



TUGAS AKHIR - SF 141501

**STUDI PENGARUH ANIL PADA SIFAT SILIKON
AMORF TERHIDROGENASI (A-Si:H) YANG
DITUMBUHKAN DENGAN METODE PECVD**

**Fuad Darul Muttaqin
NRP 1110 100 051**

**Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Darminto, M.Sc**

**Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015**



FINAL PROJECT - SF 141501

**STUDY ON THE EFFECT OF ANNEALING ON
PROPERTIES OF HYDROGENATED
AMORPHOUS SILICON (a-Si:H) DEPOSITED
USING PECVD METHOD**

**Fuad Darul Muttaqin
NRP 1110100 051**

**Advisor
Prof. Dr. Darminto, M.Sc**

**Department of Physics
Faculty of Mathematics and Natural Science
Tenth Nopember of Technology Institute
Surabaya 2015**

**STUDI PENGARUH ANIL PADA SIFAT SILIKON
AMORF TERHIDROGENASI (A-Si:H) YANG
DITUMBUHKAN DENGAN METODE PECVD**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Sains
pada
Bidang Fisika Material
Program Studi S-1 Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

FUAD DARUL MUTTAQIN
NRP 1110100051

Disetujui oleh Tim Pembimbing Tugas Akhir

Prof. Dr. Darminto, M.Sc.
NIP. 19600303 198701.1.002



Surabaya, Januari 2015



**STUDI PENGARUH ANIL PADA SIFAT SILIKON
AMORF TERHIDROGENASI (A-Si:H) YANG
DITUMBUHKAN DENGAN METODE PECVD**

Nama : Fuad Darul Muttaqin
NRP : 1110100051
Jurusan : Fisika, FMIPA-ITS
Pembimbing : Prof. Dr. Darminto, M.Sc

Abstrak

Telah dilakukan penelitian pengaruh perlakuan anneal pada silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:h) yang ditumbuhkan dengan metode Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD). Penelitian dilakukan menggunakan substrat kaca dan gas prekursor silan (SiH₄) dan hidrogen (H₂). Perlakuan panas anil untuk sampel dengan film dilakukan dengan variasi temperatur pada 200°C, 300°C, dan 400°C. Pemanasan opada suhu 300°C dilakukan selama 30 menit, 60 menit, dan 90 menit. Karakterisasi dilakukan menggunakan XRD, FTIR, dan UV-Vis. Nilai kristalinitas didapatkan pada nilai antara 3.26% – 6.8%. Celah energi semua film antara 1.707 – 1.750 eV, dengan energi Urbach didapatkan pada nilai antara 0.214 – 0.269 eV. Kandungan dangling bond berkisar antara $1.16 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ – $2.24 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Dari penelitian ini diketahui bahwa proses anil mempengaruhi rapat keadaan “dangling bond”, celah energi, energi urbach, % kristalinitas.

Kata kunci : a-Si:H, sel surya, PECVD, dan anill.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**STUDY ON THE EFFECT OF ANNEALING ON
PROPERTIES OF HYDROGENATED AMORPHOUS
SILICON (a-Si:H) DEPOSITED USING PECVD METHOD**

Name : Fuad Darul Muttaqin
NRP : 1110100051
Major : Physics, FMIPA-ITS
Advisor : Prof. Dr. Darminto, M.Sc

Abstract

Effect of annealing treatment on the hydrogenated amorphous silicon (a-Si: H) grown by Plasma Enhanced Chemical Vapour method Deposition (PECVD) method has been conducted. The a-Si films have been deposited on glass substrate using precursors of silane (SiH₄) and hydrogen (H₂). Annealing of film has been performed at various temperature of 200 ° C, 300 ° C, and 400 ° C. Annealing at 300oC was conducted for 30 60, and 90 minutes. Characterization employing XRD, FTIR, and UV-Vis were carried out for the films. The films' crystallinity was obtained between 3.26% – 6.8%, while the value of energy gap is between 1.707 – 1.750 eV; Urbach energy about 0.214 - 0.269 eV; and dangling bond state density is around $1.164 - 2.23 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. From this research, it has been known that annealing process has affected the state density of dangling bond, energy gap and urbach energy as well as cristallinity.

Key word : a-Si:H, solar cell, PECVD, dan anneal.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah penulis ucapkan kepada ALLAH SWT karena atas berkah, rahmat, dan petunjukNya atas iman, islam, dan ikhsan yang diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir (TA) ini dengan optimal dan tanpa suatu kendala apapun. Sholawat serta salam tetap tercurahkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW yang telah menuntun kami dari kebodohan menuju cahaya kebenaran.

Tugas Akhir (TA) ini penulis susun untuk memenuhi persyaratan menyelesaikan pendidikan strata satu jurusan Fisika ITS. Tugas Akhir dengan judul :

“Studi Pengaruh Anneal Pada Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H) Yang Ditumbuhkan Dengan Metode Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD)”

Penulis persembahkan kepada masyarakat Indonesia guna berpartisipasi untuk mengembangkan ilmu pegetahuan dalam bidang sains dan teknologi.

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang membantu penyusunan laporan Tugas Akhir (TA) dan proses penelitiannya.

1. Kedua orang tua tercinta. Ibunda Isbandiyah dan Ayahanda Tamamul Abrori, S.Pd.I yang telah memberikan semua hal terbaik bagi penulis sejak kecil sampai dewasa.
2. Kakak Syamsul Hanif Hardiyana, S.Pd. dan Kakak Dian Rifa Nurhayati, S.Kep. yang telah memberikan support kepada penulis disaat penulis hampir putus asa dengan trial penelitian yang cukup lama.

3. Bapak Prof. Dr. Darminto, M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah memberi pengarahan selama proses penelitian dan penyusunan laporan.
4. Bapak Yoyok Cahyono, M.Si yang telah membantu penulis dalam proses penelitian di lapangan.
5. Bapak Dr. Yono Hadi Pramono ibu Dr. Melania Suweni Muntini selaku ketua dan sekretariat Jurusan Fisika ITS.
6. Bapak Sholih selaku laboran di Laboratorium Fisika Material.
7. Mbak Vita selaku laboran di laboratorium Sel Seurya LPPM ITS yang telah banyak banyak membantu penulis selama proses percobaan.
8. Mbak Russalia Istiani sebagai laboran Laboratorium Teknik Material tempat penulis menguji sampel hasil penelitian.
9. Segenap teman-teman Fisika Cosmic 2010 yang telah memberikan support terbaik bagi penulis. Terima kasih Cosmic atas pelajaran berharga yang membuat kami menjadi sebuah keluarga.
10. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari dalam penyusunan laporan ini masih terdapat kesalahan. Mohon kritik dan saran pembaca guna menyempurnakan laporan ini. Akhir kata semoga laporan Tugas Akhir ini bermanfaat bagi semua pihak. Amiin Ya Rabbal Alamiin.

