selanjutnya, saran dan masukan diharapkan agar tesis ini dapat menjadi lebih baik dan berguna bagi sesama.

Surabaya, Mei 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Sel Surya Silikon Amorf	5
2.2 Silikon Amorf Terhidrogenasi	6
2.3 Konduktivitas Lapisan Tipis a-Si:H	7
2.4 Celah Pita Energi Lapisan Tipis	9
2.5 Rapat Keadaan Elektronik	10
2.6 Sel Surya	11
2.6.1 Sel Surya Hubungan p-i-n Tunggal	12
2.6.2 Fabrikasi Lapisan p-i-n Sel Surya	13
2.6.3 Perlakuan Gas Hidrogen	15
2.6.4 Efek Staebler-Wronski	16
2.6.5 Uji Efisiensi dan Karakteristik I-V	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Alat dan Bahan Penelitian.....	21
3.1.1 Alat Penelitian	21

3.1.2 Bahan Penelitian	21
3.2 Prosedur Penelitian.....	21
3.2.1 Preparasi Substrat	21
3.2.2 Deposisi Lapisan p-i-n	22
3.2.3 Karakterisasi Lapisan	23
3.2.4 Pelapisan Ohmik Kontak	25
3.2.5 Karakterisasi I-V	26
3.3 Jadwal Penelitian.....	27
3.4 Diagram Alir Penelitian.....	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	29
4.1 Fabrikasi Sel Surya Silikon Amorfo Terhidrogenasi	29
4.2 Analisa Optimasi Celah Pita Energi Lapisan Intrinsik	33
4.3 Analisa Optimasi Tebal Lapisan Intrinsik	39
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	43
5.1 Kesimpulan	43
5.2 Saran	43
DAFTAR PUSTAKA	45
LAMPIRAN.....	47
BIOGRAFI PENULIS	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kurva efisiensi terhadap (a) band gap dan (b) rentang pita energi cahaya tampak	5
Gambar 2.1 Model struktur atom dari (a) silikon Kristal tunggal dan (b) silikon amorf terhidrogenasi.....	6
Gambar 2.3 Ilustrasi proses konduksi pada semikonduktor tipe-n	8
Gambar 2.4 Pengukuran resistivitas dengan probe 4-titik	8
Gambar 2.5 Skema diagram Tauc's Plot pada lapisan tipis Silikon Amorf	10
Gambar 2.6 Rapat keadaan elektronik $g(E)$ dalam silikon amorf	11
Gambar 2.7 (a) Skema hubungan p-n sel surya silikon ; (b) Diagram pita energi hubungan p-n sel surya dibawah sinar matahari	12
Gambar 2.8 Skema susunan dari hubungan p-i-n tunggal sel surya silikon	12
Gambar 2.9 Skema donasi dan aliran elektron serta hole	13
Gambar 2.10 Parameter kontrol deposisi pada alat PECVD	14
Gambar 2.11 Metode fabrikasi struktur p-i-n dengan PECVD	15
Gambar 2.12 Efek perlakuan hidrogen terhadap kemampuan transmisi	15
Gambar 2.13 Parameter dan performa sel surya berdasarkan rasio dilusi H_2	16
Gambar 2.14 Degradasi dari <i>fill factor</i> pada lapisan intrinsik yang berbeda sebagai akibat dari efek Staebler-Wronski	17
Gambar 2.15 Proses stabilisasi ESW melalui garis transmisi daya yang berlangsung selama 2 tahun	17
Gambar 2.16 Rangkaian ideal sel surya	18
Gambar 3.1 Proses terbentuknya plasma pada saat deposisi lapisan tipe-p	22
Gambar 3.2 Diagram variabel proses deposisi lapisan p-i-n pada PECVD	23
Gambar 3.3 <i>Atomic Force Microscopy</i> N8-NEOS	22
Gambar 3.4 Alat GENESYS UV-VIS Spectrometer	24
Gambar 3.5 Pengukuran konduktivitas dengan Probe 4-titik lapisan tipis	25
Gambar 3.6 Ilustrasi proses difusi kontak ohmik pada permukaan lapisan	26
Gambar 3.7 Skema rangkaian pengujian efisiensi dan karakteristik i-v	27
Gambar 3.8 Diagram alir penelitian sel surya	28
Gambar 4.1 Grafik celah pita energi terhadap laju hidrogen lapisan intrinsik	30
Gambar 4.2 Penurunan celah pita energi untuk rasio H_2/SiH_4 yang tinggi	31
Gambar 4.3 Kapasitas aliran foton spektrum matahari sebagai fungsi E-gap	32

Gambar 4.4 Sel surya a-Si:H dengan struktur p-i-n hasil deposisi PECVD	32
Gambar 4.5 Grafik karakteristik i-v sel surya dalam analisa efisiensi	33
Gambar 4.6 Grafik celah pita energi terhadap tegangan V_{oc} tiap sampel	35
Gambar 4.7 Grafik performa sel surya (a) efisiensi terhadap celah pita energi dan (b) <i>Fill factor</i> terhadap celah pita energi	35
Gambar 4.8 Grafik peningkatan efisiensi sel surya terhadap celah pita energi lapisan intrinsik	36
Gambar 4.9 Penurunan rapat keadaan dan celah pita terlarang (<i>defect</i>) terjadi pada silikon amorf a-Si:H dengan pelarutan hidrogen	37
Gambar 4.10 (a) Atom-atom Si berikatan dengan atom H dan (b) Jembatan hidrogen yang terbentuk karena pelarutan hidrogen yang tinggi	38
Gambar 4.11 Ilustrasi foton yang terjebak diantara lapisan yang disebabkan oleh penumbuhan permukaan lapisan yang tidak rata	39
Gambar 4.12 Peningkatan performa (a) rangkaian tegangan terbuka, (b) rapat arus singkat dan (c) efisiensi sel surya terhadap variasi ketebalan lapisan intrinsik	40
Gambar 4.13 Pelebaran daerah deplesi dan peningkatan pembawa muatan minoritas sel surya dengan ketebalan lapisan tipe-i (a) 400 nm; (b) 500 nm; (c) 600 nm	41
Gambar 4.14 Karakteristik performa sel surya p-i-n sebagai fungsi dari ketebalan lapisan a-Si:H tipe-i	42

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Jadwal Rencana Kegiatan	27
Tabel 4.1 Parameter deposisi sel surya untuk tiap lapisan	29
Tabel 4.2 Hasil karakteristik laju deposisi, tebal dan celah pita energi	30
Tabel 4.3 Struktur sampel berdasarkan celah pita energi dan peforma sel	34
Tabel 4.4 Peforma sel surya berdasarkan variasi ketebalan lapisan tipe-i	39

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumentasi Penelitian	47
Lampiran 2 Uji Karakteristik I-V	48
Lampiran 3 Uji Laju Deposisi dan Celah Pita Energi Lapisan Tipe-p	53
Lampiran 4 Uji Laju Deposisi dan Celah Pita Energi Lapisan Tipe-n	55
Lampiran 5 Uji Celah Pita Energi Lapisan Tipe-i	57
Lampiran 6 Uji Konduktivitas Lapisan p-i-n	58

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penelitian mengenai energi terbarukan atau yang kadang disebut sebagai *renewable energy sources* serta meningkatnya polusi yang disebabkan oleh penggunaan bahan bakar mengundang perhatian banyak ilmuwan untuk meneliti sumber energi dan teknologi seperti turbin angin, *biofuel*, reaktor nuklir, turbin gelombang, serta sel surya untuk membangkitkan listrik dengan biaya yang terjangkau. Sel surya banyak dipilih sebagai fokus dalam penelitian karena aman, biaya produksi yang rendah, sifat optikal dan elektrikal yang baik serta menjanjikan sebagai sumber energi alternatif di masa depan (Sharma et al., 2016).

Penelitian yang sering dilakukan yaitu berkaitan dengan sel surya silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) karena dapat difabrikasi pada banyak jenis substrat (Shin et al., 2013). Proses fabrikasi secara umum menggunakan *Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition* (PECVD) yang dapat dengan mudah menjalankan proses hidrogenasi serta proses doping yang merata pada permukaan. Parameter deposisi PECVD yang digunakan juga memiliki variasi yang sangat luas dan dapat mempengaruhi karakteristik optikal dan elektronik dari silikon amorf. Metode fabrikasi melalui PECVD banyak digunakan oleh industri berskala besar karena dapat memproduksi lapisan sel surya dalam kuota yang banyak dan sesuai kebutuhan. Proses deposisi melalui alat PECVD memiliki keuntungan tersendiri (Hajjiah et al., 2016). Keuntungan tersebut diantaranya :

1. Kemampuan penumbuhan lapisan dengan parameter yang berbeda pada proses yang sama
2. Tidak ada kecenderungan kerusakan fisik pada kristal saat deposisi
3. Tidak memerlukan perlakuan khusus setelah proses selesai seperti membuang dopan yang berlebih atau menurunkan temperatur
4. Proses penumbuhan kristal berlangsung pada proses yang lebih rendah apabila dibandingkan dengan teknik yang lain

Proses penumbuhan kristal pada PECVD memiliki banyak variabel yang dapat mempengaruhi ketebalan serta kualitas lapisan sel surya, diantaranya : temperatur substrat, tekanan, laju aliran gas, daya plasma, serta sumber gas. Untuk memperoleh efisiensi yang baik, sel surya dengan hubungan p-i-n memerlukan optimasi tersendiri untuk tiap tipe lapisan. Salah satu faktor yang mempengaruhi adalah ketebalan lapisan sel itu sendiri. Ketebalan lapisan tersebut memainkan peran yang penting dalam menentukan celah pita energi, yang akan menentukan seberapa banyak energi spektrum foton yang dapat terabsorpsi oleh sel. Sebagian besar dari radiasi sinar matahari yang sampai ke bumi memiliki panjang gelombang dengan energi yang hampir sama dengan celah pita energi silikon, yaitu sekitar 1,4 – 1,8 eV. Energi yang dengan rentang yang hampir sama akan terabsorpsi oleh sel surya, tetapi yang lebih tinggi hanya akan terkonversi menjadi panas. Sebagai konsekuensinya, apabila celah pita energi tidak terkontrol maka sel surya akan memiliki efisiensi yang rendah.

Karakteristik lapisan sel surya yang telah dideposisi akan mempengaruhi hasil keluaran dalam pengukuran efisiensi, yang secara umum bergantung pada rapat arus rangkaian pendek (J_{sc}), tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), dan *fill factor* (FF). Salah satu lapisan yang berperan penting dalam proses absorpsi energi foton pada modul sel surya adalah lapisan intrinsik dimana sebagian besar energi foton akan terabsorpsi serta terjadi proses generasi elektron dan hole.

Dalam penelitian terdahulu yang telah dilakukan (Suprianto, 2012), fabrikasi sel surya silikon amorf dengan hubungan p-i-n tunggal memiliki rata-rata efisiensi 2,7%. Dalam penelitian optimasi efisiensi yang telah dilakukan (Sharma et al., 2016b) pada sel surya silikon mikrokristal, diperoleh efisiensi sel surya yang optimum dengan efisiensi 9%-12% dengan variasi celah pita energi ~1,5 eV untuk tipe-p, ~1,4 eV untuk tipe-i, dan ~1,5 eV untuk tipe-n. Ketebalan optimum yang diperoleh dalam data berkisar ~10 nm untuk tipe-p, ~2000 nm untuk tipe-i, dan ~300 nm untuk tipe-n. Parameter diatas juga tidak lepas dari variasi perlakuan gas hidrogen saat proses deposisi dimulai. Dalam penelitian Chen (Chen et al., 2016) perlakuan rasio gas hidrogen yang berbeda menghasilkan efisiensi yang berbeda pula, diperoleh efisiensi 6,6% untuk rasio hidrogen 30 dan efisiensi 8,6% untuk rasio hidrogen 20.

Berdasarkan deskripsi diatas, maka dalam penelitian ini akan dilakukan optimasi parameter dalam deposisi PECVD untuk lapisan intrinsik pada sel surya silikon amorf dengan hubungan p-i-n tunggal. Optimasi tersebut akan mempengaruhi variasi ketebalan dan celah pita energi lapisan, sehingga diharapkan akan memperoleh konduktivitas serta efisiensi sel surya silikon amorf yang optimal.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan permasalahan yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh parameter deposisi terhadap ketebalan dan celah pita energi lapisan tipe-i yang dideposisi dengan menggunakan PECVD?
2. Bagaimana pengaruh variasi ketebalan dan celah pita energi lapisan tipe-i terhadap efisiensi sel surya?

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh parameter deposisi terhadap ketebalan dan celah pita energi lapisan tipe-i yang dideposisi dengan menggunakan PECVD
2. Mengetahui pengaruh variasi ketebalan dan celah pita energi lapisan tipe-i terhadap efisiensi sel surya

Manfaat dari penelitian ini adalah :

Lapisan sel surya tipe-i dideposisi dengan variasi parameter deposisi pada PECVD. Melalui karakterisasi ketebalan dan celah pita energi, pada penelitian ini diharapkan akan diperoleh efisiensi sel surya yang optimum untuk hubungan p-i-n tunggal. Penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi pertimbangan peneliti selanjutnya dalam penentuan parameter deposisi PECVD di Institut Teknologi Sepuluh November (ITS) Surabaya.

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini, permasalahan dibatasi pada :

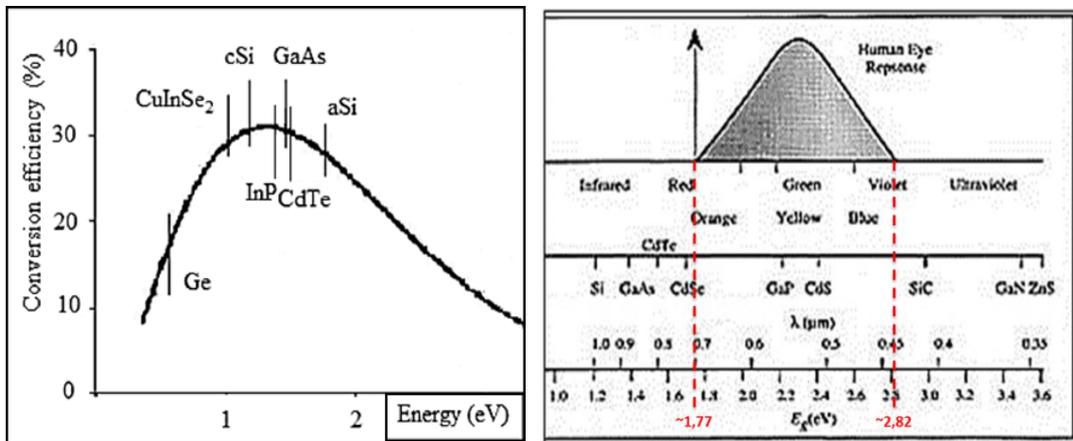
1. Sel surya yang digunakan pada penelitian adalah sel surya silikon amorf terhidrogenasi a-Si:H dengan hubungan p-i-n tunggal.

2. Lapisan tipe p-i-n dideposisi dengan menggunakan PECVD dan tumbuh diatas substrat kaca ITO dengan ukuran $10 \times 10 \text{ cm}^2$.
3. Penelitian difokuskan untuk mengetahui pengaruh variasi ketebalan dan energi band-gap lapisan intrinsik terhadap efisiensi sel surya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sel Surya Silikon Amorf

Silikon amorf merupakan bahan penelitian yang digunakan hampir pada setiap teknologi yang menggunakan lapisan tipis. Pada saat ini efisiensi yang diperoleh pada modul *photovoltaic* (PV) berkisar antara 6-8% untuk suatu modul berbasis p-i-n tunggal silikon amorf (a-Si) (McEvoy et al., 2011). Kemajuan dalam penelitian sel surya dipengaruhi salah satunya adalah peningkatan performa dari modul silikon amorf (a-Si). Celah pita energi (energi gap) yang dimiliki oleh silikon amorf berkisar 1.8 eV dimana angka tersebut berada pada rentang efisiensi energi cahaya matahari. Dari gambar 2.1 dapat dilihat kurva efisiensi terhadap energi gap semikonduktor. Efisiensi yang dapat diperoleh untuk suatu silikon solar sel ideal (a-Si) mendekati 30% sehingga material ini dapat dianggap sangat cocok sebagai bahan pembuatan sel surya (Dzhafarov, 2013).

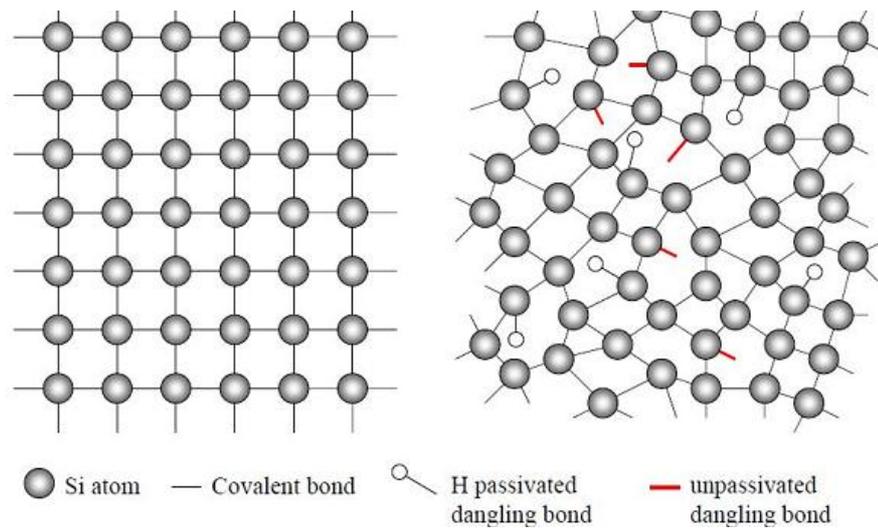


Gambar 2.1 (a) Kurva efisiensi bergantung terhadap band gap semikonduktor (Dzhafarov, 2013) dan (b) rentang pita energi cahaya tampak

Sumber (b) : <http://www.globalspec.com/reference/77500/203279/html-head-chapter-5-light-absorption-and-emission>

2.2 Silikon Amorf Terhidrogenasi

Silikon amorf terhidrogenasi sebagai lapisan tipis dalam modul sel surya dapat difabrikasi pada deposisi temperatur rendah PECVD ($<1000^{\circ}\text{C}$). Silikon amorf terhidrogenasi disimbolkan sebagai a-Si:H dimana “H” mengindikasikan “hidrogenasi”.