Surabaya, Januari 2015

Penulis
fuad.al-muttaqin@gmail.com

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
COVER PAGE	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Material Semikonduktor dan Sel Surya	5
2.2 Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H)	7
2.3 Efisiensi Sel Surya dan Spektrum Sinar Matahari	9
2.4 Prinsip Dasar Proses PECVD.....	10

2.5 Sifat Optik	16
2.6 Efek Stabler-Worski	21
BAB III METODOLOGI.....	23
3.1 Bahan dan Peralatan Penelitian	23
3.2 Tahapan Penelitian	24
3.2.1 Deposisi	24
3.2.2 Anil Pasca Deposisi.....	25
3.2.3 Anil Untuk Substrat Tanpa Film	26
3.2.4 Karakterisasi.....	26
3.2.4.1 Difraksi Sinar-X (XRD)	26
3.2.4.2 Fourier Transfor Infra-Red (FTIR).....	28
3.2.4.3 Spektroskopi Ultraviolet-Visual (UV-Vis)...	30
3.3 Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir.....	32
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	35
4.1 Analisis Pembuatan Lapisan Tipis a-Si:H.....	35
4.2 Analisa Karakterisasi XRD	36
4.3 Analisa Hasil Karakterisasi FTIR.....	39
4.3.1 Analisa Puncak Absorbansi Berdasar Referensi	43
4.3.2 Perhitungan Konsentrasi Hidrogen Dalam Film	46
4.4 Analisis Karakterisasi Spektrometer UV-Vis.....	48
4.4.1 Perhitungan Tebal Lapisan Deposisi.....	50
4.4.2 Penentuan Energi Gap	53
4.4.3 Penentuan Energi Urbach.....	55
4.4.4 Hubungan Energi Gap dan Energi Urbach.....	57
4.5 Rapat Keadaan Silikon dan Hidrogen Dalam Film	58
4.6 Faktor Yang Mempengaruhi Energi Gap	61
BAB V KESIMPULAN.....	63
5.1 Kesimpulan.....	63
5.2 Saran.....	64
DAFTAR PUSTAKA	65

LAMPIRAN	69
BIOGRAFI PENULIS	95

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1. Kristalitas Film menggunakan HSP	37
Tabel 4.2. Puncak intensitas dan strukturkimia referensi	44
Tabel 4.3. Rapat keadaan hidrogen	46
Tabel 4.4. Hasil perhitungan tebal lapisan deposisi (dalam μm)	51
Tabel 4.5. Hasil perhitungan energi gap (eV)	53
Tabel 4.6. Hasil perhitungan energi urbach (eV)	55
Tabel 4.7. Rapat keadaan spin elektron.....	58

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur pita energi dalam material semikonduktor	.5
Gambar 2.2 Proses konversi cahaya menjadi listrik	7
Gambar 2.3 Struktur Silikon Kristal dan amorf	8
Gambar 2.4 Density of electronic states dari silikon amorf terhidrogenasi a-Si:H, memperlihatkan band tail state dan dangling bond	9
Gambar 2.5 Spektrum cahaya matahari.....	10
Gambar 2.6. Bagan PECVD.....	12
Gambar 2.7 Proses deposisi menggunakan PECVD	13
Gambar 2.8 Transisi optik: (a) transisi langsung yang diizinkan dan (b) transisi langsung yang terlarang; (c) transisi tidak langsung menyertakan emisi fonon (panah keatas) dan absorpsi fonon (panah kebawah)	18
Gambar 2.9 Koefisien absorpsi optik	19
Gambar 2.10 Efek Staebler-Worski pada <i>single-junction</i> dan <i>triple-junction</i>	22
Gambar 3.1 XRD ‘Philips X’ Pert PRO.....	27
Gambar 3.2 Interferometer Michelson pada FTIR	28
Gambar 3.3 Jenis vibrasi <i>stretching</i>	29

Gambar 3.4 Jenis vibrasi <i>bending</i>	30
Gambar 3.5 Jalur sinar pada Spektrometer UV-Vis	31
Gambar 3.6 Spektrometer UV-Vis “GENESYS 10S UV-Vis” di Laboratorium Zat Padat.....	31
Gambar 3.7 Diagram alir untuk sampel tanpa film	32
Gambar 3.8 Diagram alir untuk sampel dengan film.	33
Gambar 4.1 Foto sampel setelah perlakuan anneal	36
Gambar 4.2 Hasil karakterisasi XRD	37
Gambar 4.3 Kristalinitas untuk variasi temperatur.....	38
Gambar 4.4 Kristalinitas untuk variasi waktu	38
Gambar 4.5 Grafik hasil karakterisasi FTIR untuk film tanpa anneal	39
Gambar 4.6 Grafik hasil karakterisasi FTIR untuk variasi temperatur	40
Gambar 4.7 Grafik hasil karakterisasi FTIR untuk variasi waktu	40
Gambar 4.8 Grafik pencocokan posisi puncak untuk sampel tanpa film (biru) dan dengan film (hijau) untuk sampel tanpa anneal.....	41
Gambar 4.9 Grafik pencocokan posisi puncak untuk sampel tanpa film (biru) dan dengan film (hijau) untuk T=200°C	42

Gambar 4.10 Grafik pencocokan posisi puncak untuk sampel tanpa film (biru) dan dengan film (hijau) untuk $T=300^{\circ}\text{C}$	42
Gambar 4.11 Grafik pencocokan posisi puncak untuk sampel tanpa film (biru) dan dengan film (hijau) untuk $T=400^{\circ}\text{C}$	43
Gambar 4.12 Grafik Pencocokan puncak data dan referensi untuk variasi temperatur	45
Gambar 4.13 Grafik Pencocokan puncak data dan referensi untuk variasi waktu	45
Gambar 4.14 Rapat keadaan hidrogen untuk variasi temperatur.	47
Gambar 4.15 Rapat keadaan hidrogen untuk variasi waktu	47
Gambar 4.16 Nilai transmitansi untuk variasi temperatur.....	49
Gambar 4.17 Nilai transmitansi untuk variasi waktu	49
Gambar 4.18 Tebal film untuk variasi temperatur	52
Gambar 4.19 Tebal film untuk variasi waktu.....	52
Gambar 4.20 Energi Gap untuk variasi temperatur	54
Gambar 4.21 Energi Gap untuk variasi waktu	54
Gambar 4.22 Energi urbach untuk variasi temperatur.....	56
Gambar 4.23 Energi urbach untuk variasi waktu	56
Gambar 4.24 Hubungan antara energi gap dan energi urbach	57

Gambar 4.25 Rapat keadaan untuk variasi temperatur	59
Gambar 4.26 Rapat keadaan untuk variasi waktu	59
Gambar 4.27 Hubungan antara rapat keadaan Si-H dengan <i>dangling bond</i>	61
Gambar 4.28 Hubungan antara energi gap dan % kristalinitas...	52
Gambar 4.29 Hubungan antara energi gap dan rapat keadaan <i>dangling bond</i>	52

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A	Grafik Hasil Karakterisasi XRD69
LAMPIRAN B	Grafik Hasil Karakterisasi FTIR.....73
LAMPIRAN C	Data Hasil Karakterisasi Menggunakan Spektroskopi UV-Vis.....79
LAMPIRAN D	Tabel Perhitungan Tebal Lapisan Menggunakan Persamaan Swanepoel.....85
LAMPIRAN E	Grafik Penentuan Energi Gap Menggunakan Metode Tauc Plot.....87
LAMPIRAN F	Grafik Penentuan Energi Urbach91

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Selama satu dekade terakhir konsumsi energi dunia mengalami peningkatan secara dramatis karena berbagai alasan, terutama peningkatan populasi dunia, kebutuhan sektor industri dan transportasi. Pasokan energi tersebut dipenuhi oleh dua kategori, yaitu sumber energi terbarukan dan sumber energi tidak-terbarukan. Sumber energi terbarukan adalah sumber energi yang dihasilkan dari sumber daya yang bersifat alami, seperti air, angin, panas bumi, panas / sinar matahari, pasang surut air laut, dll. Sedangkan energi tidak-terbarukan berasal dari sumber energi yang terbatas, berkurang karena pemakaian, dan pada akhirnya dapat habis. Bahan bakar fosil dan nuklir masuk dalam kategori ini.

Pada tahun 1990, pemenuhan konsumsi energi didominasi oleh bahan bakar fosil yaitu minyak, batu bara, dan gas dengan prosentase masing-masing 36%, 30%, 19%, dan 15% sisanya dari sumber energi terbarukan. Sedangkan pada tahun 2013 penggunaan bahan bakar fosil mengalami penurunan hampir 10%, dan tergantikan dengan sumber energi nuklir dan sumber energi terbarukan [REN, 2014].

Seiring dengan waktu, kebutuhan energi dunia terus meningkat, sementara cadangan bahan bakar fosil semakin menipis. Dengan demikian diperlukan adanya sumber energi alternatif terbarukan untuk menggantikan bahan bakar fosil. Salah satu sumber energi alternatif ini adalah sel surya. Dari tahun ke tahun penggunaan sel surya (fotovoltaik) cenderung meningkat dan hampir selalu memiliki tingkat pertumbuhan rata-rata tahunan tertinggi dibandingkan sumber energi terbarukan lainnya. Hal ini menyebabkan pembelajaran dan penelitian pada bidang

sel surya (fotovoltaik) memiliki prospek masa depan yang cukup bagus.

Silikon amorf terhidrogenasi (hydrogenated amorphous silicon, a-Si:H) merupakan salah satu teknologi fotovoltaik yang sering digunakan selama 25 tahun terakhir. Meskipun silikon kristal (c-Si maupun mc-Si) lebih stabil dan memiliki efisiensi lebih tinggi, namun biaya produksi untuk keduanya sangat mahal [Vilamitjana, 2004].

Pada penelitian ini akan dilakukan pemberian perlakuan panas anil pada film hasil deposisi. Selanjutnya akan dikaji pengaruh anil tersebut pada struktur mikro, ikatan kimia, serta celah energi dari film, serta dibandingkan dengan film deposisi yang tidak diberikan perlakuan anil.

1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan pada penelitian tugas akhir ini adalah :

1. Menentukan parameter pembuatan a-Si:H *single layer* dengan metode PECVD.
2. Pemberian perlakuan panas anil pasca deposisi dengan variasi temperatur dan variasi waktu.

1.3. Batasan Masalah

Pada penelitian tugas akhir ini, permasalahan dibatasi pada :

1. Pembentukan lapisan tipis a-Si:H *single layer* dengan metode PECVD.
2. Annealing pasca deposisi dengan variasi temperatur dan variasi waktu.
3. Analisis struktur mikro, ikatan kimia lapisan tipis, dan celah energi lapisan tipis a-Si:H

1.4. Tujuan

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah :

1. Melakukan pendeposisian lapisan tipis a-Si:H dengan metode RF-PECVD (*Radio Frequency - Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*)
2. Melakukan annealing pasca deposisi dengan variasi temperatur dan variasi waktu.
3. Melakukan analisis struktur mikro, ikatan kimia lapisan tipis, dan celah energi lapisan tipis a-Si:H.

1.5. Manfaat

Hasil penelitian tugas akhir ini bermanfaat bagi berbagai pihak yaitu penulis, pembaca, laboratorium, institut dan industri. Penulis dapat mengembangkan kemampuannya dalam bekerja di laboratorium sehingga dapat menganalisa dan mencari alternatif suatu masalah, serta menghasilkan suatu penelitian. Bagi pembaca, penelitian ini memberikan wawasan mengenai potensi penggunaan sumber energi terbarukan dari sinar matahari. Sehingga nantinya dapat dikembangkan dan bermanfaat baik bagi laboratorium maupun institut. Jika diaplikasikan dalam industri, penelitian ini akan bermanfaat untuk mengembangkan sel surya berbasis silikon amorf yang memiliki biaya produksi lebih rendah dibandingkan sel surya jenis lain.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

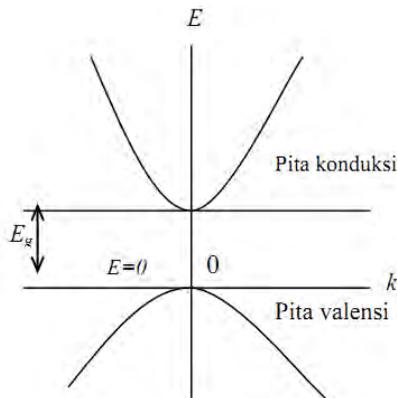
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Material Semikonduktor dan Sel Surya

Semikonduktor merupakan suatu material yang memiliki nilai konduktivitas listrik diantara bahan isolator dan konduktor. Material semikonduktor saat ini sering diaplikasikan pada perangkat elektronik, optoelektronik, dan sensor.

Pada material semikonduktor terdapat pita valensi yang ditempati oleh elektron dan pita konduksi yang terisi oleh *hole*. Jarak antara pita valensi dan pita konduksi disebut dengan celah energi (energy gap). Struktur pita energi dapat dilihat pada Gambar 2.1. Celah pita antara pita valensi dan pita konduksi yang sempit memungkinkan elektron akan tereksitasi secara termal pada temperatur ruang dari pita valensi menuju pita konduksi [Aamodt, 2011].

Material semikonduktor murni memiliki konduktivitas 10^{-6} sampai 10^4 (Ωcm)⁻¹ serta memiliki celah energi kurang dari 6 eV pada temperatur ruang [Zse-Kwok, 2007].



Gambar 2.1. Struktur pita energi pada material semikonduktor

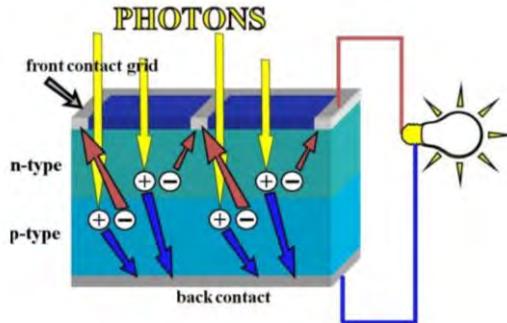
Ketika semikonduktor diradiasi dengan cahaya yang energinya lebih besar dari celah energi semikonduktor ($h\nu \geq E_g$), elektron dari pita valensi dapat tereksitasi ke pita konduksi. Elektron yang melompat dari pita valensi ke pita konduksi disebut pembawa muatan negatif. Sebagai akibat dari eksitasi elektron tersebut muncul lubang (*hole*) pada pita valensi yang merupakan pembawa muatan positif.