Gambar 2.2 Model struktur atom dari (a) silikon kristal tunggal (b) silikon amorf terhidrogenasi (Poortmans dan Arkhipov, 2006)

.Acuan penting yang membedakan silikon amorf dengan struktur lainnya adalah ketidakteraturan pada struktur atom (*disorder atomic structure*). Pada gambar 2.2 (a) tiap atom silikon berikatan secara kovalen dengan 4 atom Silikon yang lain dengan sudut dan panjang yang sama. Dalam struktur atomik, maka bilangan koordinasi untuk Silikon atom adalah 4 pada suatu Silikon kristal tunggal. Gambar 2.2 (b) menunjukkan bahwa struktur a-Si:H tidak menunjukkan keteraturan struktur jangkauan panjang (*long range order*) dan strukturnya terlihat acak (*continuous random network*). Namun dapat dilihat pada struktur a-Si:H bahwa atom silikon berikatan secara kovalen dengan 4 atom Silikon lainnya, sehingga dalam jangkauan pendek (*short range order*) a-Si:H memiliki keteraturan seperti silikon kristal tunggal (Poortmans dan Arkhipov, 2006).

Ketidakteraturan variasi pada sudut ikatan dan panjang ikatan diantara atom a-Si:H akan menyebabkan ikatan yang lemah. Energi dari ikatan yang lemah lebih tinggi dari energi optimal Silikon kristal tunggal sehingga apabila atom

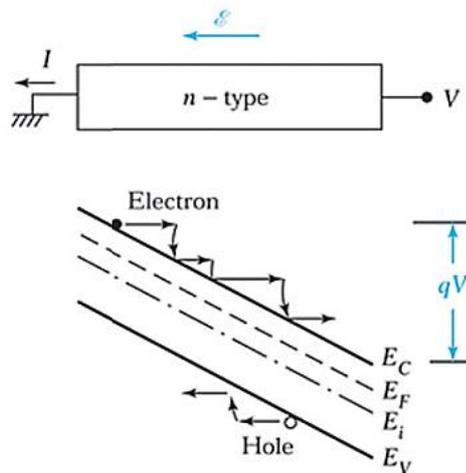
menerima sejumlah energi tertentu maka akan dapat menyebabkan adanya kecacatan kristal pada jaringan atom. Kecacatan tersebut dapat berupa *dangling bonds* pada energi gap yang terbentuk dimana atom Silikon hanya memiliki ikatan dengan 3 atom silikon lain dan memiliki elektron yang tidak berikatan.

Dalam Gambar 2.2(b) terdapat ikatan kosong yang dapat dipasifkan dengan cara mengikatkan atom Hidrogen pada atom Silikon sehingga struktur tersebut dinamakan silikon amorf terhidrogenasi (*hydrogenated silicon amorf*). Dengan adanya ikatan antara atom Hidrogen dengan Silikon maka rapat keadaan terlokalisasi akan menurun mencapai orde $10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ (Takahashi dan Konagai, 1986).

2.3 Konduktivitas Lapisan Tipis a-Si:H

Pada suatu bahan semikonduktor yang homogen, konduktivitas semikonduktor tidak lepas dari mobilitas elektron dan hole. Gambar 2.3 menunjukkan pita diagram tipe-n ketika tegangan bias diaplikasikan pada terminal kanan sehingga medan listrik E mengalir ke kiri. Dengan adanya medan listrik maka elektron akan berakselerasi tanpa kehilangan energi totalnya.

Ketika energi total tidak berubah pada saat proses akselerasi, electron akan kehilangan energi potensialnya, dan akan meningkatkan energi kinetiknya sebagai akibat dari kekekalan energi. Hal ini sesuai dengan fakta bahwa lintasan elektron membawa elektron pada jarak tertentu diatas pita konduksi. Saat elektron mengalami tumbukan maka elektron akan kehilangan energi kinetiknya dan akan terkonversi menjadi panas. Setelah elektron kehilangan energi kinetiknya maka elektron akan mulai berakselerasi kembali dan proses tersebut berulang terus menerus (Grove, 1967).



Gambar 2.3 Ilustrasi proses konduksi pada semikonduktor tipe-n (Grove, 1967)

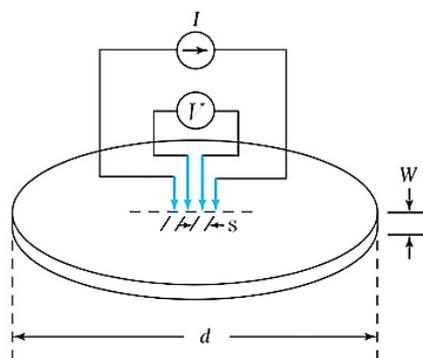
Metode pengukuran konduktivitas lapisan tipis yang sering digunakan adalah probe 4-titik (*four-point probe*) seperti pada Gambar 2.4. Jarak diantara probe diatur sehingga berada pada jarak s . Arus lemah I mengalir dari sumber yang konstan menuju dua probe bagian luar (*outer*) dan tegangan V terukur diantara dua probe bagian dalam (*inner*). Untuk semikonduktor lapisan tipis dengan ketebalan W maka resistivitas dapat dihitung dengan :

$$\rho = \frac{V \cdot W \cdot CF}{I} \quad \Omega \text{ cm} \quad (2.1)$$

untuk sampel dengan perbandingan lebar yang lebih besar dari jarak antar probe, maka persamaan diatas menjadi :

$$\rho = \frac{V}{I} \frac{\pi}{\ln 2} W \cdot CF \left(\frac{W}{s} \right) \quad \Omega \text{ cm} \quad (2.2)$$

dengan $CF \left(\frac{W}{s} \right)$ adalah faktor koreksi pengukuran probe 4-titik. Nilai faktor koreksi terlampir.



Gambar 2.4 Pengukuran resistivitas dengan probe 4-titik (Sze dan Lee, 2012).

2.4 Celah Pita Energi Lapisan Tipis

Untuk menentukan celah pita energi (*energy gap*) lapisan tipis silikon amorf yang telah dideposisi, maka metode yang umum untuk digunakan adalah metode Tauc Plot (Wood dan Tauc, 1972). Persamaan yang digunakan adalah :

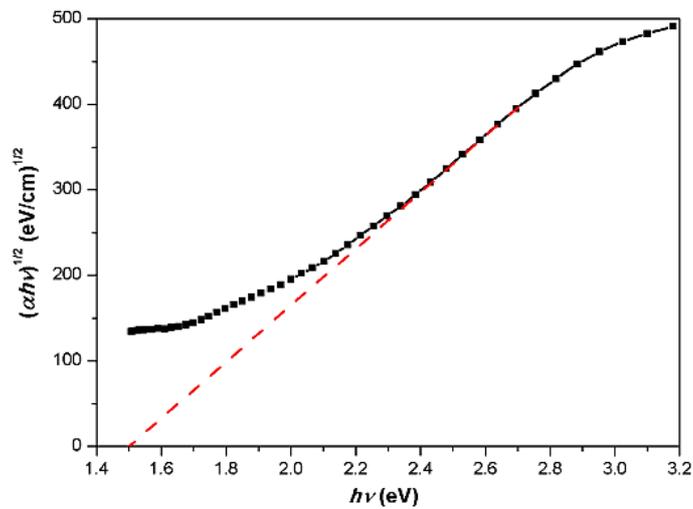
$$(\alpha hv)^n = A (hv - E_g) \quad (2.3)$$

$$\alpha = -\frac{\ln(T)}{d} \quad (2.4)$$

dalam hal ini α 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, hv adalah energi foton, A adalah konstanta, n adalah $\frac{1}{2}$ untuk material dengan pita *indirect*, dan E_g adalah energi gap.

Dengan mencari garis linear pada bagian kurva $(\alpha hv)^{1/2} - hv$ dan menariknya sehingga berpotongan pada sumbu-X, maka titik perpotongan tersebut dapat dianggap sebagai energi gap lapisan tipis tersebut. Gambar 2.5 adalah contoh salah satu pengukuran energi gap lapisan tipis Silikon amorf 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.

Penurunan celah pita energi akan diiringi dengan peningkatan tingkat absorpsi lapisan. Lapisan tipis hanya dapat menyerap foton dengan energi yang lebih tinggi dari energi gapnya, sedangkan foton dengan energi yang lebih rendah dipantulkan. Oleh sebab itu, celah pita energi lapisan merupakan parameter yang penting pada aspek absorpsi dan transmitansi yang dapat mempengaruhi efisiensi sel surya dari energi sinar matahari yang masuk kedalam lapisan.



Gambar 2.5 Skema diagram Tauc Plot pada film tipis Silikon Amorf (Yuan et al., 2014).

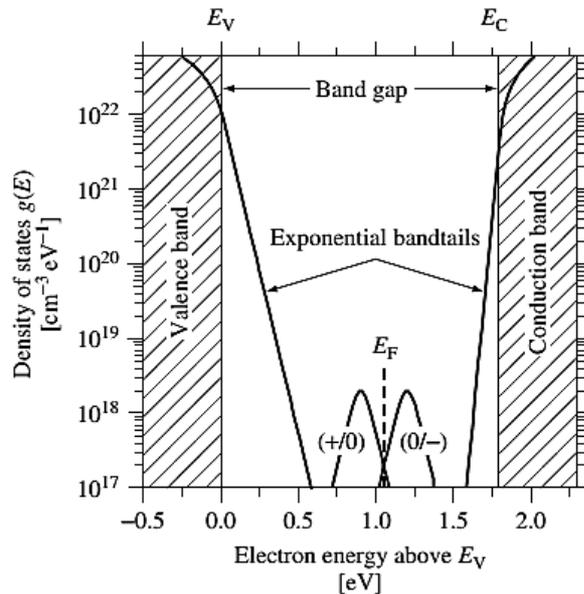
2.5 Rapat Keadaan Elektronik

Rapat keadaan elektronik $g(E)$ digunakan untuk mempelajari lebih dalam mengenai sifat elektronik dan optikal semikonduktor. Rapat keadaan elektronik dalam semikonduktor menggunakan suatu pendekatan, yaitu jika sebuah elektron diberikan pada suatu zat padat maka hal tersebut dipandang sebagai pemenuhan dari orbital molekul pada suatu tingkat energi E . Dalam rentang energi ΔE , jumlah keadaan per unit volume dari zat padat adalah $g(E) \Delta E$ (Deng dan Schiff, 2003).

Gambar 2.6 adalah ilustrasi dari rapat keadaan elektronik untuk Silikon amorf terhidrogenasi yang diperoleh dari pengukuran emisi elektron, absorpsi optik, mobilitas hole dan elektron. Pada keadaan gelap dibawah suhu yang rendah, tingkat keadaan dibawah tingkat energi Fermi dipenuhi oleh elektron sedangkan tingkat energi diatas energi Fermi kosong. Terdapat dua tingkat keadaan yang terilustrasikan, yaitu pada pita energi valensi yang penuh ($E < E_v$) yang berasal dari ikatan orbital Si-Si dan Si-H, dan pada pita konduksi yang tidak terpenuhi ($E > E_c$) yang berasal dari orbital yang tidak berikatan (*antibonding orbital*).

Area yang diarsir pada Gambar 2.6 menunjukkan keadaan yang tidak terlokalisasi pada pita, pita tersebut memiliki ekor (tails) dari keadaan terlokalisasi dengan distribusi eksponensial. Pada bagian tengah diantara pita valensi dan konduksi adalah tingkat keadaan dimana kecacatan kristal seperti dangling bond

atom Silikon. Bagian kecacatan tersebut ditunjukkan oleh dua puncak disekitar energi Fermi E_F .

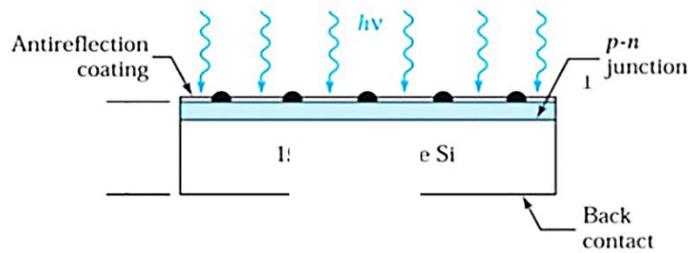


Gambar 2.6 Rapat keadaan elektronik $g(E)$ dalam Silikon amorf terhidrogenasi (Deng dan Schiff, 2003).

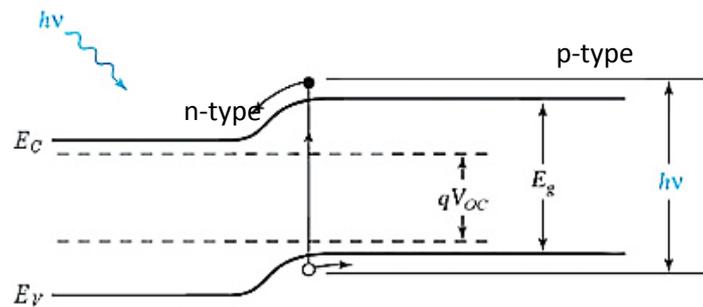
2.6 Sel Surya

Pada dasarnya sel surya merupakan hubungan semikonduktor p-n dimana akan terjadi aliran listrik apabila dihubungkan. Pada gambar 2.7 (a), sel surya terdiri dari semikonduktor p-n, kontak ohmik pada bagian depan dan belakang serta pelapis antirefleksi. Sel surya tersebut kemudian disambungkan pada rangkaian ideal melalui kontak ohmik yang ada pada bagian atas dan bawah.

Saat sel surya berada dibawah sinar matahari seperti pada gambar 2.7(b), maka foton dengan energi kurang dari energi gap (E_g) tidak dapat menciptakan elektron dan hole saat proses generasi berlangsung sehingga tidak memberikan output pada sistem sel surya. Foton dengan energi yang sama dengan energi gap E_g akan memberikan energi pada elektron surya sebesar E_g untuk berpindah ke pita konduksi. Sedangkan energi foton yang lebih besar dari E_g hanya akan berubah menjadi panas (Sze dan Lee, 2012).



(a)

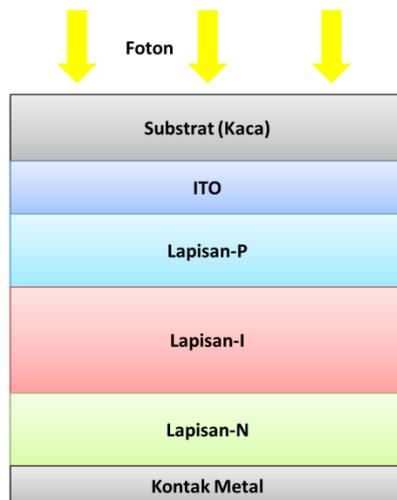


(b)

Gambar 2.7 (a) Skema dari hubungan p-n sel surya silikon (b) Diagram pita energi dari hubungan p-n sel surya dibawah sinar matahari (Sze dan Lee, 2012).

2.6.1 Sel Surya Hubungan p-i-n tunggal

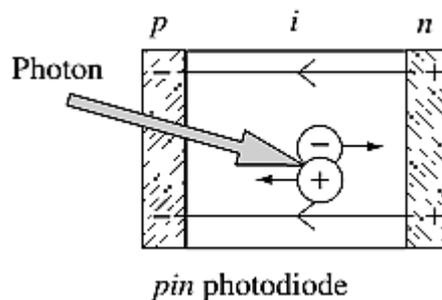
Silikon hubungan p-i-n seperti pada Gambar 2.8 memiliki perbedaan struktur dengan silikon hubungan p-n yang terletak pada lapisan intrinsik yang berada diantara lapisan-p dan lapisan-n. Lapisan intrinsik yang ada berfungsi sebagai daerah deplesi diantara lapisan-p dan lapisan-n serta menutupi kekurangan dari silikon dengan hubungan p-n yang memiliki lebar celah deplesi yang sempit.



Gambar 2.8 Skema susunan dari hubungan p-i-n tunggal sel surya silikon

Tiga lapisan yang ada pada hubungan p-i-n adalah lapisan-p yang sangat tipis (sekitar 20nm), lapisan intrinsik yang lebih tebal, serta lapisan-n yang sangat tipis. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9, elektron yang berlebih berasal dari donasi lapisan-n terhadap lapisan-p dan menimbulkan medan listrik *built-in* yang ukurannya lebih dari 10^4 V/cm (Deng dan Schiff, 2003).

Cahaya matahari berupa foton akan masuk pertama-tama melalui kontak depan berupa konduktor oksida yang bersifat transparan yang dilapiskan di atas bahan gelas (ITO). Foton kemudian jatuh pada lapisan-p yang sangat tipis dan transparan sehingga dapat disebut “*window layer*”. Setelah melalui lapisan muka, jumlah foton yang mencapai lapisan-i akan maksimum karena lapisan-p yang tipis. Foton sinar matahari hampir terabsorpsi seluruhnya pada bagian lapisan intrinsik yang tebal. Foton yang terabsorpsi akan menciptakan satu elektron dan hole (*generate processes*) yang akan bergerak ke sisi-n dan sisi-p melalui pita konduksi dan pita valensi (Gambar 2.7 (b) dan Gambar 2.9). Pergerakan tersebut terjadi karena pengaruh tegangan built-in dan menyebabkan aliran arus listrik yang lebih besar pada rangkaian.



Gambar 2.9 Skema donasi kelebihan elektron dan aliran elektron serta hole setelah proses generasi.