Sifat bahan semikonduktor yang berhubungan dengan struktur pita ada dua, yaitu (1) bahan semikonduktor memiliki peluang eksitasi termal untuk melewati celah pita relatif besar, sehingga konduktivitas listriknya sangat dipengaruhi oleh temperatur, (2) struktur pita bahan semikonduktor dapat diubah dengan menambahkan bahan tak murni atau doping dengan konsentrasi yang rendah, sehingga energi Fermi berubah dan mungkin berpindah ke atas menuju pita konduksi atau ke bawah menuju pita valensi. Doping dapat memberikan pengaruh besar terhadap konduktivitas bahan semikonduktor [Krane, 2008].

Sel surya merupakan suatu komponen elektronik yang mampu mengubah energi cahaya matahari secara langsung menjadi energi listrik tanpa menghasilkan limbah atau residu yang dapat menimbulkan polusi [Kwok, 1995]. Sel surya bekerja berdasarkan efek fotolistrik pada material semikonduktor yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik. Teori Maxwell memaparkan tentang radiasi gelombang elektromagnetik, dimana cahaya dianggap sebagai spektrum gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang yang berbeda. Einstein melakukan pandangan yang berbeda dengan menganggap bahwa cahaya merupakan partikel diskrit atau kuantum yang biasa disebut dengan foton [Krane, 2008].

Sel surya umumnya dibuat menggunakan metode sambungan p-n [Kwok, 1995]. Prinsip kerja sel surya yang menggunakan metode sambungan p-n adalah ketika sambungan p-n terkena cahaya matahari, maka elektron akan mendapatkan energi dari cahaya matahari untuk melepaskan diri. Terlepasnya

elektron akan terbentuk hole pada daerah yang ditinggalkan oleh elektron atau biasa disebut dengan fotogenerasi elektron-hole (*electron-hole photogeneration*) yakni, terbentuknya pasangan elektron dan hole akibat cahaya matahari.



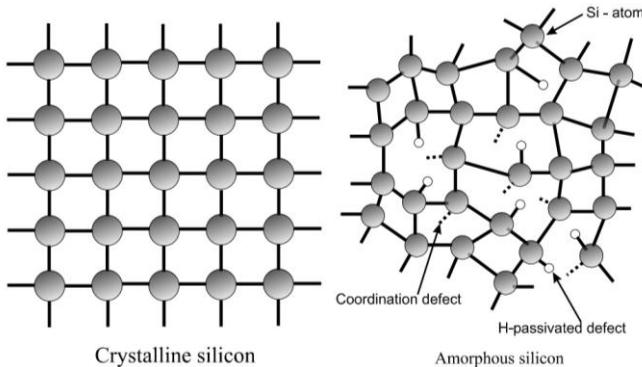
Gambar 2.2. Proses konversi cahaya menjadi listrik

Selanjutnya, dikarenakan pada sambungan p-n terdapat medan listrik (E), elektron hasil fotogenerasi tertarik ke arah semikonduktor n, begitu pula dengan hole yang tertarik ke arah semikonduktor p. Jika rangkaian ini dihubungkan dengan kabel, maka elektron akan mengalir melalui kabel, sehingga muncul arus listrik. Ketika lampu dihubungkan dengan kabel, maka lampu tersebut akan menyala.

2.2. Silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H)

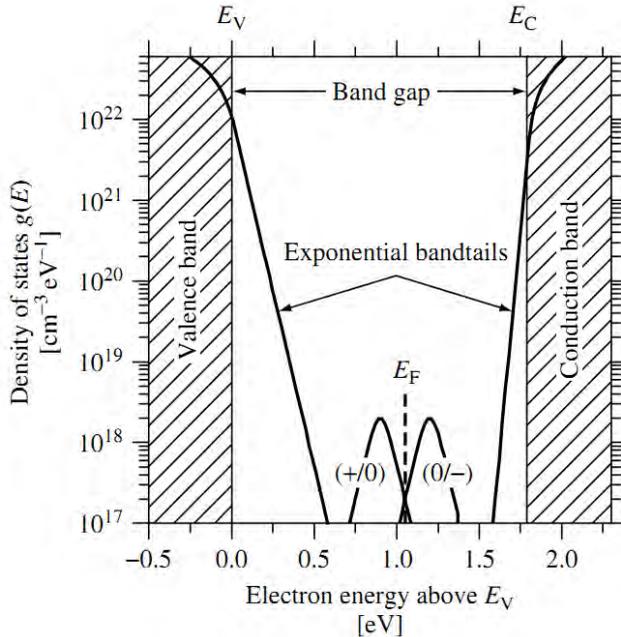
Struktur silikon amorf berbeda dengan silikon kristal. Pada struktur kristal, setiap atom Si berikatan dengan 4 atom tetangga terdekat. Setiap atom Si berikatan dengan atom Si terdekat secara kovalen dengan panjang yang sama dan membentuk sudut 109° , membentuk struktur tetrahedral. Hal ini menyebabkan silikon kristal memiliki keteraturan panjang (*long-range order*). Sedangkan silikon amorf merupakan bentuk non-kristal dari silikon dimana memiliki keteraturan pendek (*short-range order*).

Keteraturan yang pendek ini disebabkan oleh adanya deviasi pada panjang ikatan dan sudut ikatan antar atom Si. Deviasi panjang ikatan pada silikon amorf biasanya terjadi akibat adanya penambahan panjang ikatan antar atom Si sebesar 1.9% dari struktur kristalnya. Sedangkan deviasi sudut ikatan antar atom berada pada nilai sekitar 10° dari struktur kristalnya [Munyeme, 2003].



Gambar 2.3. Struktur Silikon kristal dan amorf [Munyeme, 2003].

Pada silikon amorf *defect* utama yang terjadi adalah *dangling bond*. Munculnya *dangling bond* akibat dari tidak semua atom silikon amorf berikatan dengan tetangga terdekatnya. Adanya *dangling bond* mengakibatkan atom silikon dapat berikatan dengan atom lain yakni hidrogen, yang kemudian membentuk silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) [Dessyntya-Yahya, 2010]. *Dangling bond* tersebut terjadi karena adanya elektron yang tidak berpasangan pada atom Si. *Dangling bond* bermuatan positif (D^+) berada di dekat pita konduksi, yang bermuatan negatif (D^-) berada di dekat pita valensi, dan yang bermuatan netral (D^0) berada ditengah pita energi. Akibat dari adanya *dangling bond* yang terlokasi pada dua daerah pita tersebut menyebabkan terbentuknya *band tail state* [Cahyono, 2014].



Gambar 2.4. *Density of electronic states* dari silikon amorf terhidrogenasi a-Si:H, memperlihatkan band tail state dan dangling bond [Deng-Schiff, 2003].