2.6.2 Fabrikasi Lapisan p-i-n Sel Surya

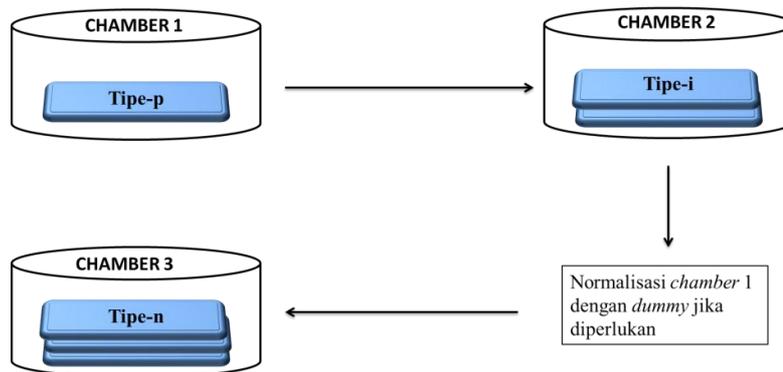
Fabrikasi lapisan p-i-n sel surya secara umum dilakukan dengan menggunakan alat *Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition* (PECVD) seperti pada Gambar 2.10. Melalui teknik PECVD, maka peneliti dapat menentukan secara bebas parameter deposisi seperti distribusi hidrogen dan laju gas yang dapat mempengaruhi sifat optikal dan kelistrikan lapisan sehingga memperoleh hasil yang optimal.

Tahap pertama 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 SiH_4 dan H_2 . Pembuatan struktur lapisan tipe-p dilakukan dengan mengalirkan gas SiH_4 , B_2H_6 , dan CH_4 sedangkan lapisan tipe-n dilakukan dengan menggunakan gas SiH_4 dan PH_3 .

Gambar 2.11 menunjukkan diagram proses deposisi yang terjadi di dalam PECVD. 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-p dengan waktu deposisi tertentu. 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-n. 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).



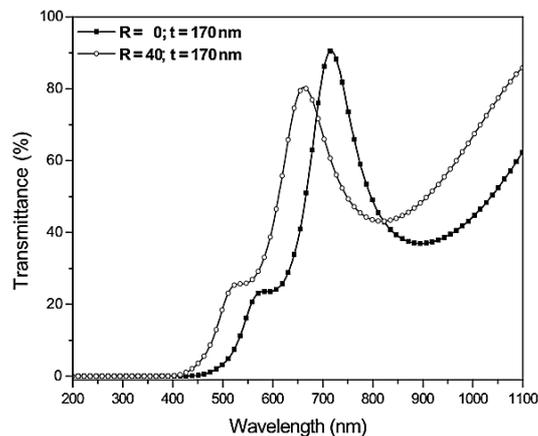
Gambar 2.10 Parameter kontrol deposisi pada alat PECVD.



Gambar 2.11 Metode fabrikasi struktur p-i-n dengan PECVD.

2.6.3 Perlakuan Gas Hidrogen

Parameter gas hidrogen saat proses deposisi sangatlah penting diperhatikan. Perlakuan gas hidrogen dalam proses deposisi dinyatakan dengan rasio perbandingan antara gas hidrogen dengan gas silan, $R = H_2/SiH_4$. Selain dapat menurunkan tingkat *dangling bond*, teknik deposisi dengan perlakuan gas hidrogen dilakukan agar mendapatkan lapisan dengan sifat transmitansi yang baik untuk rentang panjang gelombang cahaya tampak seperti yang disajikan pada Gambar 2.12 (Prušáková et al., 2010).

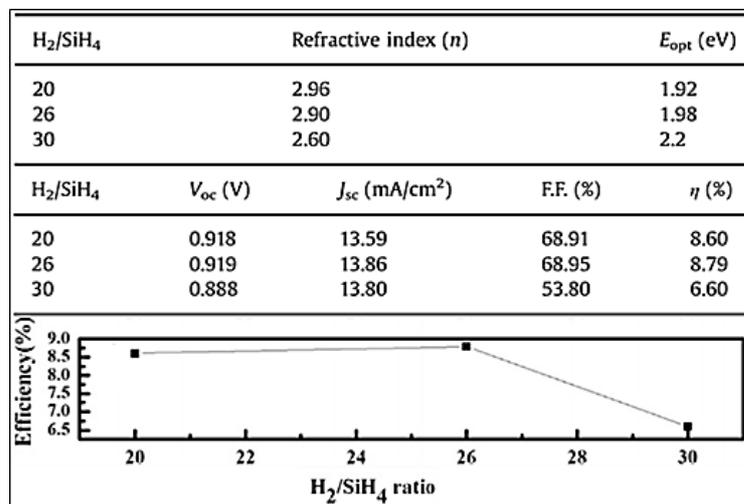


Gambar 2.12 Efek perlakuan hidrogen pada lapisan terhadap kemampuan tranmitansi (Prusakova et al., 2010)

Perlakuan gas hidrogen pada proses deposisi beserta efeknya juga dilaporkan oleh Yu-Hung Chen (Chen et al., 2016). Dalam penelitiannya tentang silicon mikrokristal, Chen melaporkan bahwa perbedaan rasio antara gas hidrogen dengan gas silan memberikan perbedaan yang signifikan pada celah pita energi

(E_{opt}), tegangan terbuka (V_{oc}), rapat arus pendek rangkaian (J_{sc}), fill factor (FF), dan efisiensi sel surya itu sendiri (η).

Dari hasil penelitian di Gambar 2.13, tampak bahwa perbandingan rasio gas hidrogen dengan gas silan mencapai titik optimum pada angka 26 dengan energi gap 1,98 eV. Nilai angka rasio dilusi hidrogen yang lebih tinggi akan mengakibatkan penurunan nilai tegangan terbuka disertai dengan penurunan efisiensi sel surya itu sendiri. Oleh karena itu perbandingan rasio perlakuan gas hidrogen saat proses deposisi serta energi gap dari tiap lapisan penyusun sel surya perlu diperhatikan agar tercipta sel surya dengan efisiensi yang optimum.



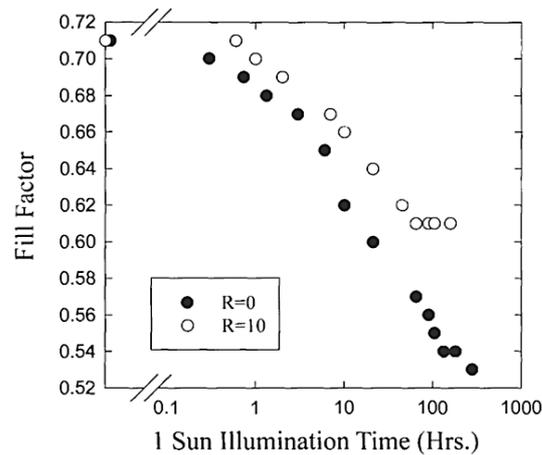
Gambar 2.13 Parameter dan performa sel surya berdasarkan rasio dilusi gas H_2 (Chen et al., 2016)

2.6.4 Efek Staebler-Wronski

Salah satu permasalahan yang terdapat dalam rangkaian PV adalah efek menurunnya tingkat induksi cahaya pada sel surya silikon amorf. Gejala tersebut pertama kali diamati oleh Staebler dan Wronski pada tahun 1977 (Staebler dan Wronski, 1977). Gejala yang diamati adalah menurunnya konduktifitas maupun efisiensi awal sel surya dalam selang waktu tertentu hingga tercipta kondisi yang stabil.

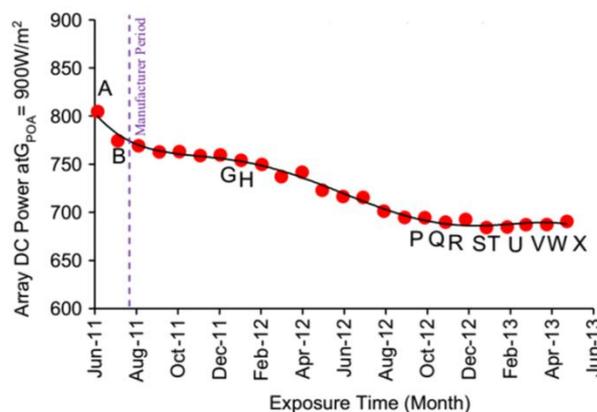
Efek Staebler-Wronski (ESW) tersebut tidaklah lepas dari adanya kehadiran hidrogen sebagai pemain utama dalam pasifasi *dangling bonds* silikon amorf. Peningkatan kualitas sel surya pada ESW ditunjukkan pada Gambar 2.14,

dimana pada kedua sampel terjadi penurunan fill factor sebagai akibat dari degradasi cahaya pada lapisan intrinsik. Tampak bahwa lapisan dengan pencairan hidrogen ($R=10$) memiliki degradasi cahaya yang lebih baik dibandingkan dengan lapisan intrinsik tanpa pencairan hidrogen (Carlson dan Wronski, 2003).



Gambar 2.14 Degradasi dari *fill factor* pada lapisan intrinsik yang berbeda sebagai akibat dari efek Staebler-Wronski (Carlson dan Wronski, 2003)

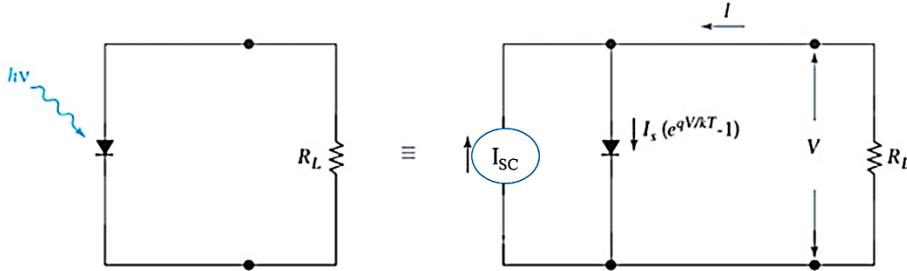
Studi terkait proses stabilisasi ESW melalui garis transisi daya juga dilakukan oleh Hussin (Hussin et al., 2015). Dalam penelitiannya, periode dalam proses stabilisasi modul sel surya silikon amorf dicapai setelah sel surya diekspos selama satu setengah tahun. Dari hasil penelitian pada Gambar 2.15 dapat terlihat bahwa degradasi dari daya yang dihasilkan modul sel surya menurun secara signifikan pada bulan Juni hingga Agustus 2011. Penurunan secara eksponensial tersebut berlangsung hingga bulan Desember 2012 dan mulai menjadi stabil pada kurva S hingga X.



Gambar 2.15 Proses stabilisasi ESW melalui garis transisi daya yang berlangsung hingga dua tahun. (Hussin et al., 2015)

2.6.5 Uji Efisiensi dan Karakteristik I-V

Skema rangkaian ekuivalen dijabarkan pada Gambar 2.16, dimana arus sumber memiliki hubungan paralel dengan hambatan variabel. Arus sumber I_{sc} dihasilkan dari proses eksitasi pembawa muatan berlebih karena penyinaran, sedangkan I_s adalah arus jenuh diode, dan R_V adalah hambatan variabel.



Gambar 2.16 Rangkaian ideal sel surya (Sze dan Lee, 2012).

Jika arus total yang mengalir adalah nol ($I = 0$) maka akan diperoleh tegangan rangkaian terbuka V_{OC} (*open-circuit voltage*) dengan persamaan :

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_s} + 1 \right) \cong \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_s} \right) \quad (2.5)$$

Pada kuat arus sumber I_{sc} tertentu, V_{OC} akan meningkat secara logaritmik diiringi dengan berkurangnya arus jenuh I_s (Sze dan Lee, 2012). Daya output maksimum dari sel surya dapat dinyatakan sebagai

$$PV_m = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{\frac{I_{SC}}{I_s} + 1}{\frac{qV_m}{kT} + 1} \right) \cong V_{OC} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{qV_m}{kT} + 1 \right) \quad (2.6)$$

$$I_m = I_s \left(\frac{qV_m}{kT} \right) e^{\frac{qV_m}{kT}} \cong I_{SC} \left(1 - \frac{1}{\frac{qV_m}{kT}} \right) \quad (2.7)$$

$$P_m = I_m V_m = I_{SC} \left[V_{OC} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{qV_m}{kT} + 1 \right) - \frac{kT}{q} \right] \quad (2.8)$$

dimana I_m dan V_m adalah arus dan tegangan yang berpengaruh pada daya output maksimum sel surya P_m .

Dalam uji efisiensi sel surya, efisiensi tidak hanya dipengaruhi oleh arus dan tegangan sumber, tetapi juga oleh daya sinar yang datang (*incident power*) dan *fill factor*. *Fill factor* disini adalah perbandingan daya maksimum rangkaian terhadap arus sumber I_{SC} dan tegangan rangkaian terbuka V_{OC} . Sehingga untuk memperoleh efisiensi yang maksimum maka faktor-faktor yang telah disebutkan diatas perlu diperhitungkan. Faktor-faktor tersebut dinyatakan dengan :

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_{in}} \quad (2.9)$$

atau

$$\eta = \frac{FF I_{SC} V_{OC}}{P_{in}} \quad (2.10)$$

dimana η adalah konversi efisiensi dari daya sel surya, P_{in} adalah daya dari sinar yang datang, dan FF adalah *fill factor* yang didefinisikan sebagai :

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{SC} V_{OC}} \quad (2.11)$$

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Suprianto (Suprianto, 2012), diperoleh efisiensi rata-rata sel surya p-i-n adalah 2,7% dan efisiensi maksimumnya adalah 5,31% dengan nilai fill factor 0,44. Percobaan tersebut dilakukan pada sel surya p-i-n dengan variasi deposisi laju gas H_2 sebesar 70 sccm dan 50 sccm, sedangkan laju gas SiH_4 konstan pada 20 sccm, gas B_2H_6 konstan pada 2 sccm, dan gas PH_3 konstan pada 3 sccm. Perbedaan efisiensi yang diperoleh pada substrat yang sama diakibatkan karena lapisan ITO yang digunakan dalam penelitian tidak rata sehingga ketebalan lapisan p-i-n hasil deposisi PECVD juga tidak rata.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Alat dan Bahan Penelitian

3.1.1 Alat Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian sel surya p-i-n adalah :

- a. Pemotong kaca
- b. *Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition* (PECVD)
- c. Evaporator
- d. Probe 4-titik
- e. *UV-Vis Spectrometer*
- f. *Atomic Force Microscopy* (AFM)
- g. *Substrat Holder & Silica Gel*
- h. Set rangkaian IV (Voltmeter, Amperemeter, dan hambatan Geser).
- i. Solar Power Meter
- j. Lampu Halogen

3.1.2 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang diperlukan selama proses penelitian sel surya p-i-n :

- a. Substrat kaca dengan lapisan ITO
- b. Alkohol dan Tissue
- c. Gas N₂, gas H₂, gas SiH₄, dan gas B₂H₆.
- d. Logam tungstem aluminium

3.2 Prosedur Penelitian

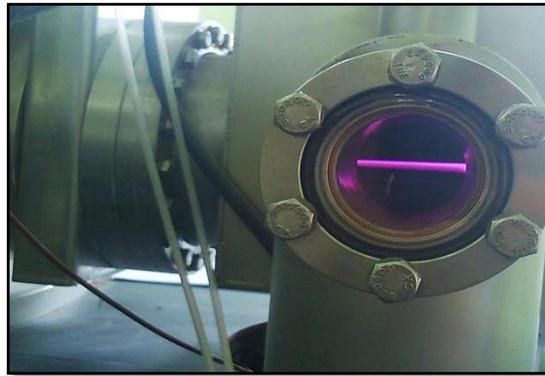
Pada sub-bab ini akan dijabarkan tentang prosedur penelitian untuk tiap tahapnya.

3.2.1 Preparasi Substrat

Langkah awal dari penelitian adalah menyiapkan substrat kaca yang telah dilapisi dengan ITO. Substrat kemudian dipotong dengan ukuran 10x10 cm² dengan menggunakan pemotong kaca.

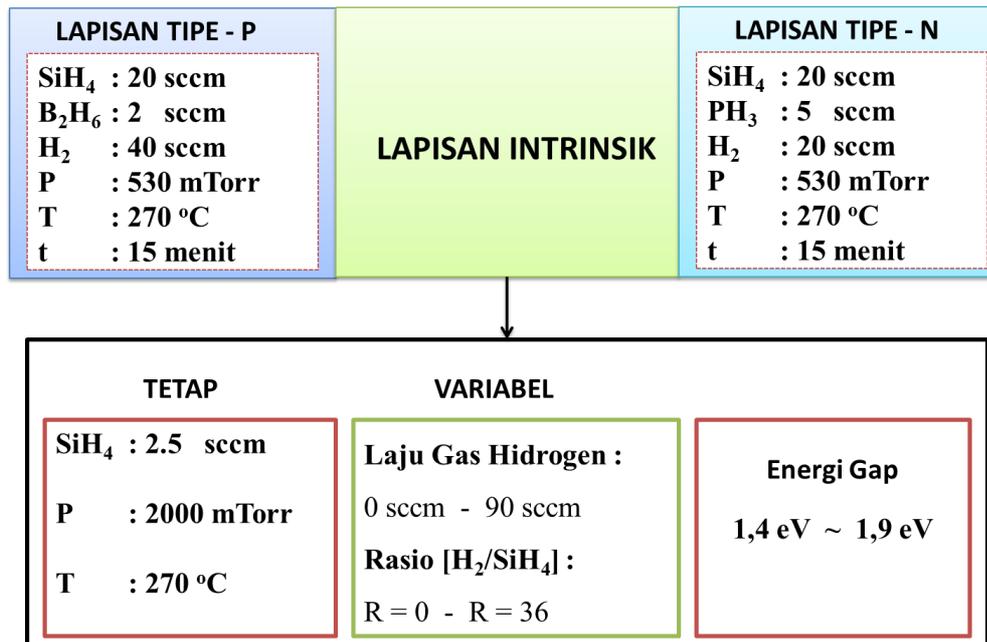
3.2.2 Deposisi Lapisan p-i-n

Langkah kedua adalah deposisi beberapa sampel lapisan p-i-n dengan menggunakan PECVD. Substrat kaca yang telah disiapkan disterilisasi terlebih dahulu dengan menggunakan alkohol agar terhindar dari kontaminasi debu. Substrat kemudian dimasukkan kedalam salah satu *chamber* PECVD. Deposisi awal yang dilakukan adalah deposisi lapisan tipe-p dengan pengaturan suhu *chamber* $\sim 270^{\circ}\text{C}$. Deposisi dilakukan dengan mengalirkan gas SiH_4 ~ 20 sccm, gas B_2H_6 ~ 2 sccm dan CH_4 ~ 30 sccm dengan waktu deposisi 15 menit. Proses deposisi yang terjadi pada PECVD ditandai dengan terbentuknya plasma dan munculnya cahaya berwarna ungu seperti pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Proses terbentuknya plasma pada saat deposisi lapisan tipe-p.