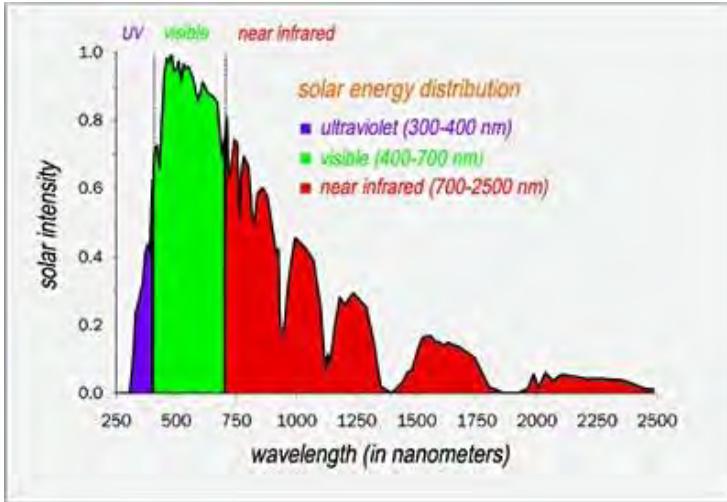
2.3. Efisiensi sel surya dan spektrum sinar matahari

Performa dari sel surya biasa dinyatakan dalam efisiensi. Efisiensi sel surya ini dapat dihitung dengan persamaan :

$$\eta(\%) = \frac{P_{max}}{A E_{Total}} \times 100 \quad (2.1)$$

dimana η adalah efisiensi sel surya, P_{max} adalah daya maksimum, A adalah luas area, dan E_{tot} adalah radiasi sinar [Emery, 2003]

Spektrum sinar matahari terdiri dari cahaya dengan panjang gelombang EM pada rentang 100 - 3000 nm dengan rentang energi foton 12,4 - 0,41 eV. Rentang tersebut termasuk sinar ultra violet, cahaya tampak, dan radiasi infra merah. Lebih dari 90% radiasi matahari adalah cahaya tampak dan radiasi infra merah dekat [Dimroth-Kurtz, 27]



Gambar 2.5. Spektrum cahaya matahari
[www.solarjourneyusa.com]

2.4. Prinsip dasar proses PECVD

Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) merupakan pengembangan dari teknik CVD (*Chemical Vapor Deposition*). Teknik ini pertama kali dikembangkan pada tahun 1960 untuk semikonduktor terutama silikon nitrida. Teknik ini menggunakan plasma untuk proses deposisinya. Jika gas diatomik (hirogen) dipanaskan pada suhu tertentu maka semua molekul akan terurai menjadi atom-atom ($H_2 \rightarrow 2H$) dan terionisasi membentuk plasma.

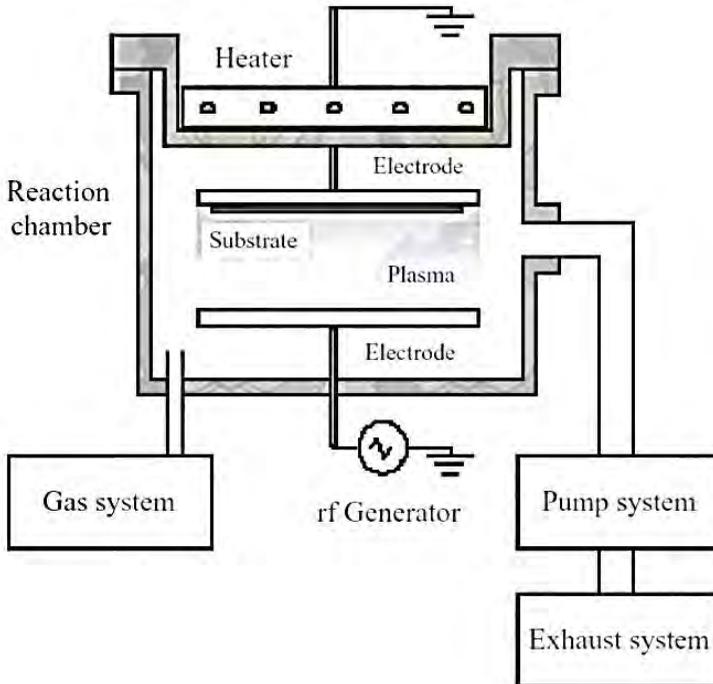
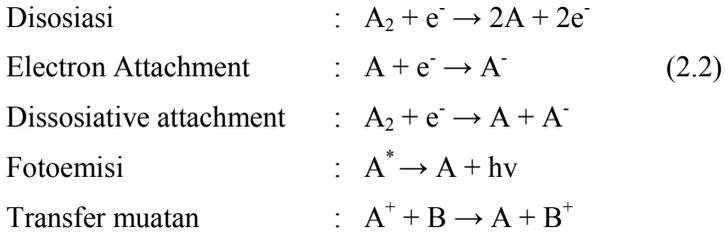
PECVD digunakan untuk fabrikasi film lapisan tipis silikon amorf dan film lapisan karbon. Saat ini PECVD banyak digunakan dalam pembentukan sel surya silikon amorf, nitrida dan isolator oksida. Gambar 2.5 menunjukkan 5 komponen utama pada PECVD [Poortmans-Arkhipov, 1988], yaitu :

- a) *Chamber* reaksi yang memiliki tingkat kevakuman tinggi dan terbuat dari stainless steel serta adanya elektroda paralel, daya *rf feedthrough*, tempat untuk substrat dan pemanas yang digabungkan.
- b) Sistem gas, terdapat pengatur aliran gas dan katup-katup gas untuk mengatur gas yang mengalir pada proses deposisi.
- c) Sistem pompa, terdapat pompa turbo dan pompa rotari yang berfungsi untuk kevakuman *chamber*.
- d) Sistem pembuangan gas.
- e) Kontrol elektronik yang terdiri dari kontrol daya RF, kontrol tekanan dan pengaturan suhu.

Plasma didefinisikan sebagai gas-gas terionisasi yang kuasinetral yaitu adanya peristiwa hilangnya muatan pada plasma secara cepat dari partikel yang bermuatan dan partikel yang netral. Adanya keadaan kuasinetral menyebabkan plasma tidak bermuatan. Plasma diketahui memiliki konduktivitas listrik yang tinggi yang membuat medan listrik pada plasma kecil [Dessyntyah-Yahya, 2010].