Setelah lapisan tipe-p selesai dideposisi, maka substrat ditransfer menuju ke *chamber* lain secara otomatis dengan menggunakan lengan robot (*robot arm*). Proses deposisi lapisan tipe-i terjadi dengan mengalirkan gas SiH_4 ~ 2 sccm dengan waktu deposisi antara 30-90 menit. Substrat kemudian dipindah menuju *chamber* awal yang telah dinormalisasi dengan menggunakan *dummy*. Deposisi lapisan tipe-n dilakukan dengan mengalirkan gas SiH_4 ~ 20 sccm dan PH_3 ~ 5 sccm dengan waktu deposisi 15 menit. Parameter deposisi lapisan p-i-n secara lengkap dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram variabel proses deposisi lapisan p-i-n pada PECVD.

3.2.3 Karakterisasi Lapisan

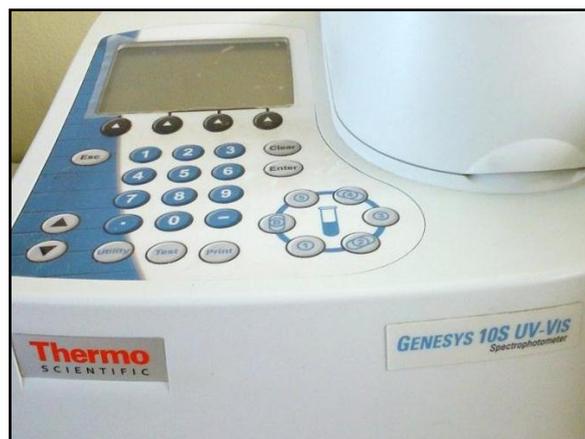
Karakterisasi pada penelitian ini terhadap beberapa sampel lapisan p-i-n dilakukan menggunakan alat Atomic Force Microscopy (AFM), UV-Vis Spectrometer, dan Probe 4-titik.

Pengujian AFM pada sampel lapisan p-i-n dilakukan untuk mendapatkan ketebalan lapisan yang telah dideposisi. Pengujian AFM ini dapat dilakukan terlebih dahulu pada sampel percobaan deposisi salah satu tipe lapisan. Hal ini dilakukan dengan tujuan mengetahui rata-rata kecepatan deposisi pada waktu tertentu sesuai parameter yang digunakan saat deposisi. Pengujian dilakukan di LPPM Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya menggunakan AFM BRUKER tipe N8-NEOS.



Gambar 3.3 Atomic Force Microscopy N8-NEOS

Untuk menentukan energi band-gap dari lapisan tipe p-i-n maka diperlukan data koefisien dan absorpsi untuk tiap lapisan sesuai dengan parameter deposisi yang dilakukan. Koefisien absorpsi dan transmitansi lapisan p-i-n diperoleh dengan melakukan pengujian penyinaran ultraviolet menggunakan alat GENESYS UV-VIS Spectrometer. Pengujian absorpsi dan transmitansi lapisan p-i-n akan dilakukan dibawah penyinaran cahaya dengan panjang gelombang 200nm – 1000nm. Pengujian UV-Vis Spectrometer dilakukan di laboratorium fisika zat padat Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya.



Gambar 3.4 Alat GENESYS UV-Vis Spectrometer

Karakterisasi Probe 4-titik digunakan untuk mendapatkan data konduktivitas dari masing-masing lapisan p-i-n yang terbentuk. Sebelum pengujian dilakukan, sampel lapisan p-i-n akan diberi pasta perak dan serabut kawat agar ujung probe tidak merusak lapisan sampel. Setelah pasta perak kering, ujung probe dihubungkan pada ujung serabut kawat kemudian dikunci agar pada saat pengukuran terhindar dari pergerakan. Pada pengujian Probe 4-titik juga akan digunakan faktor koreksi sesuai dengan rasio diameter sampel dan rentang antar probe. Pengujian Probe 4-titik pada lapisan p-i-n dilakukan di laboratorium fisika zat padat Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya.

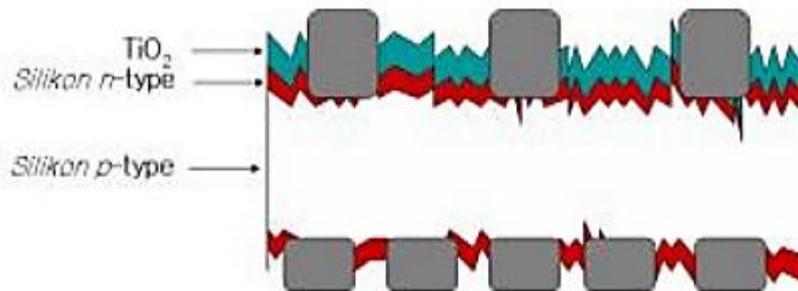


Gambar 3.5 Pengukuran konduktivitas dengan Probe 4-titik lapisan tipis.

3.2.4 Pelapisan Ohmik Kontak

Sel surya perlu diberi lapisan metal yang konduktif (ohmik kontak) pada ujung lapisan agar dapat mengalirkan arus pada rangkaian serta terhindar dari gangguan seperti kotoran dan karat. Ohmik kontak akan difabrikasi melalui teknik Evaporasi. Batang logam tungstem aluminium yang telah disiapkan akan dimasukkan kedalam Evaporator hingga meleleh pada suhu tinggi. Lelehan aluminium kemudian akan dilapiskan pada permukaan lapisan tipe-n. Lelehan tersebut kemudian dibiarkan hingga terdifusi kedalam lapisan seperti pada

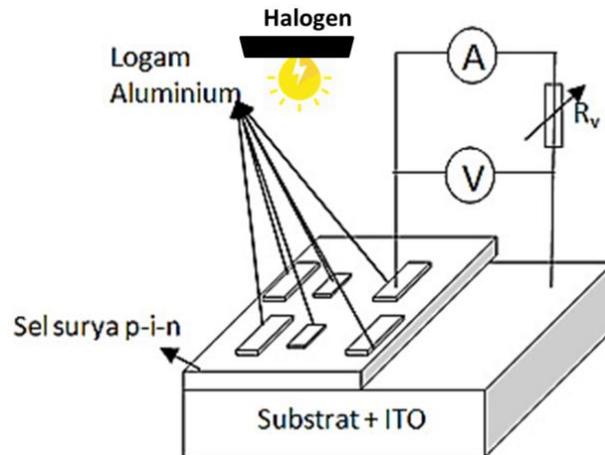
Gambar 3.6. Pada tahap ini sampel akan siap untuk dihubungkan pada rangkaian terbuka untuk proses karakterisasi I-V sel surya.



Gambar 3.6 Ilustrasi proses difusi kontak ohmik pada permukaan lapisan.

3.2.5 Karakterisasi I-V

Pada umumnya pengujian efisiensi dan karakteristik arus-tegangan sel surya dilakukan dibawah terik sinar matahari. Hal tersebut dilakukan untuk memperoleh hasil nyata terhadap daya sinar matahari. Perbandingan pengukuran dibawah sinar matahari dan lampu halogen akan dilakukan dalam penelitian ini untuk mendapatkan hasil yang optimum dan nyata. Dimana kemungkinan pengaruh faktor cuaca dan intensitas cahaya penyinaran dapat dimimalisir selama waktu pengukuran. Pengujian efisiensi dan karakteristik i-v sel surya hubungan p-i-n juga dilakukan dibawah penyinaran lampu halogen dengan intensitas 20-30 mW/cm². Gambar 3.7 menunjukkan skema rangkaian pengujian sel surya yang dihubungkan ke rangkaian listrik. Melalui penyinaran sinar lampu halogen, sel surya akan menimbulkan aliran listrik melalui kontak ohmik. Kontak ohmik tersebut dihubungkan kepada rangkaian yang telah dilengkapi dengan alat ukur amperemeter dan voltmeter. Pengukuran karakteristik I-V dilakukan dengan mengubah-ubah nilai resistansi hambatan variabel (R_V) pada rangkaian (Suprianto, 2012).



Gambar 3.7 Skema rangkaian pengujian efisiensi dan karakteristik I-V sel surya (Suprianto, 2012).

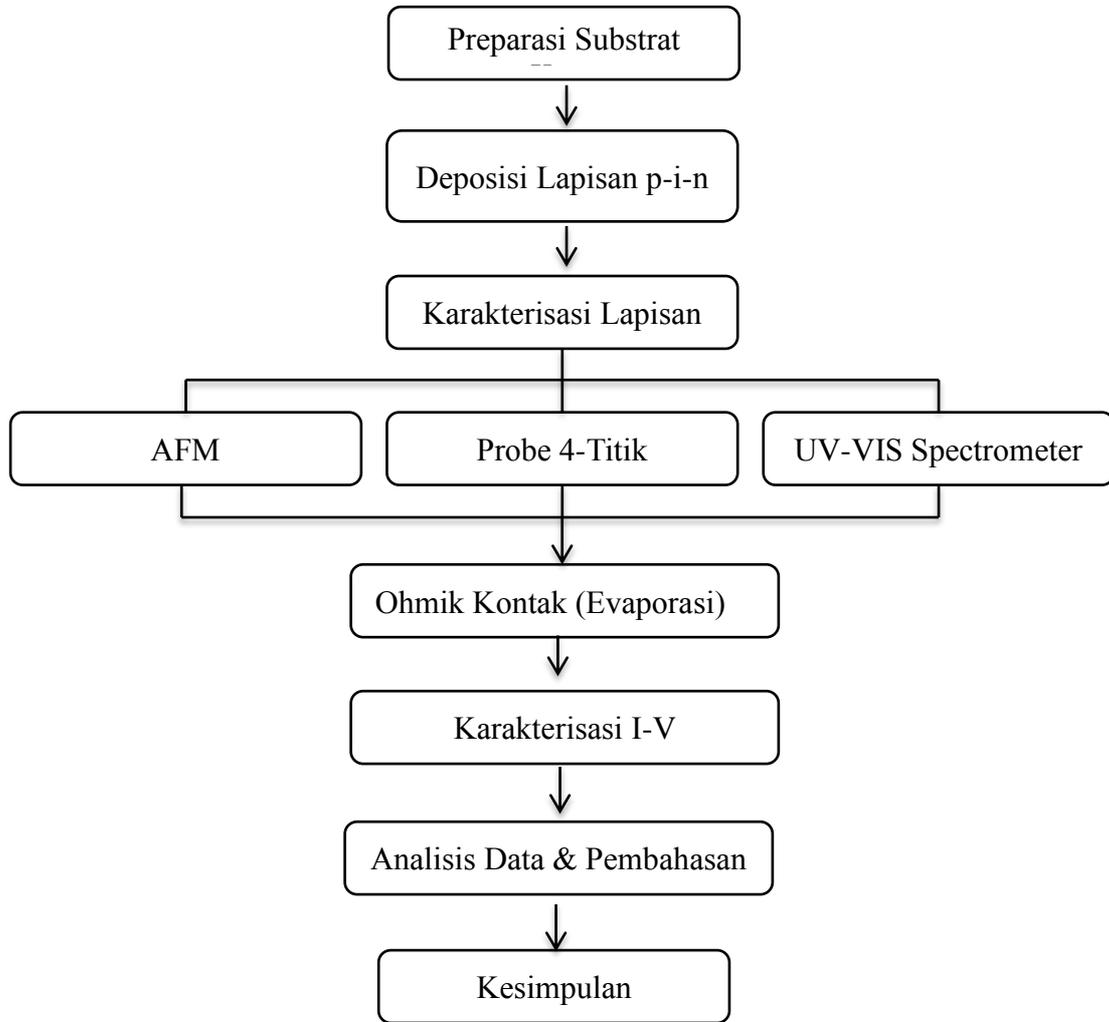
3.3 Jadwal Penelitian

Tabel 3.1 Jadwal Rencana Penelitian

No	Kegiatan	Waktu
1	Studi Pustaka dan Percobaan Awal	Agustus 2016 – Oktober 2016
2	Optimasi Lapisan p-i-n Sel Surya	Oktober 2016 – Desember 2016
3	Karakterisasi dan Pengujian Efisiensi	Oktober 2016 - Desember 2016
4	Analisa Data	Desember 2016 – Februari 2017
5	Pembuatan Laporan	Maret 2017– April 2017

3.4 Diagram Alir Penelitian

Berdasarkan prosedur penelitian, diagram alir untuk penelitian optimalisasi sel surya hubungan p-i-n tunggal adalah seperti berikut :



Gambar 3.8 Diagram alir penelitian sel surya

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Fabrikasi Sel Surya Silikon Amorf Terhidrogenasi

Telah difabrikasi sel surya silikon amorf berstruktur p-i-n tunggal dengan substrat kaca yang terlapisasi oleh ITO. Metode yang digunakan adalah penumbuhan lapisan dengan Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD). Lapisan ekstrinsik, yaitu lapisan tipe-p dan tipe-n, difabrikasi pada *chamber* PL3 sedangkan lapisan intrinsik difabrikasi pada PL4. Hal tersebut bertujuan agar lapisan intrinsik dapat dipastikan bebas dari kontaminasi sisa pengotor (*doping*) yang ada saat fabrikasi lapisan ekstrinsik. Proses *dummy* dilakukan dalam rentang waktu 5 menit dengan mengalirkan gas SiH₄ sebelum deposisi dimulai, bertujuan untuk menghilangkan kontaminasi sisa doping B₂H₆ maupun PH₃.

Lapisan ekstrinsik dideposisi dengan parameter yang tetap, sedangkan untuk lapisan intrinsik dideposisi dengan tiga parameter yang berbeda pada kelajuan gas Hidrogen. Karakteristik parameter dari masing-masing lapisan dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Parameter deposisi sel surya untuk tiap lapisan

Lapisan	SiH ₄ (sccm)	H ₂ (sccm)	B ₂ H ₆ (sccm)	PH ₃ (sccm)	Daya (Watt)	Temperatur (°C)	Tekanan (Torr)
Tipe-p	20	40	2	-	5	210	0,480
Tipe-i ₁	2,5	0	-	-	5	270	2
Tipe-i ₂	2,5	40	-	-	10	270	2
Tipe-i ₃	2,5	90	-	-	5	270	2
Tipe-n	20	20	-	5	5	210	0,530

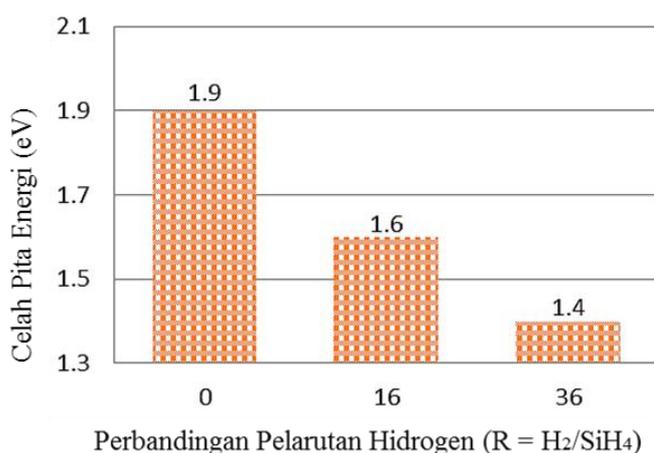
Masing-masing lapisan yang terfabrikasi telah dikarakterisasi untuk mengetahui sifat fisik lapisan. Ketebalan lapisan diukur dengan menggunakan Atomic Force Microscopy (AFM). Hasil dari ketebalan yang diperoleh dapat

digunakan untuk menentukan laju deposisi dari tiap lapisan. Celah pita energi lapisan dihitung melalui Tauc's Plot dengan menggunakan data pengukuran transmisi UV-Vis Spectrometric, serta data ketebalan lapisan. Karakteristik tiap lapisan tercantum pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil karakteristik laju deposisi, tebal dan celah pita energi.

Lapisan	R H ₂ /SiH ₄	Laju Deposisi (nm/s)	Waktu (Menit)	Tebal (nm)	Energi Gap (eV)
Tipe-p	2	0,072	15	43	2,0
Tipe-i ₁	0	0,028	236	400	1,9
Tipe-i ₂	16	0,012	570	400	1,6
Tipe-i ₃	36	0,042	160	400	1,4
Tipe-n	1	0,120	15	36	2,2

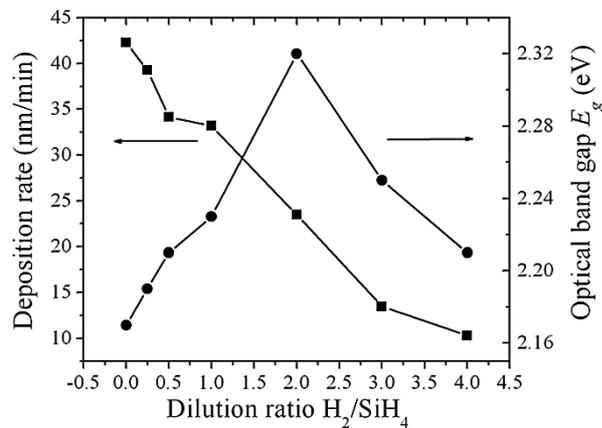
Pada susunan lapisan a-Si:H, lapisan tipe-p memiliki celah pita energi (*energy gap*) 2,0 eV. Lapisan intrinsik yang dideposisi dengan variasi kelajuan gas hidrogen memiliki celah pita yang bervariasi seperti pada Gambar 4.1. Untuk rasio pelarutan gas hidrogen 0 (0 sccm), 16 (40 sccm), dan 36 (90 sccm) lapisan intrinsik memiliki celah pita energi berturut-turut 1,9 eV, 1,6 eV dan 1,4 eV. Celah pita energi semakin menurun seiring dengan peningkatan kelajuan gas hidrogen pada saat proses deposisi.



Gambar 4.1. Grafik celah pita energi terhadap laju hidrogen pada lapisan intrinsik.

Penurunan celah pita energi disebabkan oleh atom hidrogen yang memberikan dampak disosiasi SiH₄ melalui peningkatan tumbukan ion/elektron

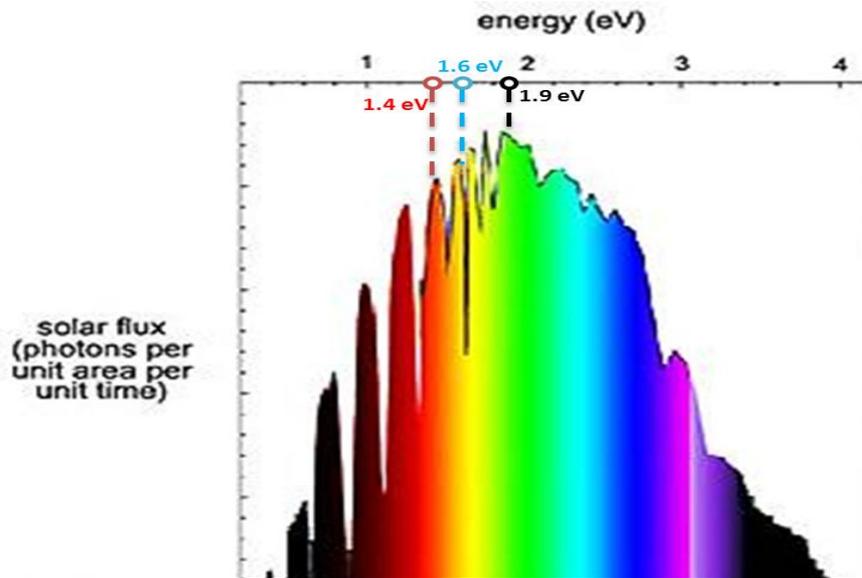
dan mempengaruhi energi dari permukaan lapisan yang sedang tumbuh dengan cara mengisi celah kekosongan pada permukaan atom silikon. Penelitian yang telah dilakukan oleh Zhou (Zhou et al., 2016) menunjukkan bahwa terjadi penurunan terhadap besar celah pita energi untuk rasio perbandingan H_2/SiH_4 lebih dari 2. Dengan rasio perbandingan yang tinggi terdapat kemungkinan peningkatan derajat kristalisasi pada pembuatan lapisan tipis, diindikasikan oleh adanya radikal terabsorpsi dengan panjang difusi yang lebar.



Gambar 4.2. Penurunan celah pita energi untuk rasio H_2/SiH_4 yang tinggi (Zhou et al., 2016).

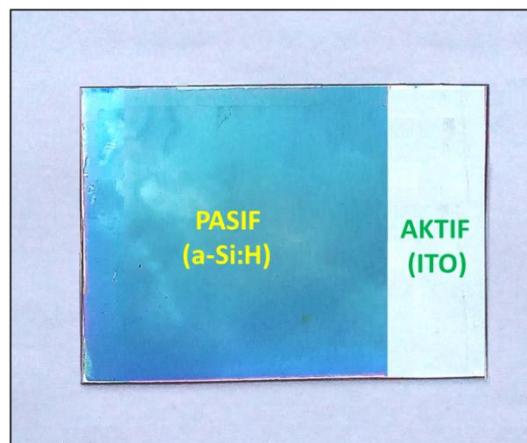
Pada penyusunan sel surya dengan struktur p-i-n, celah pita energi yang dimiliki oleh lapisan intrinsik berada dibawah celah pita energi lapisan tipe-p. Hal tersebut bertujuan agar lapisan intrinsik sebagai lapisan absorpsi utama dapat menyerap banyak foton dengan energi 2,0 eV kebawah. Pada Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa aliran foton tiap satuan luas memiliki kapasitas yang tinggi untuk spektrum cahaya tampak dengan energi 1,5 eV hingga 2 eV.

Salah satu faktor penting dalam fabrikasi lapisan adalah ketebalan dari lapisan itu sendiri. Ketebalan lapisan tipe-p dan tipe-n dibuat tipis agar foton yang masuk tidak banyak yang terserap pada lapisan tersebut. Lapisan ekstrinsik lebih ditujukan sebagai window layer atau penyaring foton agar karakteristik energinya sesuai dengan apa yang dikehendaki. Lapisan intrinsik pada sel surya dibuat lebih tebal dari pada lapisan ekstrinsik, yaitu 400 nm agar pasangan elektron-hole yang tercipta pada proses generasi bertambah banyak.



Gambar 4.3. Kapasitas aliran foton spektrum matahari sebagai fungsi celah pita energi.

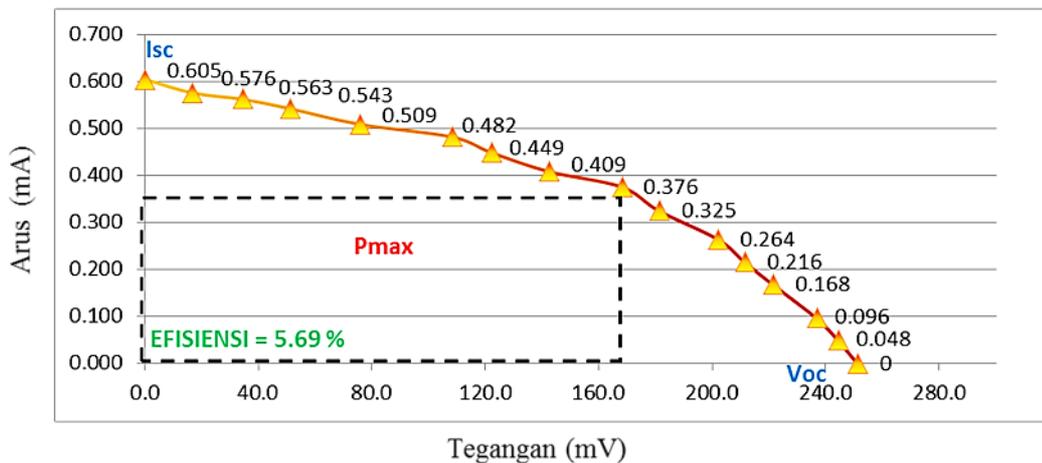
Hasil fabrikasi sel surya dengan lapisan p-i-n yang tumbuh pada substrat terlihat cukup homogen dengan indikasi warna lapisan merata seperti pada Gambar 4.4. Terdapat dua daerah pada lapisan, yaitu lapisan aktif dan lapisan pasif. Daerah dengan warna permukaan yang homogen disebut dengan daerah pasif, dimana bagian tersebut sudah tidak lagi konduktif karena telah terlapsi oleh lapisan a-Si:H yang terbentuk dari ikatan Si-Si serta Si-H yang stabil. Daerah aktif yang konduktif ditandai dengan warna transparan dari lapisan ITO yang tidak terlapsi oleh a-Si:H. Hal tersebut bertujuan untuk mempermudah pembuatan jalur konduktif antara lapisan tipe-p, tipe-n sel surya dan rangkaian.



Gambar 4.4 Sel Surya a-Si:H dengan struktur p-i-n hasil deposisi PECVD.

4.2 Analisa Optimasi Celah Pita Energi Lapisan Intrinsik

Sel surya yang telah difabrikasi dengan struktur p-i-n diuji melalui karakteristik I-V untuk mempelajari performa yang dihasilkan. Sampel dengan ukuran $1 \times 1 \text{ cm}^2$ diletakkan dibawah sinar matahari langsung (*direct sunlight*) dengan intensitas $\geq 800 \text{ W/m}^2$, kemudian dihubungkan terhadap rangkaian sederhana yang terdiri atas avometer, voltmeter, serta hambatan geser. Arus rangkaian singkat (I_{sc}) diperoleh dengan cara menghubungkan singkat sel surya dengan avometer, tegangan terbuka (V_{oc}) diperoleh dengan cara menghubungkan singkat sel surya dengan voltmeter. Data arus dan tegangan diperoleh dengan cara menghubungkan sel surya terhadap rangkaian, disertai dengan pergeseran hambatan yang lebih tinggi. Keseluruhan data yang diperoleh diolah menjadi grafik seperti pada Gambar 4.5, dan dihitung performanya berdasarkan persamaan 2.9 hingga persamaan 2.11.



Gambar 4.5 Grafik karakteristik I-V sel surya dalam analisa efisiensi

Berdasarkan celah pita energi lapisan intrinsik, variasi sel surya dibedakan menjadi tiga sampel seperti pada Tabel 4.3. Sampel A berstruktur p-i₃-n dengan celah pita energi 2,0-1,4-2,2 eV, sampel B berstruktur p-i₂-n dengan celah pita energi 2,0-1,6-2,2 eV dan sampel C berstruktur p-i₁-n dengan celah pita energi 2,0-1,9-2,2 eV. Ketiga sampel diuji karakteristik I-V untuk memperoleh hasil rapat arus (J_{sc}), tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) dan efisiensi sel surya. Sampel A memperoleh efisiensi 4,86% dengan rapat arus $2,65 \times 10^{-2} \text{ A/m}^2$ dan tegangan terbuka 0,214 V. Sampel B memperoleh efisiensi 5,61% dengan rapat

arus $4,12 \times 10^{-2} \text{ A/m}^2$ dan tegangan terbuka 0,163 V. Sampel C memperoleh efisiensi 5,37% dengan rapat arus $4,04 \times 10^{-2} \text{ A/m}^2$ dan tegangan terbuka 0,159 V.

Tabel 4.3 Struktur sampel berdasarkan celah pita energi dan peforma sel.

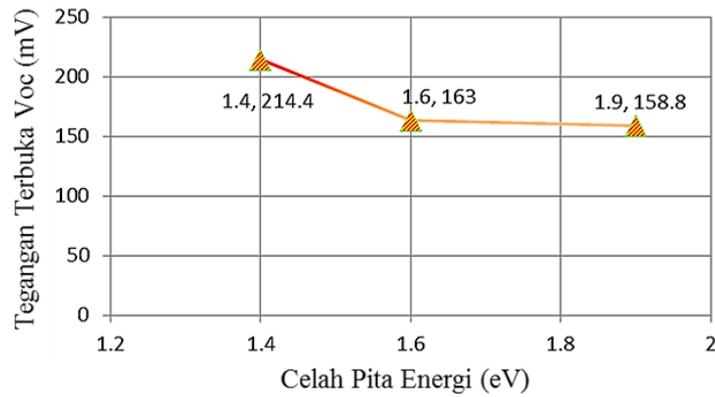
Sampel	Struktur	Lapisan Intrinsik		J_{sc} (A/m^2) $\times 10^{-2}$	V_{oc} (V)	FF (%)	Efisiensi (%)
		R H_2/SiH_4	Energy Gap (eV)				
A	p-i ₃ -n	36	1,4	2,65	0,214	40,4	4,86
B	p-i ₂ -n	16	1,6	4,12	0,163	41,1	5,61
C	p-i ₁ -n	0	1,9	4,04	0,159	39,7	5,37

Sesuai dengan distribusi flux pada Gambar 4.3, 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 *window layer*. Terlihat bahwa efisiensi sel surya dengan celah pita energi lapisan intrinsik 1,6 eV dan 1,9 eV memiliki peforma yang lebih baik daripada sel surya dengan lapisan intrinsik 1,4 eV karena pengaruh distribusi foton sinar matahari lebih banyak.

Sampel A memiliki tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) yang paling besar dibandingkan dengan kedua sampel lainnya. Seiring dengan menurunnya rasio pelarutan hidrogen, tegangan rangkaian terbuka juga menunjukkan penurunan seperti pada Tabel 4.3. Kehadiran atom hidrogen pada saat deposisi dapat meningkatkan koefisien difusi pada permukaan yang ditumbuhkan, sehingga dapat membentuk bibit fase kristalin pada lapisan. Dengan peningkatan rasio hidrogen, maka dapat terbentuk lapisan film yang lebih stabil serta memiliki mobilitas pembawa muatan yang tinggi.

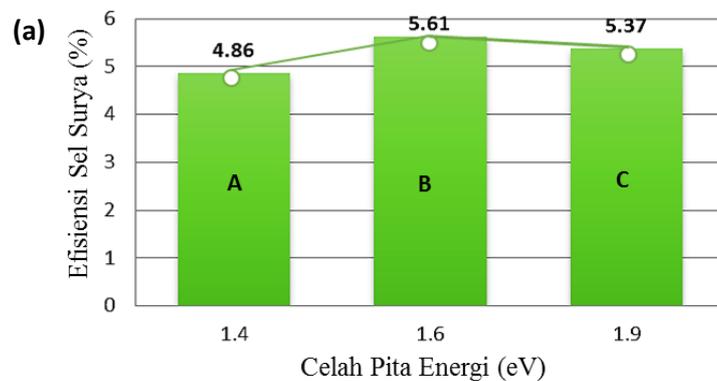
Indikasi peningkatan rasio hidrogen ditunjukkan dengan adanya penurunan pada celah pita energi lapisan intrinsik. Gambar 4.6 menunjukkan grafik hubungan antara celah pita energi terhadap tegangan rangkaian terbuka. Peningkatan celah pita energi lapisan intrinsik yang semakin tinggi diikuti dengan penurunan tegangan rangkaian terbuka yang cukup signifikan. Hal ini disebabkan pada lapisan dengan celah pita energi yang tinggi, dihasilkan pasangan elektron-

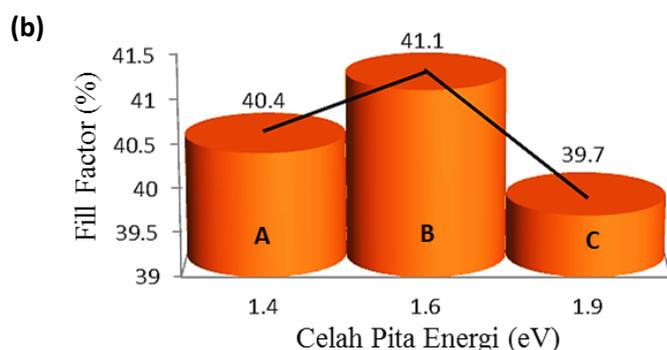
hole yang lebih banyak dan terjadi pemisahan yang tepat pada tingkat kuasi Fermi yang disebabkan oleh elektron dan hole yang bergerak menuju masing-masing lapisan sebelum rekombinasi terjadi. Oleh karena itu arus yang mengalir pada rangkaian (J_{sc}) lebih besar (Sharma et al., 2013).



Gambar 4.6 Grafik celah pita energi terhadap tegangan V_{oc} untuk sampel A, B dan C

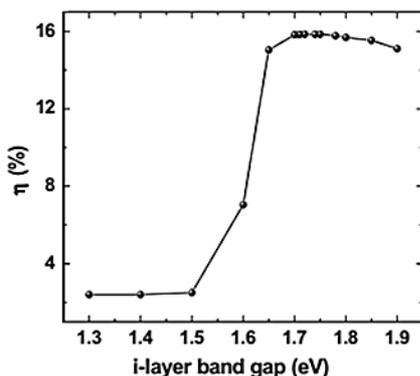
Gambar 4.7 menunjukkan grafik performa efisiensi sel surya p-i-n terhadap celah pita energi. Pada pergeseran celah pita energi 1,4 eV ($R=36$) menjadi 1,6 eV ($R=16$) terjadi peningkatan efisiensi dan *fill factor* sebesar 0,75% dan 0,7%. Penurunan performa terjadi pada celah pita energi 1,9 eV dimana efisiensi dan *fill factor* menurun sebesar 0,24% dan 1,3%. Penyebab peningkatan yang cukup signifikan terletak pada perbedaan celah pita energi yang terlalu besar terhadap lapisan tipe-p. Lapisan tipe-p memiliki celah pita energi sebesar 2,0 eV, sehingga sampel A memiliki rentang celah pita energi yang lebar yaitu 0,6 eV. Hal tersebut menyebabkan konversi energi foton yang diserap sel surya tidak efisien.





Gambar 4.7 Grafik performa sel surya (a) efisiensi terhadap celah pita energi dan (b) *Fill factor* terhadap celah pita energi

Cahaya dengan rentang energi $\leq 2,0$ eV memasuki lapisan tipe-p dan diterima oleh lapisan tipe-i dengan celah pita energi 1,4 eV. Foton dengan celah pita energi 1,4 eV akan diserap secara optimum oleh lapisan intrinsik dan menghasilkan pasangan elektron-hole, sedangkan foton dengan energi $< 1,4$ eV akan ditransmisikan ke lapisan tipe-n. Salah satu penyebab efisiensi yang rendah terletak pada foton dengan celah pita energi lebih dari 1,4 eV. Foton dengan energi yang lebih tinggi dari celah pita energi lapisan intrinsik akan diserap dan menggerakkan elektron menuju pita konduksi serta meninggalkan kekosongan (hole) pada pita valensi. Pasangan elektron-hole tersebut melepaskan energi panas dan dengan cepat relaksasi kembali pada tepi pita.

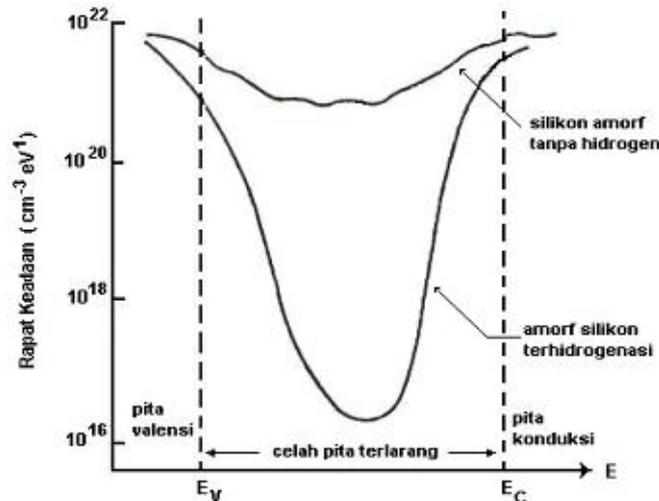


Gambar 4.8 Grafik peningkatan efisiensi sel surya terhadap celah pita energi lapisan intrinsik (Singh et al., 2012).