Reaksi tumbukan inelastis antara elektron dan spesies gas memunculkan spesies yang sangat reaktif, yaitu radikal bebas, partikel netral tereksitasi, ion, dan elektron. Spesies reaktif digunakan untuk mendeposisi lapisan tipis pada temperatur rendah. Reaksi tumbukan inelastik yang mungkin terjadi adalah [Cahyono, 2014]:



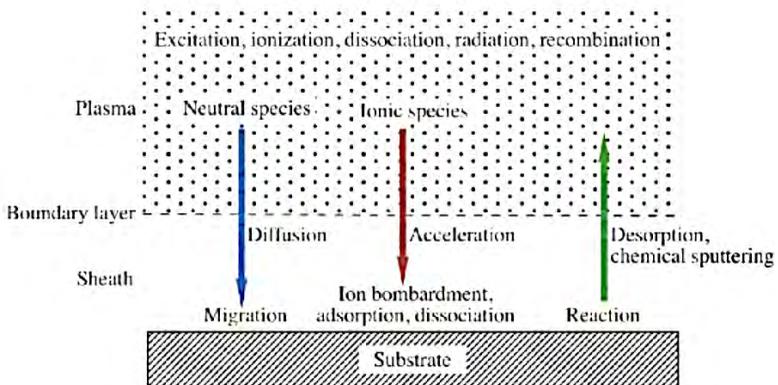


Gambar 2.6. Bagan PECVD [Dessyntyah- Yahya, 2010]

Metode deposisi yang digunakan untuk menghasilkan film lapisan tipis a-Si:H adalah PECVD. Gas SiH_4 dan gas H_2 untuk semikonduktor intrinsik dialirkan melalui *chamber* untuk mendeposisi silikon. Gas-gas tersebut akan terdisosiasi membentuk plasma yang berwarna ungu dan plasma berperan

sebagai sumber energi pada proses deposisi. Proses deposisi dapat dijelaskan dengan empat langkah berikut (Gambar 2.7):

1. Reaksi primer yakni gas silan dan gas hidrogen terdisosiasi menghasilkan radikal netral, ion positif dan negatif serta elektron, terjadilah plasma.
2. Reaksi sekunder yakni terjadi reaksi radikal netral yang berdifusi dalam substrat, ion positif menuju katoda dan ion negatif menuju anoda.
3. Terjadi reaksi di permukaan substrat.
4. Penyusunan sub-permukaan dan terjadi relaksasi struktur jaringan silikon.



Gambar 2.7. Proses deposisi menggunakan PECVD

Pertumbuhan lapisan tipis a-Si:H dicapai oleh bergabungnya partikel-partikel radikal hasil disosiasi molekul-molekul silan pada permukaan lapisan tipis yang sedang ditumbuhkan, sebagian dari energi yang diberikan pada molekul-molekul silan oleh tumbukan elektron dilepas sebagai energi tampak (*glow discharge*). Ion-ion SiH_4^+ hasil tumbukan gas silan dengan elektron dalam plasma adalah tidak stabil dan ion silan terdisosiasi. Reaksi yang terjadi adalah :



atau



Pada hasil deposisi akan tampak lapisan berwarna coklat. Jika warna coklat merata diseluruh permukaan, maka lapisan tersebut banyak mengandung SiH_3 , yang merupakan bermutu tinggi. SiH_3 membentur permukaan kemudian mengubahnya menjasi permukaan yang pasif dan menghaluskan permukaan dan menghasilkan lapisan yang halus dan memiliki mutu tinggi [Yahya, 2009].

Sifat, struktur, dan fase material Si:H ditentukan oleh detail dari proses deposisi. Untuk mendapatkan karakteristik material yang diinginkan banyak variabel dari proses deposisi harus dikontrol. Variabel dalam proses deposisi lapisan tipis dengan metode PECVD adalah [Cahyono, 2014]:

❖ Jenis substrat

Hasil deposisi sangat bergantung pada jenis substrat. Hal ini mengakibatkan jenis substrat yang berbeda untuk parameter rasio pencairan hidrogen R yang sama didapatkan celah energi (E_g) dan ukuran partikel α lapisan deposisi yang berbeda.

❖ Temperatur substrat

Temperatur substrat merupakan salah satu parameter utama yang mengontrol sifat-sifat deposisi lapisan tipis. Parameter ini mengendalikan reaksi kimia pada permukaan deposisi. Temperatur substrat memiliki pengaruh pada reaksi plasma serta pada reaksi permukaan dan proses *cross-linking* dari atom dan molekul yang berkontribusi pada penumbuhan lapisan tipis. Temperatur substrat juga memodifikasi terjadinya pembentukan nanopartikel dalam volume plasma.

❖ Daya RF (W)

Daya RF mengontrol laju disosiasi dari gas, sehingga secara tidak langsung juga mengontrol laju deposisi lapisan. Dengan menaikkan daya RF maka rapat elektron menjadi naik, menyebabkan disosiasi yang lebih tinggi dari gas prekursor. Dengan daya lebih tinggi maka lebih banyak molekul silan SiH_4 yang terdisosiasi, sehingga radikal SiH_3 menjadi lebih banyak di dalam fase gas. Hal ini menyebabkan laju deposisi lapisan yang menjadi lebih cepat.

❖ Tekanan (P)

Tekanan gas menentukan jalan bebas rata-rata (*mean free path*) untuk tumbukan molekul gas dan mempengaruhi apakah reaksi terjadi pada permukaan substrat atau dalam fasa gas.

❖ Laju aliran gas (v)

Laju aliran gas menentukan waktu tinggal dari spesies gas dalam *chamber*. Konsentrasi gas silan dalam hidrogen didefinisikan sebagai laju aliran silan (v_{SiH_4}) dan jumlah laju aliran silan dan laju aliran hidrogen (v_{H_2}) dinyatakan sebagai :

$$K_s(100\%) = \frac{(v_{\text{SiH}_4})}{(v_{\text{SiH}_4}) + v_{\text{H}_2}} \times 100\% \quad (2.5)$$

Pencairan silan dalam hidrogen R ditentukan juga oleh laju dari masing-masing gas. Hal ini berarti bahwa fase material lapisan deposisi yang dihasilkan juga ditentukan oleh laju aliran gas. Keadaan yang sering terjadi adalah pada konsentrasi silan yang rendah, atau pada pencairan hidrogen R yang besar, lapisan hasil deposisi adalah fase kristal.

❖ Waktu deposisi (t)

Lama proses deposisi menentukan tebal lapisan yang dihasilkan. Proses deposisi gas silan dengan pencairan hidrogen R, tebal lapisan menentukan fase material Si:H.

2.5. Sifat Optik

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

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda} \quad (2.6)$$

Dimana E energi gelombang cahaya (joule), h konstanta planck yang besarnya $6,63 \times 10^{-34}$ Js; c merupakan kecepatan cahaya dalam ruang hampa (3×10^8 m/s) dan λ adalah panjang gelombang cahaya (m) [Schroder, 2006].

Transmitansi merupakan perbandingan antara intensitas cahaya setelah dan sebelum melewati material semikonduktor yang dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.7)$$

dengan T menyatakan besarnya transmitansi material semikonduktor (dalam %). Intensitas radiasi berkurang secara eksponensial terhadap ketebalan film sehingga Persamaan (2.7) dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$T = \frac{I}{I_0} = \exp(-a \cdot d) \quad (2.8)$$

Penentuan besarnya band gap dari pengukuran absorpsi optik dipengaruhi oleh beberapa hal. Pengaruh yang pertama adalah terbentuknya *band tail* atau energi urbach. Energi

urbach terjadi karena adanya keadaan terlokalisasi (*localized states*) pada band gap sebagai akibat dari keacakan struktur penyusun film dan ditambah dengan adanya konsentrasi doping / ketakmurnian yang tinggi [Saragih dkk., 2010] atau cacat kristal dan tergabung dalam pita konduksi dan pita valensi. Efek ini menghasilkan tepi eksponensial dalam bahan semikonduktor [Wiyanto dkk, 2004]. Efek penyusutan pita semikonduktor ini disebabkan karena adanya keacakan struktur penyusun film pada kisi atom yang didoping (*host*). Pada daerah eksponensial, lebar koefisien absorpsi dapat didekati dengan persamaan :

$$\alpha = \alpha_o \exp\left(\frac{E}{E_u}\right) \quad (2.9)$$

dengan α_o adalah suatu konstanta, E adalah energi foton, dan E_u adalah besarnya energi urbach dalam (eV) [Saragih dkk, 2010]. Pengaruh yang kedua adalah terbentuknya pasangan elektron-hole atau eksiton dalam semikonduktor. Eksiton memiliki energi ikat yang kecil sehingga eksiton dapat muncul dengan sendirinya berupa puncak tajam dibawah tepi absorpsi.