Energi yang dilepaskan oleh pasangan elektron-hole terbuang secara percuma, menjadikan temperatur lapisan meningkat dan menyebabkan performa sel surya yang rendah pada saat disinari dengan matahari. Hal yang serupa

ditemui juga pada sampel B dan C dengan celah pita energi lapisan intrinsik 1,6 eV dan 1,9 eV. Namun perbedaan rentang celah pita energi sebesar 0,4 eV dan 0,1 eV mereduksi adanya energi panas yang berlebih (*absorption losses*) sehingga performa efisiensi dan *fill factor* lebih tinggi daripada sampel A.

Dalam hal yang sama, Sukhbir Singh melaporkan pada penelitiannya bahwa terjadi peningkatan efisiensi sel surya dengan celah pita energi yang semakin meningkat. Lapisan tipe-p dan tipe-n memiliki celah pita energi 2,1 eV dan 1,78 eV. Pada gambar 4.8 terlihat bahwa semakin rendah celah pita energi lapisan intrinsik, semakin besar perbedaan celah pita energi dengan *window layer*. Efisiensi yang dihasilkan semakin rendah disebabkan oleh *absorption losses* yang semakin tinggi (Singh et al., 2012).

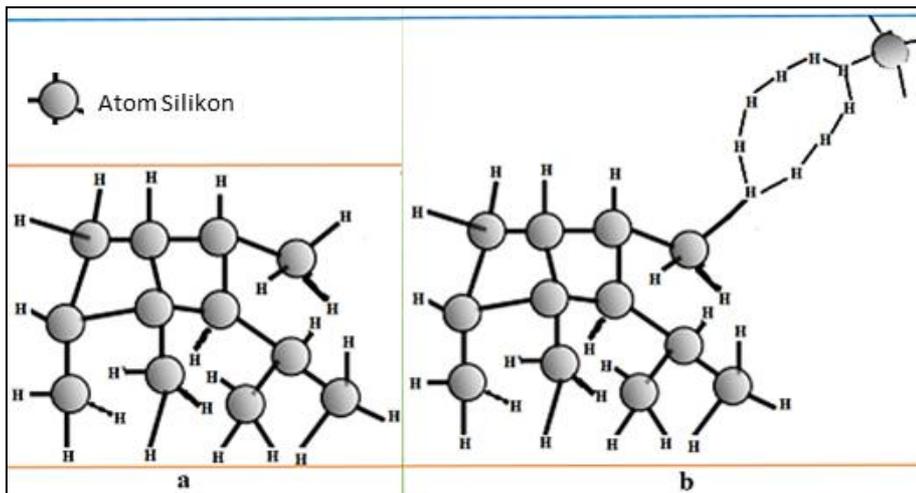


Gambar 4.9 Penurunan rapat keadaan dan celah pita terlarang (*defect*) terjadi pada silikon amorf a-Si:H dengan pelarutan hidrogen (Street, 1991).

Salah satu faktor yang mempengaruhi performa sel surya selain celah pita energi adalah pelarutan gas hidrogen (*hydrogen dilution*) pada saat proses deposisi. Pada sampel C tanpa pelarutan gas hidrogen ($R=0$), diperoleh efisiensi 5,37% dengan fill factor 39,7%. Pelarutan gas hidrogen 40 sccm pada lapisan intrinsik sampel B dapat meningkatkan performa efisiensi sel surya. Hal ini disebabkan atom hidrogen mengikat elektron bebas atom Si yang reaktif atau belum berikatan (*dangling bond*). Dengan pengikatan atom hidrogen pada ikatan Si yang kosong maka defect pada celah pita energi akan berkurang. Dengan berkurangnya defect pada celah pita energi, elektron-elektron pada pita valensi

akan semakin mudah tereksitasi menuju pita konduksi akan menyebabkan stabilitas pembawa muatan semakin baik, konduktivitas listrik semakin besar dan efisiensi yang lebih baik.

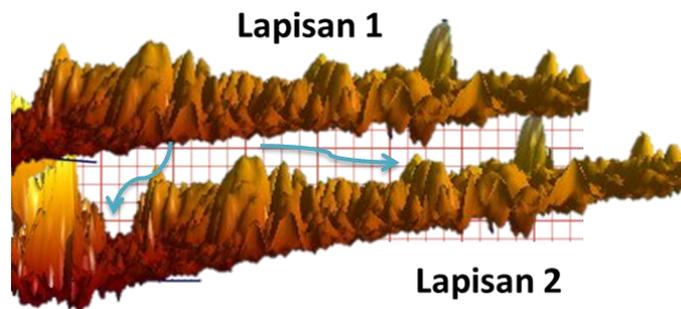
Pada sampel A dengan pelarutan hidrogen yang tinggi ($R=36$), efisiensi yang diperoleh paling rendah daripada sampel B dan C. Efisiensi yang rendah diakibatkan oleh adanya *defect* lain berupa jembatan hidrogen (*hydrogen bridge*) yang terbentuk pada saat proses pelarutan gas hidrogen. Pada rasio hidrogen $R\sim 40$ diperkirakan tingkat kekosongan ikatan atom Si sudah rendah atau terpenuhi, sehingga peningkatan rasio hidrogen yang lebih tinggi akan menyebabkan atom-atom H akan berikatan dengan atom H lainnya seperti pada Gambar 4.10. Adanya *hydrogen bridge* memunculkan keadaan kosong (*gap state*) pada celah pita energi yang menghambat elektron bereksitasi ke pita konduksi. Dengan demikian, konduktivitas listrik akan rendah pada pelarutan hidrogen yang tinggi, diikuti dengan efisiensi yang rendah pula.



Gambar 4.10 (a) Atom-atom Si yang berikatan dengan atom H dan (b) Jembatan hidrogen yang terbentuk karena pelarutan hidrogen yang tinggi.

Dengan hasil uji IV yang telah dilakukan, puncak optimasi sampel terletak pada sampel B dengan performa efisiensi 5.61% pada ketebalan 400 nm. Hasil performa yang telah didapatkan dapat ditingkatkan melalui beberapa optimasi pada suatu faktor yang disebut *interface losses*. *Interface losses* adalah

pengaruh kehilangan absorpsi energi foton yang disebabkan karena permukaan antar sambungan yang tidak rata, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.11. Pada lapisan struktur p-i-n yang menumpuk, foton yang ditransmisikan dapat terjebak di antara 2 lapisan sehingga semakin susah untuk menuju lapisan yang lain dan menyebabkan energi foton tidak terserap dengan baik. Oleh karena itu, penumbuhan permukaan lapisan yang homogens perlu dioptimasi dengan cara menurunkan kelajuan deposisi lapisan agar secara perlahan terbentuk lapisan yang halus dan rata.



Gambar 4.11 Ilustrasi foton yang terjebak diantara lapisan yang disebabkan oleh penumbuhan permukaan lapisan yang tidak rata.

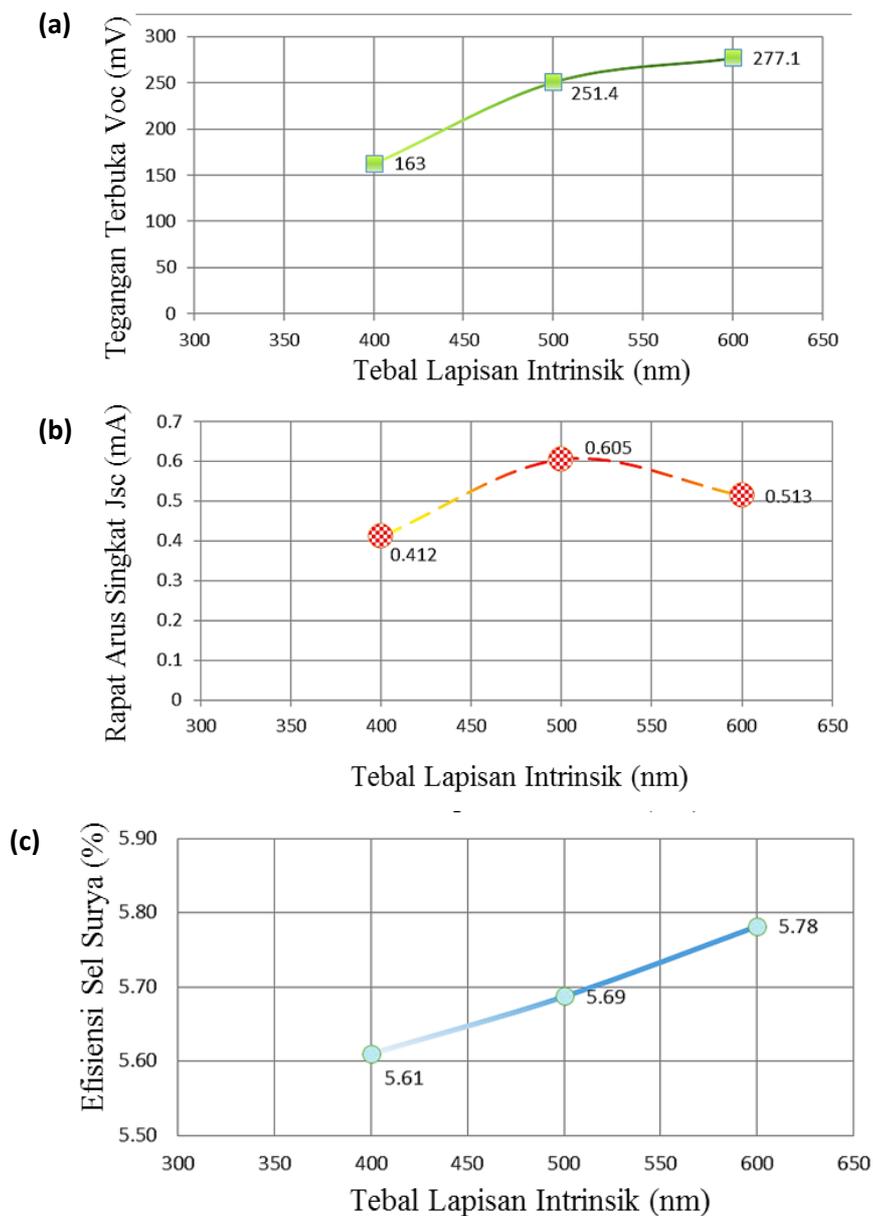
4.3 Analisa Optimasi Tebal Lapisan Intrinsik

Ketebalan lapisan intrinsik merupakan faktor yang dapat mempengaruhi performa dari sel surya mengingat lapisan intrinsik adalah lapisan utama yang difungsikan untuk menyerap energi sinar matahari (*absorber*). Dengan lapisan intrinsik yang semakin tebal, maka semakin banyak energi foton yang dapat diserap dan menghasilkan banyak pasangan elektron-hole pada sambungan p-n.

Tabel 4.4 Performa sel surya berdasarkan variasi ketebalan lapisan tipe-i.

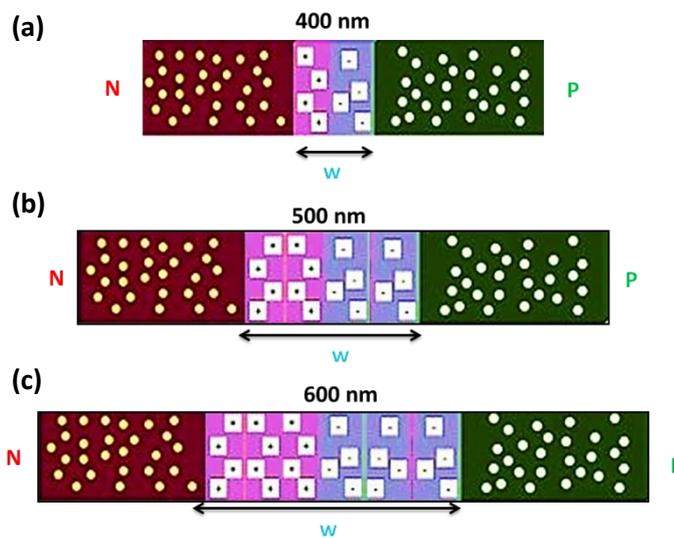
Sampel	Struktur	Lapisan Intrinsik		J_{sc} (A/m ²)	Voc (V)	FF (%)	Efisiensi (%)
		R H ₂ /SiH ₄	Tebal (nm)				
B	p-i ₂ -n	16	400	4,12x10 ⁻²	0,163	41,1	5,61
B ₂	p-i ₂ -n	16	500	6,05x10 ⁻²	0,251	41,6	5,69
B ₃	p-i ₂ -n	16	600	5,13x10 ⁻²	0,277	42,6	5,78

Sampel B dengan efisiensi yang telah optimum seperti yang dibahas pada bagian 4.2, divariasikan berdasarkan ketebalan lapisan intrinsik. Sampel B₂ dengan ketebalan lapisan intrinsik 500 nm menghasilkan efisiensi dan *fill factor* sebesar 5,69 % dan 41,6 %. Sampel B₃ dengan ketebalan lapisan intrinsik 600 nm menghasilkan efisiensi dan *fill factor* sebesar 5,78 % dan 42,6 %. Pengaruh variasi ketebalan terhadap performa kerja sel surya dapat dilihat pada Gambar 4.12.



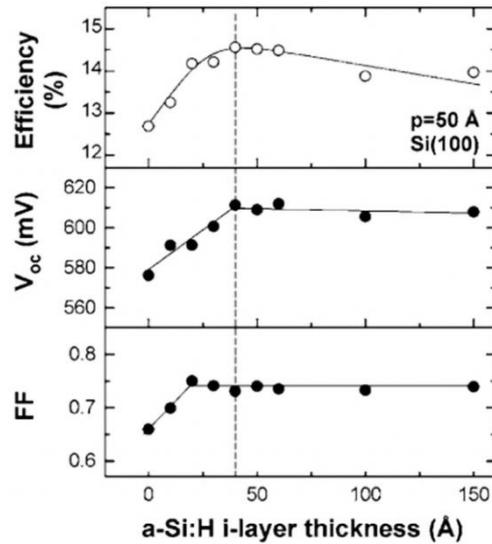
Gambar 4.12 Peningkatan performa (a) tegangan rangkaian terbuka, (b) rapat arus singkat dan (c) efisiensi sel surya terhadap variasi ketebalan lapisan intrinsik.

Dengan peningkatan ketebalan lapisan intrinsik dari 400-600 nm, diperoleh adanya kenaikan peforma sel surya. Dari ketebalan 400 nm, tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) mengalami kenaikan sebanyak 88,4 mV pada ketebalan 500 nm dan 114,1 mV pada ketebalan 600 nm. Rapat arus singkat (I_{sc}) mengalami kenaikan sebesar 0,193 mA dan 101 mA pada ketebalan 500 nm dan 600 nm berturut-turut. Keberhasilan peningkatan peforma melalui V_{oc} dan I_{sc} diindikasikan dengan peningkatan efisiensi sebesar 0,08% pada 500 nm dan 0,17% pada 600nm.



Gambar 4.13 Pelebaran daerah deplesi dan peningkatan ion *donor* dan *acceptor* sel surya dengan ketebalan lapisan tipe-i (a) 400 nm (b) 500 nm dan (c) 600 nm.

Gejala kenaikan peforma pada sel surya yang diiringi dengan kenaikan ketebalan lapisan intrinsik disebabkan oleh pelebaran daerah deplesi. Lapisan intrinsik yang semakin tebal akan menyebabkan daerah deplesi semakin lebar sehingga elektron dan hole sebagai ion donor dan penerima (*acceptor*) akan semakin banyak. Selain itu pelebaran daerah deplesi menyebabkan panjang difusi pembawa muatan minoritas pada lapisan semikonduktor sel surya a-Si:H bertambah panjang (*elongated diffusion length*) seperti pada Gambar 4.13. Waktu hidup (*lifetime*) pembawa muatan minoritas akan semakin lama sehingga arus hanyut (*drift current*) yang ditimbulkan bertambah besar.



Gambar 4.14 Karakteristik peforma sel surya p-i-n sebagai fungsi dari ketebalan lapisan a-Si:H tipe-i (Fujiwara dan kondo, 2007).

Peningkatan tegangan (V_{oc}) dan rapat arus (J_{sc}) pada pertambahan ketebalan lapisan tipe-i dapat disebabkan oleh pengaruh rapat keadaan cacat (*defect densities*). Semakin tebal lapisan tipe-i, semakin rendah rapat keadaan cacat pada lapisan yang mempengaruhi peningkatan peforma medan listrik dan pengumpul pembawa muatan. Pada penelitian yang telah dilakukan, Fujiwara memperoleh adanya peningkatan peforma sel surya dengan meningkatkan ketebalan lapisan tipe-I seperti pada Gambar 4.14. Peningkatan yang terjadi dikarenakan adanya penurunan rapat keadaan cacat. Proses rekombinasi pembawa muatan pada permukaan antar lapisan dapat ditekan secara efektif dengan optimasi ketebalan yang tepat. Apabila ketebalan lapisan tipe-i terlalu besar, maka akan membawa efek buruk pada kelistrikan. Rapat keadaan cacat diduga semakin meningkat dan pasangan elektron-hole tidak memiliki *lifetime* yang cukup untuk melewati daerah deplesi yang sangat tebal (Fujiwara dan Kondo, 2007).

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisa yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa :

1. Penggunaan rasio pelarutan gas hidrogen yang bervariasi ($R=0$ hingga $R=36$) dapat menurunkan celah pita energi lapisan intrinsik dari 1,9 eV menjadi 1,4 eV.
2. Celah pita energi lapisan intrinsik merupakan faktor dominan dalam penentuan efisiensi sel surya. Dengan variasi celah pita energi 1,4 eV, 1,6 eV dan 1,9 eV efisiensi yang diperoleh adalah 4,86%, 5,61% dan 5,37%.
3. Peningkatan ketebalan lapisan intrinsik dapat memperlebar daerah deplesi pada hubungan p-n sel surya. Peningkatan efisiensi yang diperoleh sebesar 5,61%, 5,69% dan 5,78% untuk ketebalan 400 nm, 500 nm, dan 600 nm.
4. Sel surya a-Si:H yang telah difabrikasi dengan PECVD memiliki titik optimum efisiensi 5,78% dengan celah pita energi 1,6 eV dan ketebalan 600 nm pada lapisan intrinsik.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah :

1. Perlu diteliti lebih lanjut efisiensi sel surya dengan ketebalan lapisan intrinsik yang ekstrim (> 600 nm) untuk mempelajari lebih dalam performa sel surya.
2. Lapisan tipe-n dan *back reflector* perlu dioptimasi untuk merefleksikan dan menyerap kembali energi foton yang lolos pada penyerapan lapisan intrinsik.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

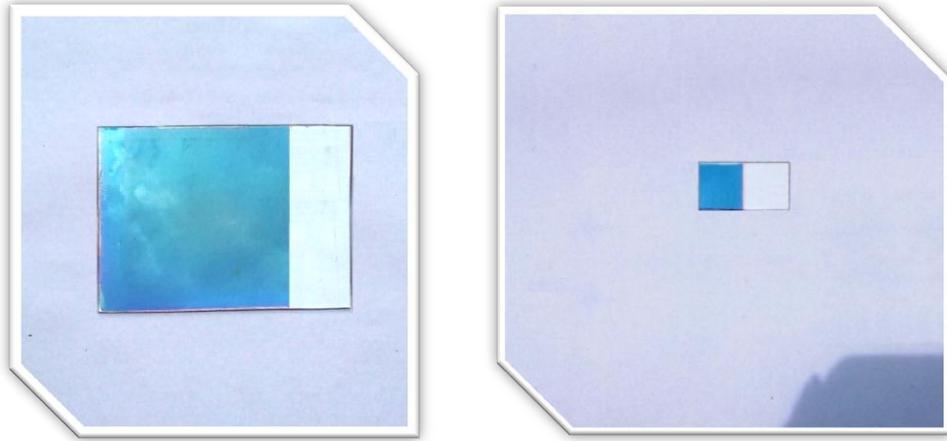
DAFTAR PUSTAKA

- A. Hajjiah, F. Duerinckx, M. Recamán Payo, I. Kuzma-Filipek, dan J. Poortmans, (2016), “The effect of surface morphology on the performance of 21% n-type PERT solar cells with an epitaxial rear emitter”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 151, hal. 139–148.
- Carlson, D.E., Wronski, C.R., (2003), “IIC-1 - Amorphous Silicon Solar Cells, in: Practical Handbook of Photovoltaics”, *Elsevier Science*, Amsterdam, hal. 281–315.
- Chen, Y.-H., Lin, C.-C., Liu, Y.-T., Lu, H.-W., Liu, J.-C., (2016), “Hydrogen dilution on an undoped silicon oxide layer and Its application to amorphous silicon thin-film solar cells”, *Mater Science Semiconductor Proces*, vol. 41, hal. 312–316.
- Deng, X., Schiff, E.A., (2003), “Amorphous Silicon-Based Solar Cells”, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, John Wiley & Sons Ltd., hal. 505–565.
- Grove, A.S., (1967), “*Physics and Technology of Semiconductor Devices*”, 1st edition, Wiley, New York.
- H. Fujiwara and M. Kondo, (2007), “Effects of a-Si:H layer thicknesses on the performance of a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells,” *J. Appl. Phys.*, vol. 101, no. 5, hal. 54516.
- H. P. Zhou, S. Xu, and S. Q. Xiao, (2016), “High-Density Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition of Si-Based Materials for Solar Cell Applications”.
- Hussin, M.Z., Shaari, S., Omar, A.M., Zain, Z.M., (2015), “*Amorphous silicon thin-film: Behavior of light-induced degradation*”, *Renew. Sustain. Energy Rev.* vol. 43, hal. 388–402.
- McEvoy, A., Markvart, T., Castaner, L. (Eds.), (2011), “*Practical Handbook of Photovoltaics*”, 2nd Edition: Fundamentals and Applications, Academic Press, New York.
- M. Sharma, S. Juneja, S. Sudhakar, D. Chaudhary, dan S. Kumar, (2016), “Optimization of a-Si:H absorber layer grown under a low pressure regime by plasma-enhanced chemical vapor deposition: Revisiting the significance of the p/i interface for solar cells”, *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 43, hal. 41–46.
- M. Sharma, S. Kumar, N. Dwivedi, S. Juneja, A. K. Gupta, S. Sudhakar, dan K. Patel, (2013), “Optimization of band gap, thickness and carrier concentrations for the development of efficient microcrystalline silicon solar cells: A theoretical approach”, *Sol. Energy*, vol. 97, hal. 176–185.
- T. Dzhafarov, (2013), “Silicon Solar Cells with Nanoporous Silicon Layer”, *Solar Cells - Research and Application Perspectives*, A. Morales-Acevedo, Ed. InTech.
- Poortmans, J., Arkhipov, V., (2006), “*Thin Film Solar Cells: Fabrication, Characterization and Applications*”, 1 edition. ed. Wiley, Chichester, England, Hoboken, NJ.

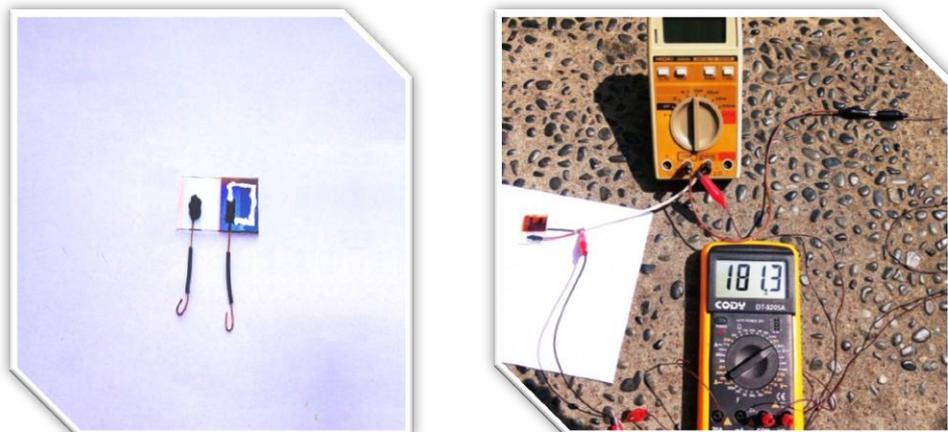
- Prušáková, L., Vavruňková, V., Netrvalová, M., Müllerová, J., Šutta, P., (2010), “Optical and structural characterization of inhomogeneities in a-Si:H TO $\mu\text{c-Si}$ transition. Vacuum”, *Proceedings of the 4th Symposium on Vacuum based Science and Technology*, Kołobrzeg (PL) 85, hal. 502–505.
- Singh, S., Kumar, S., Dwivedi, N., (2012), “Band gap optimization of p–i–n layers of a-Si:H by computer aided simulation for development of efficient solar cell”, *Sol. Energy*, volume 86, hal. 1470–1476.
- Smits, F.M., (1958), “Measurement of Sheet Resistivities with the Four-Point Probe”, *Bell Syst. Tech. J.* vol.37, hal. 711–718.
- Staebler, D.L., Wronski, C.R., (1977), “Reversible conductivity changes in discharge-produced amorphous Si”, *Applied Physics Lett.* 31, hal. 292–294.
- Suprianto, (2012), “Studi Karakteristik I-V Sel Surya p-i-n Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H)”, *Thesis Magister ITS*, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya.
- Sze, S.M., Lee, M.-K., (2012), *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, 3rd edition. ed. Wiley, Hoboken, N.J.
- Takahashi, K., Konagai, M., (1986), *Amorphous silicon solar cells*, John Wiley and Sons Canada.
- 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.

LAMPIRAN 1
DOKUMENTASI PENELITIAN

- (a) Sel surya p-i-n yang dideposisi pada substrat kaca $10 \times 10 \text{ cm}^2$ yang terlapisi ITO dan sampel dengan ukuran sel $1 \times 1 \text{ cm}^2$



- (b) Preparasi kontak ohmik pada sel surya dan rangkaian proses uji karakteristik i-v dibawah penyinaran sinar matahari langsung.

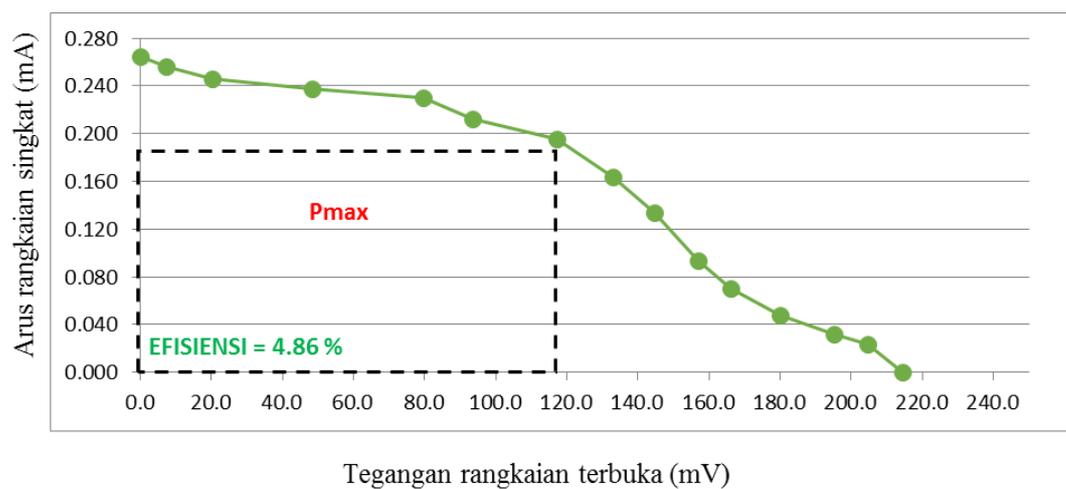


LAMPIRAN 2

UJI KARAKTERISTIK I-V

(a) Karakteristik i-v sampel A

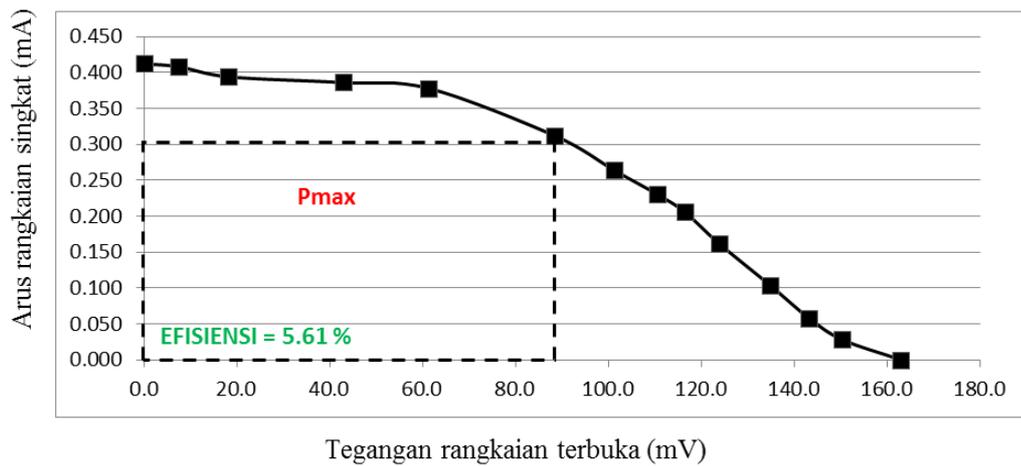
Tipe	Laju Deposisi (nm/s)	Parameter	Tebal (nm)	Energi Gap	
PL3	10 MENIT	Tekanan	480 mTorr	Dummy (Sample Out)	
		Suhu	210 °C		
		Daya RF	5 Watt		
		Gas SiH ₄	20 sccm		
P	0.072	Tekanan	480 mTorr	64.80	2,0 eV
		Suhu	210 °C		
		Daya RF	5 Watt		
		Gas SiH ₄	20 sccm		
		Gas B ₂ H ₆	2 sccm		
		Gas H ₂	40 sccm		
I3	0.0417	Tekanan	2000 mTorr	400.0	1,4 eV
		Suhu	250 °C		
		Daya RF	5 Watt		
		Gas SiH ₄	2.5 sccm		
		Gas H ₂	90 sccm		
		Waktu	160 menit		
PL3	10 MENIT	Tekanan	530 mTorr	Dummy (Sample Out)	
		Suhu	210 °C		
		Daya RF	5 Watt		
		Gas SiH ₄	20 sccm		
N	0.12	Tekanan	530 mTorr	36.0	2,2 eV
		Suhu	210 °C		
		Daya RF	5 Watt		
		Gas SiH ₄	20 sccm		
		Gas PH ₄	5 sccm		
		Gas H ₂	20 sccm		
		Waktu	15 menit		



Luas (m ²)	Intensitas (W/m ²)	Isc (mA)	Voc (mV)	Pmax (mW)	FF (%)	Efisiensi (%)
0.0001	821	0.265	214.4	22.97	40.4	4.86

(b) Karakteristik i-v sampel B

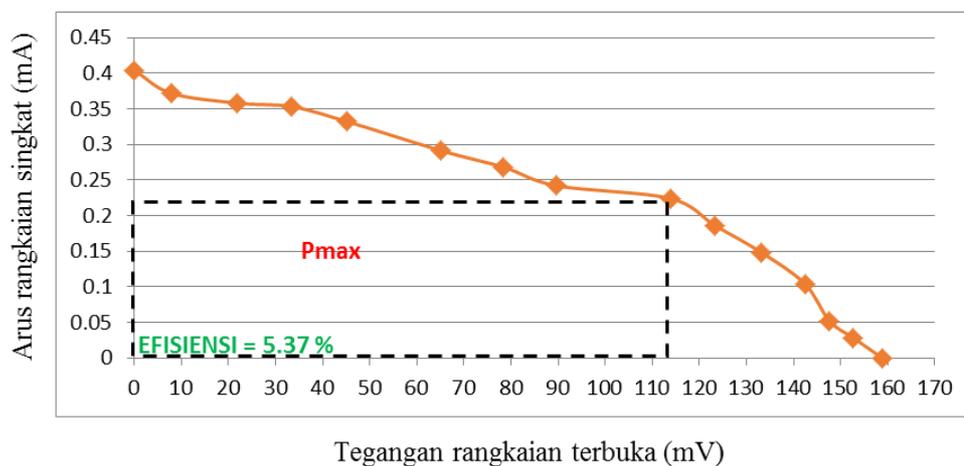
Tipe	Laju Deposisi (nm/s)	Parameter		Tebal (nm)	Energi Gap
PL3	10 MENIT	Tekanan	480 mTorr	Dummy (Sample Out)	
		Suhu	210 °C		
		Daya RF	5 Watt		
		Gas SiH ₄	20 sccm		
P	0.072	Tekanan	480 mTorr	64.80	2,0 eV
		Suhu	210 °C		
		Daya RF	5 Watt		
		Gas SiH ₄	20 sccm		
		Gas B ₂ H ₆	2 sccm		
		Gas H ₂	40 sccm		
		Waktu	15 menit		
I ₂	0.0117	Tekanan	2000 mTorr	400.0	1,6 eV
		Suhu	270 °C		
		Daya RF	10 Watt		
		Gas SiH ₄	2.5 sccm		
		Gas H ₂	40 sccm		
		Waktu	570 menit		
		R	16.00		
PL3	10 MENIT	Tekanan	530 mTorr	Dummy (Sample Out)	
		Suhu	210 °C		
		Daya RF	5 Watt		
		Gas SiH ₄	20 sccm		
N	0.12	Tekanan	530 mTorr	36.0	2,2 eV
		Suhu	210 °C		
		Daya RF	5 Watt		
		Gas SiH ₄	20 sccm		
		Gas PH ₄	5 sccm		
		Gas H ₂	20 sccm		
		Waktu	15 menit		



Luas (m ²)	Intensitas (W/m ²)	Isc (mA)	Voc (mV)	Pmax (mW)	FF (%)	Efisiensi (%)
0.0001	829	0.412	163.0	27.58	41.1	5.61

(c) Karakteristik i-v sampel C

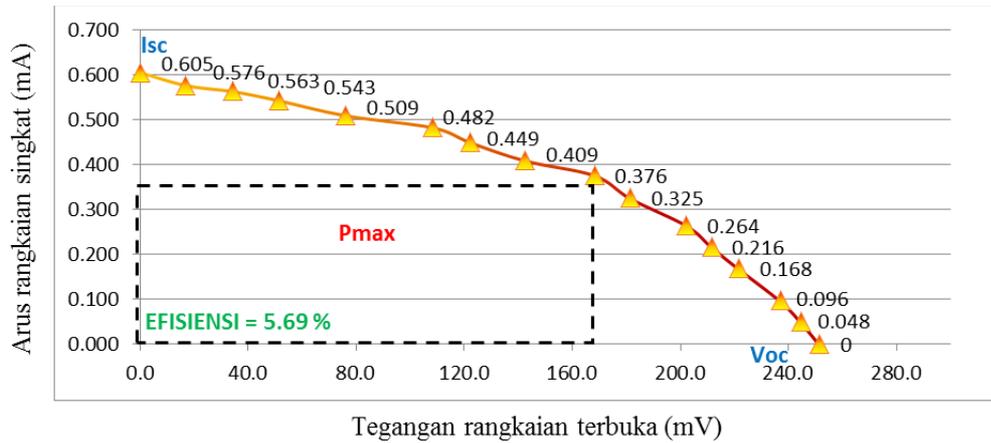
Tipe	Laju Deposisi (nm/s)	Parameter		Tebal (nm)	Energi Gap
PL3	10 MENIT	Tekanan	480 mTorr	Dummy (Sample Out)	
		Suhu	210 °C		
		Daya RF	5 Watt		
		Gas SiH ₄	20 sccm		
P	0.072	Tekanan	480 mTorr	64.80	2,0 eV
		Suhu	210 °C		
		Daya RF	5 Watt		
		Gas SiH ₄	20 sccm		
		Gas B ₂ H ₆	2 sccm		
		Gas H ₂	40 sccm		
Waktu	15 menit				
I1	0.0282	Tekanan	2000 mTorr	400.0	1,9 eV
		Suhu	270 °C		
		Daya RF	10 Watt		
		Gas SiH ₄	2.5 sccm		
		Gas H ₂	0 sccm		
		Waktu	236 menit		
R	0.00				
PL3	10 MENIT	Tekanan	530 mTorr	Dummy (Sample Out)	
		Suhu	210 °C		
		Daya RF	5 Watt		
		Gas SiH ₄	20 sccm		
N	0.12	Tekanan	530 mTorr	36.0	2,2 eV
		Suhu	210 °C		
		Daya RF	5 Watt		
		Gas SiH ₄	20 sccm		
		Gas PH ₄	5 sccm		
		Gas H ₂	20 sccm		
Waktu	15 menit				