Pengukuran nilai optik sangat penting dalam menentukan struktur pita semikonduktor. Induksi foton pada transisi elektronik dapat terjadi antara pita yang berbeda, yang nantinya akan digunakan untuk mencari nilai *band gap*.

Pada semikonduktor, koefisien absorpsi merupakan fungsi dari panjang gelombang atau energi foton. Koefisien absorpsi dapat ditunjukkan berdasarkan persamaan :

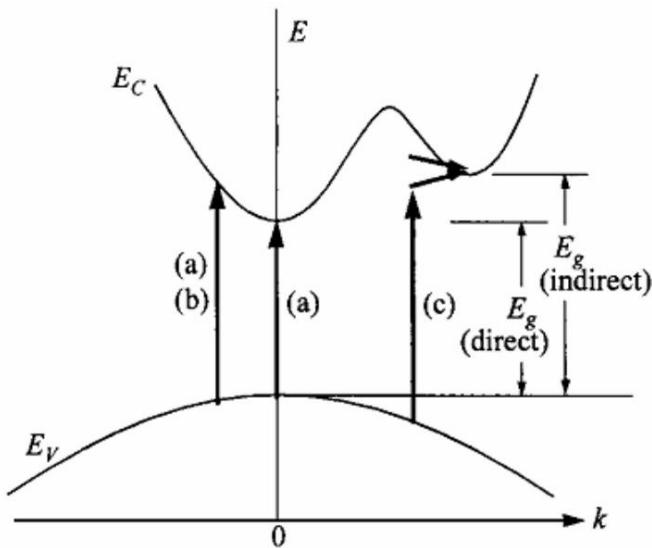
$$\alpha = \frac{4\pi k_e}{\lambda} \quad (2.10)$$

Dan

$$\alpha \propto (hv - E_g)^\gamma \quad (2.11)$$

Dimana hv adalah energi foton dan γ adalah konstanta dan ke adalah koefisien pemadaman (*extinction*). Terdapat dua jenis

transisi dari pita ke pita : diizinkan (*allowed*) dan terlarang (*forbidden*). Untuk material yang bandgapnya langsung, transisi kebanyakan terjadi antara dua pita yang memiliki nilai k yang sama, seperti transisi (a) dan (b) pada gambar 2.8. Transisi langsung yang diizinkan dapat terjadi pada seluruh nilai k , sedangkan transisi langsung yang terlarang hanya dapat terjadi pada saat $k \neq 0$. Untuk transisi langsung perkiraan nilai γ sebesar $1/2$ dan $3/2$ secara berurutan untuk yang diizinkan dan terlarang. Untuk $k = 0$ dimana bandgap didefinisikan, hanya transisi yang diizinkan ($\gamma = 1/2$) yang terjadi dan ini digunakan untuk menentukan bandgap secara eksperimen. Untuk transisi tidak langsung (transisi (c) gambar 2.8), berperan dalam mempertahankan momentum.

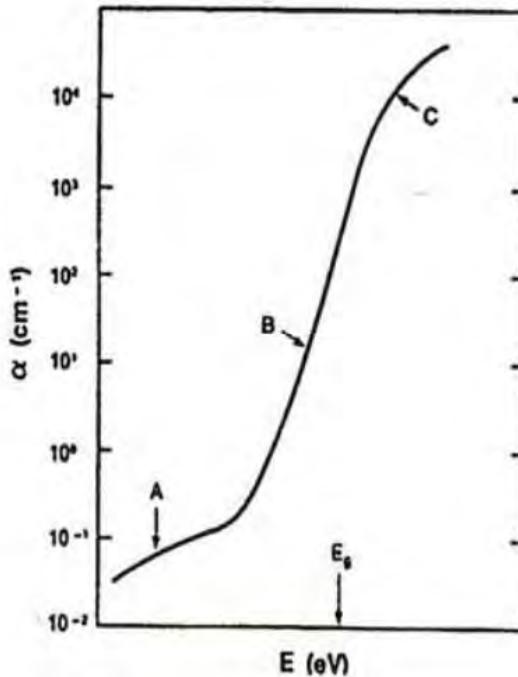


Gambar 2.8. Transisi optik: (a) transisi langsung yang diizinkan dan (b) transisi langsung yang terlarang; (c) transisi tidak langsung menyertakan emisi fonon (panah keatas) dan absorpsi fonon (panah kebawah)
[Sze dkk, 2007].

Pada transisi ini, tiap fonon (dengan energi E_p) ada yang diserap atau diemisikan, dan koefisien absorpsi dapat dimodifikasi menjadi :

$$\alpha \propto (h\nu - E_g \pm E_p)^\gamma \quad (2.12)$$

Disini konstanta γ bernilai 2 dan 3 secara berurutan untuk transisi tidak langsung yang diizinkan dan terlarang. [Sze dkk, 2007]



Gambar 2.9. Koefisien absorpsi optik [Irzaman dkk, 2003]

Kurva absorpsi optik semikonduktor dapat dibagi menjadi tiga daerah dan dapat dilihat pada gambar 2.9 :

1. Daerah A disebut sebagai daerah absorpsi *tail* (ekor)

2. Daerah B disebut sebagai daerah Urbach atau daerah eksponensial.
3. Daerah C disebut daerah pangkat, α pada daerah ini mengikuti hukum pangkat atau $\alpha(h\nu) = C(h\nu - E_g)^n$

Transisi optik pada daerah C pada kurva absorpsi dapat ditentukan energi gapnya dengan membuat plot linier dari kurva alpha terhadap energi. Metode Tauc plot yang penjelasannya sebagai berikut :

1. Data yang keluar adalah transmitansi terhadap panjang gelombang
2. Kemudian tentukan apakah transisinya langsung atau tidak berdasarkan persamaan

$$\alpha h\nu = B(h\nu - E_g)^n \quad (2.13)$$

Untuk $n=2$ transisi tidak langsung, sedangkan untuk $n=1/2$ transisi langsung. Cari plot grafik yang lebih linier (apakah saat $n=2$ atau saat $n=1/2$), apabila $n=2$ lebih linier maka transisi tidak langsung, sebaliknya apabila $n=1/2$ yang lebih linier maka transisi langsung.

3. Dengan melakukan ekstrapolasi bagian linier kurva $(\alpha h\nu)^{1/n}$ terhadap $h\nu$ memotong absis, diperoleh nilai energi yang dinamakan celah energi (E_g).