Luas (m ²)	Intensitas (W/m ²)	Isc (mA)	Voc (mV)	Pmax (mW)	FF (%)	Efisiensi (%)
0.0001	824	0.404	158.8	25.49	39.7	5.37

(d) Karakteristik i-v sampel B₂ (Tebal lapisan tipe-i = 500 nm)

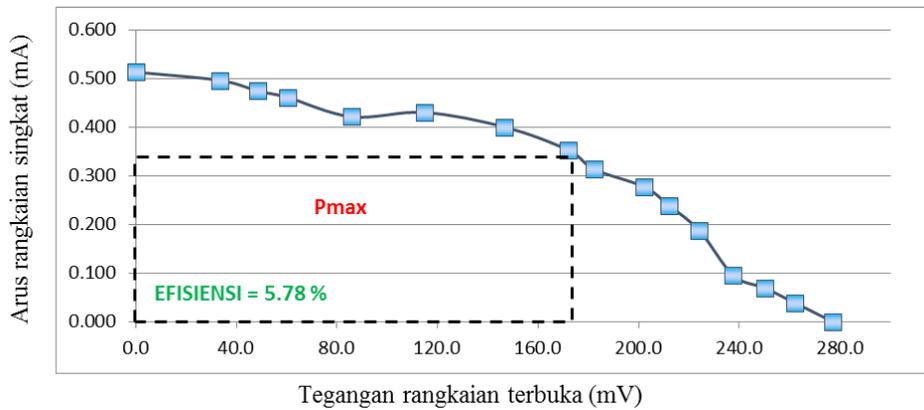
Tipe	Laju Deposisi (nm/s)	Parameter		Tebal (nm)	Energi Gap
PL3	10 MENIT	Tekanan	480 mTorr	Dummy (Sample Out)	
		Suhu	210 °C		
		Daya RF	5 Watt		
		Gas SiH ₄	20 sccm		
P	0.072	Tekanan	480 mTorr	64.80	2,0 eV
		Suhu	210 °C		
		Daya RF	5 Watt		
		Gas SiH ₄	20 sccm		
		Gas B ₂ H ₆	2 sccm		
		Gas H ₂	40 sccm		
I ₂	0.0117	Tekanan	2000 mTorr	500.0	1,6 eV
		Suhu	270 °C		
		Daya RF	10 Watt		
		Gas SiH ₄	2.5 sccm		
		Gas H ₂	40 sccm		
		Waktu	712 menit		
PL3	10 MENIT	Tekanan	530 mTorr	Dummy (Sample Out)	
		Suhu	210 °C		
		Daya RF	5 Watt		
		Gas SiH ₄	20 sccm		
N	0.12	Tekanan	530 mTorr	36.0	2,2 eV
		Suhu	210 °C		
		Daya RF	5 Watt		
		Gas SiH ₄	20 sccm		
		Gas PH ₄	5 sccm		
		Gas H ₂	20 sccm		
		Waktu	15 menit		



Luas (m ²)	Intensitas (W/m ²)	Isc (mA)	Voc (mV)	Pmax (mW)	FF (%)	Efisiensi (%)
0.0001	814	0.605	251.4	63.24	41.6	5.69

(e) Karakteristik i-v sampel B₃ (Tebal lapisan tipe-i = 600 nm)

Tipe	Laju Deposisi (nm/s)	Parameter	Tebal (nm)	Energi Gap	
PL3	10 MENIT	Tekanan	480 mTorr	Dummy (Sample Out)	
		Suhu	210 °C		
		Daya RF	5 Watt		
		Gas SiH ₄	20 sccm		
P	0.072	Tekanan	480 mTorr	64.80	2,0 eV
		Suhu	210 °C		
		Daya RF	5 Watt		
		Gas SiH ₄	20 sccm		
		Gas B ₂ H ₆	2 sccm		
		Gas H ₂	40 sccm		
I ₂	0.0117	Tekanan	2000 mTorr	600.0	1,6 eV
		Suhu	270 °C		
		Daya RF	10 Watt		
		Gas SiH ₄	2.5 sccm		
		Gas H ₂	40 sccm		
		Waktu	855 menit		
PL3	10 MENIT	Tekanan	530 mTorr	Dummy (Sample Out)	
		Suhu	210 °C		
		Daya RF	5 Watt		
		Gas SiH ₄	20 sccm		
N	0.12	Tekanan	530 mTorr	36.0	2,2 eV
		Suhu	210 °C		
		Daya RF	5 Watt		
		Gas SiH ₄	20 sccm		
		Gas PH ₄	5 sccm		
		Gas H ₂	20 sccm		
		Waktu	15 menit		

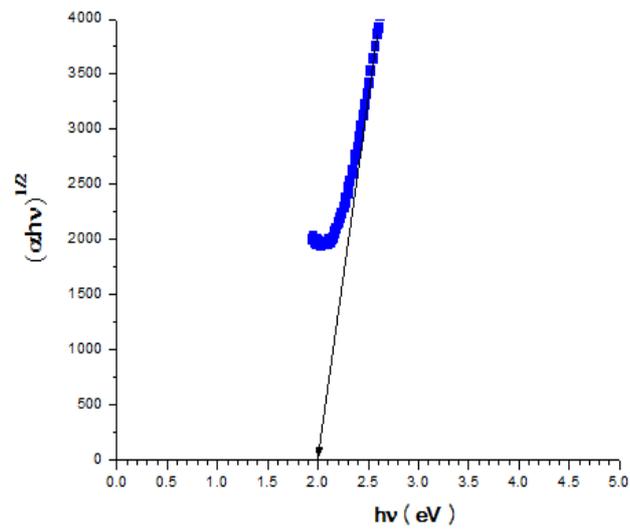
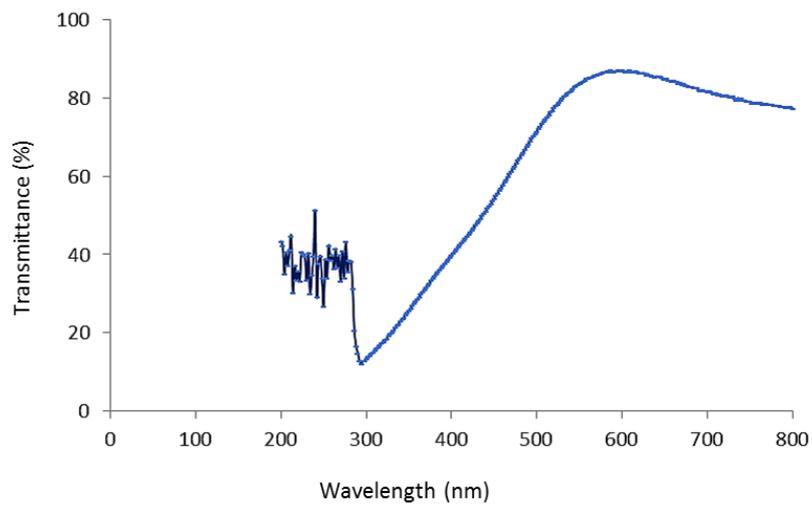


Luas (m ²)	Intensitas (W/m ²)	Isc (mA)	Voc (mV)	Pmax (mW)	FF (%)	Efisiensi (%)
0.0001	803	0.513	277.1	60.59	42.6	5.78

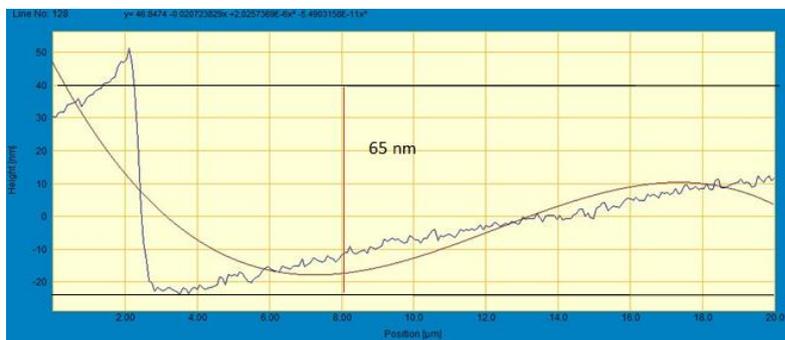
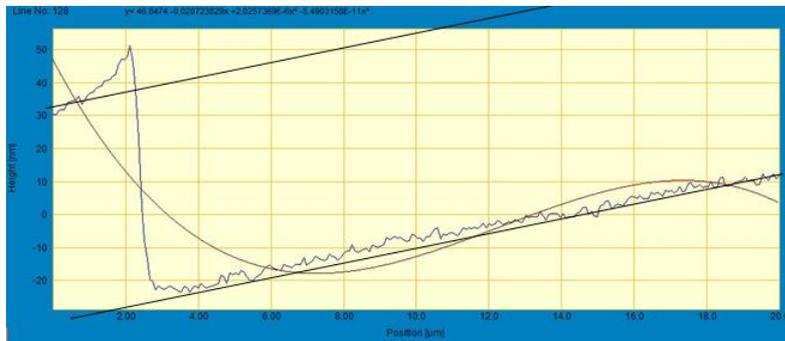
LAMPIRAN 3

UJI LAJU DEPOSISI DAN CELAH PITA ENERGI LAPISAN TIPE-p

- (a) Grafik Transmittansi Lapisan a-Si:H Tipe-p laju H₂ 40 sccm dan Tauc Plot (Ayunis Sholehah, 2017) :



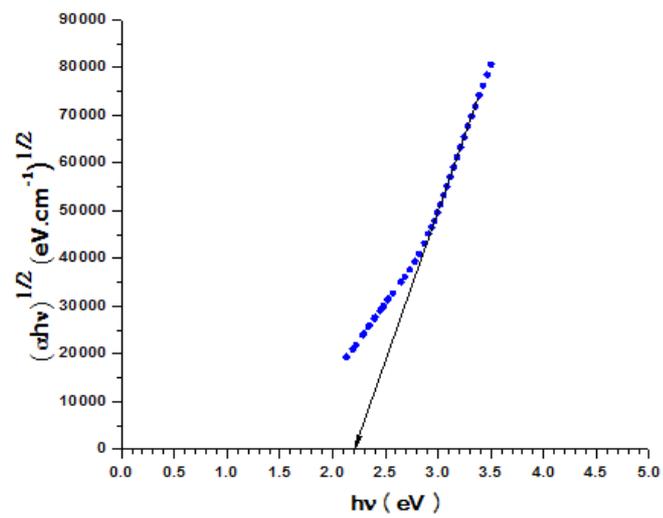
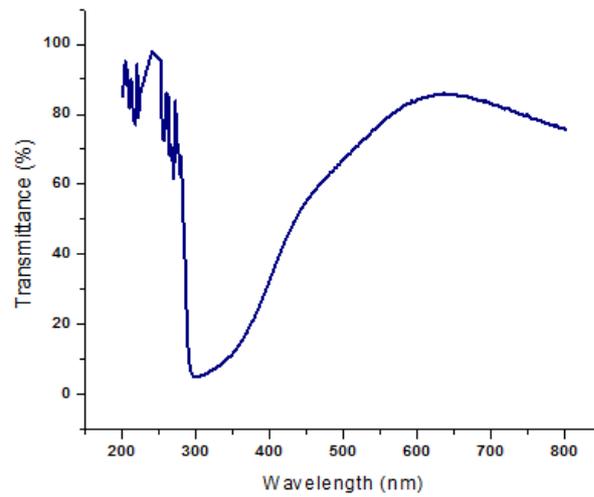
(b) Hasil pengukuran ketebalan AFM untuk memperoleh laju deposisi



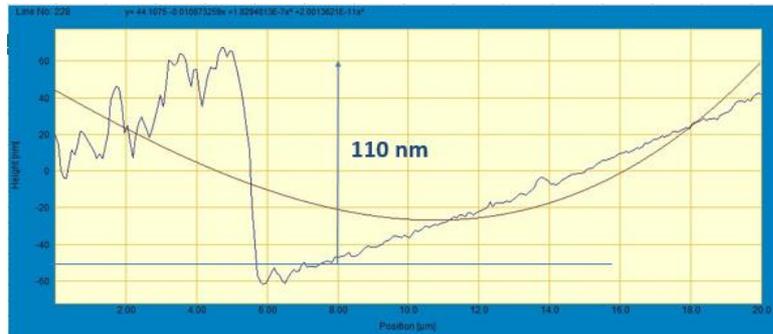
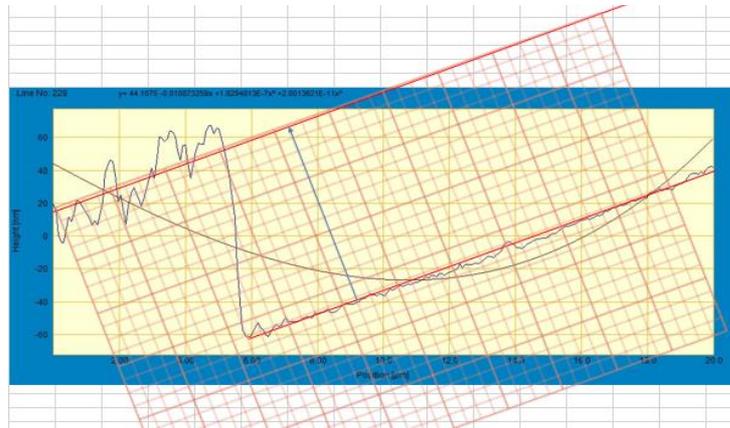
LAMPIRAN 4

UJI LAJU DEPOSISI DAN CELAH PITA ENERGI LAPISAN TIPE-n

- (a) Grafik Transmittansi Lapisan a-Si:H Tipe-n laju H₂ 20 sccm dan Tauc Plot (C.F. Kresna Murti, 2017) :



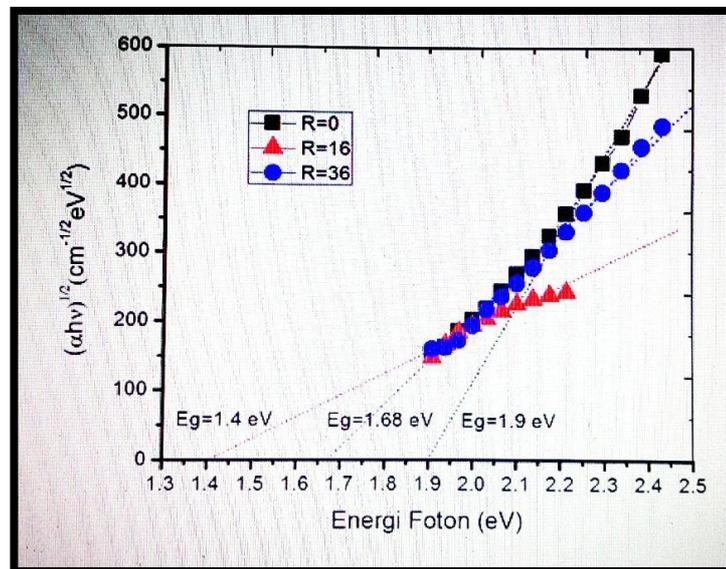
(b) Hasil pengukuran ketebalan AFM untuk memperoleh laju deposisi



LAMPIRAN 5

UJI CELAH PITA ENERGI LAPISAN TIPE-i

Perhitungan celah pita energi untuk lapisan intrinsik. Simbol kotak hitam untuk lapisan intrinsik dengan rasio pelarutan hidrogen $R = 0$ diperoleh celah pita energi 1.9 eV. Simbol segitiga merah untuk rasio pelarutan hidrogen $R = 16$ diperoleh celah pita energi 1.6 eV. Simbol biru untuk rasio pelarutan hidrogen $R = 36$ diperoleh celah pita energi 1.4 eV.



LAMPIRAN 6
UJI KONDUKTIVITAS LAPISAN p-i-n

No	Lapisan	Luas Sel	Tegangan Vab (V)	Arus (mA)	Konduktivitas (S/cm)
1	Tipe-p	1 x 1 cm ²	0.647	96.2	1.74 x 10 ⁻³
2	Tipe-i ₁		2.53	30.2	7.46 x 10 ¹
3	Tipe-i ₂		1.47	20.4	8.67 x 10 ¹
4	Tipe-i ₃		1.59	16.4	6.45 x 10 ¹
5	Tipe-n		0.461	64.3	3.15 x 10 ⁻³

BIOGRAFI PENULIS



Penulis Ignatio Benigno, biasa disapa Nino, lahir pada tanggal 21 Oktober 1993 di Surabaya. Penulis memulai pendidikan formal di TK Bethany Nginden. Pendidikan dilanjutkan di SDN 614 Semolowaru, SMPN 23 Surabaya dan SMAK Seminari St. Vincentius a Paulo Garum-Blitar. Pada tahun 2011 penulis melanjutkan pendidikannya melalui studi kuliah Jurusan Pendidikan Fisika di Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya. Semasa kuliah penulis aktif dalam kegiatan rohani di universitas dan mengikuti organisasi Lembaga Pers Mahasiswa. Setelah lulus pada tahun 2015, penulis sempat mengajar Matematika dan Fisika selama 1 semester di SMAK St. Hendrikus Surabaya. Pada Agustus 2015, penulis melanjutkan masa studi di Progam Pascasarjana Fisika FMIPA Institut Teknologi Sepuluh November (ITS) Surabaya dengan bidang Fisika Material. Penulis menyelesaikan penelitian tesis dengan tema Sel Surya dan lulus pada tahun 2017.