Ekstrapolasi dilakukan pada daerah kurva yang meningkat tajam, dimana daerah tersebut menyatakan terjadinya transisi langsung [Sze, 2007].

Dari pengukuran sifat optik juga dapat diketahui tebal lapisan tipis. Penentuan tebal lapisan tipis ini berdasarkan pada perbedaan nilai indeks bias antara lapisan dengan substrat, yang mengakibatkan adanya puncak-puncak interferensi pada nilai transmitansi. Perhitungan nilai tebal lapisan tipis dapat dilakukan menggunakan persamaan Swanepoel [Bilalodin, 2012]. Pertama

kali ditentukan beberapa parameter dari nilai transmitansi. Selanjutnya pada bagian yang berosilasi ditentukan puncak maksimum T_{M1} dan T_{M2} , puncak minimum T_{m1} dan T_{m2} , kemudian nilai panjang gelombang saat terjadi puncak maksimum λ_1 dan λ_2 . Kemudian nilai indeks bias dihitung dengan :

$$N_{1,2} = 2n_s \frac{T_M - T_m}{T_M T_m} + \frac{n_s^2 + 1}{2} \quad (2.14)$$

$$n_{1,2} = \sqrt{N + \sqrt{N^2 - n_s^2}} \quad (2.15)$$

Selanjutnya nilai tebal lapisan tipis dapat dihitung dengan persamaan :

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 n_2 - \lambda_2 n_1)} \quad (2.16)$$

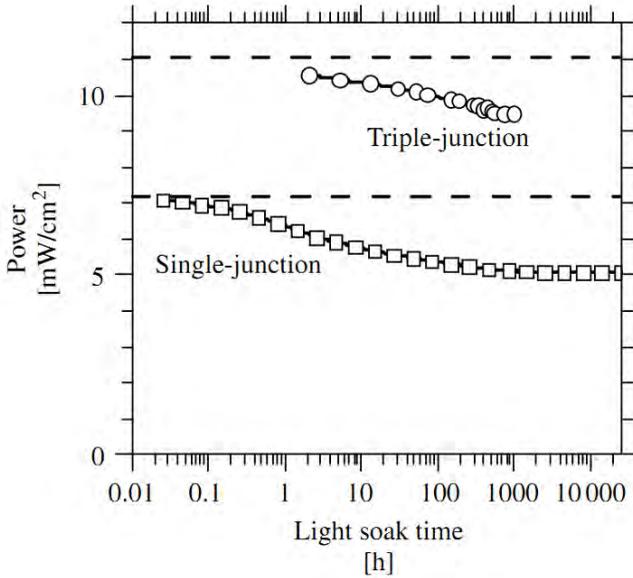
2.6. Efek Staebler-Worski

Masalah utama pada sel surya berbasis silikon terhidrogenasi adalah persoalan instabilitas sel surya, yaitu terjadinya penurunan efisiensi akibat penyinaran dengan intensitas tinggi. Penurunan efisiensi ini dikenal sebagai efek Staebler-Wronski (Staebler-Wronski Effect, SWE). Akibat adanya SWE tersebut pada sel *single-junction* terjadi penurunan efisiensi sebesar 30% dari efisiensi awal setelah penyinaran selama 1000 jam, sedangkan pada sel *triple-junction* terjadi penurunan efisiensi sebesar 15% dari efisiensi awal setelah penyinaran selama 1000 jam [Deng-Schiff, 2003].

SWE tersebut disebabkan karena kandungan hidrogen yang tinggi dan ikatan antara silikon-hidrogen yang mudah terlepas oleh pengaruh penyinaran dengan intensitas tinggi diperkirakan meninggalkan *defect* dalam material sel surya berbasis a-Si:H.

Sifat material yang berperan penting pada fenomena SWE adalah [Street, 1991]:

- ❖ Ketidak-teraturan jaringan Si
- ❖ Konsentrasi dan struktur ikatan hidrogen
- ❖ Konsentrasi impuritas



Gambar 2.10. Efek Staebler-Worski pada *single-junction* dan *triple-junction* [Deng-Schiff, 2003].

BAB III

METODOLOGI

3.1 Bahan dan Peralatan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain adalah :

1. Substrat : - Kaca
2. Gas prekursor : - Silan (SiH_4)
- Hidrogen (H_2)
- Nitrogen (N_2).
3. Bahan pelengkap : - Diwater.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain adalah :

1. Peralatan utama : - RF-PECVD (*Radio Frekuensi - Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition*)
- Furnace
2. Peralatan pendukung : - Alat pemotong kaca, untuk memotong substrat.
- *Ultrasonic cleaner*, untuk membersihkan kotoran pada sampel.
- Hairdrayer, untuk mengeringkan sampel.

3. Alat Karakterisasi : - Defraksi Sinar-X (XRD)
 - *Fourier-Transform Infra-Red* (FTIR)
 - Spektrometri Ultraviolet-Visible (UV-Vis)

3.2 Tahapan Penelitian

Pada penelitian ini dibagi menjadi 4 tahap utama, yaitu : deposisi, anil pasca deposisi, anil untuk substrat tanpa film, dan karakterisasi. Pada tahap deposisi, lapisan a-Si:H dideposisikan diatas substrat. Pada tahap aniling pasca deposisi, sampel diberikan perlakuan anil pasca deposisi dengan variasi temperatur dan waktu. Pada tahap anil untuk substrat tanpa film, film di anil dengan variasi temperatur. Pada tahap karakterisasi sampel dikarakterisasi menggunakan XRD, FTIR, dan UV-Vis,. Dan pada analisa data, hasil karakterisasi dianalisis untuk mendapatkan nilai prosentase kristalitas, tebal lapisan deposisi, rapat keadaan ikatan Si-H, rapat keadaan *dangling bond*, dan energi gap lapisan tipis.

3.2.1. Deposisi

Proses deposisi lapisan a-Si:H dilakukan menggunakan RF-PECVD. Untuk mendapatkan lapisan tipis, dilakukan dengan mengencerkan plasma silan oleh hidrogen, dengan rasio perbandingan hidrogen dan silan (*hydrogen dilution ratio*), $R = H_2/SiH_4$.

Pada saat deposisi ini parameter yang digunakan adalah : P= 2 torr, T=150°C, RF=5 watt, V SiH₄=2,5 sccm, V H₂=90 sccm, t=60 menit.

Proses pendeposisian dilakukan dengan urutan proses berikut:

- a. Substrat yang akan digunakan, yaitu kaca, dipotong sesuai ukuran *holder*, yaitu 10.1×10.1 cm
- b. Substrat dan *holder* dibersihkan menggunakan diwater menggunakan tissue tanpa serat
- c. Substrat dimasukkan ke dalam *holder*, kemudian ditutup dengan penutup *holder*, lalu dibaut supaya tidak lepas.
- d. Substrat dimasukkan ke dalam ITZ (*Isolation and Transfer Zone*) *chamber* melalui *entry port* menggunakan lengan robotik.
- e. *Gate valve* dibuka, kemudian substrat ditransfer ke MPZ (*Modular Process Zone*) menggunakan lengan robotik.
- f. Semua parameter deposisi di set sesuai dengan parameter yang dibutuhkan. Selanjutnya proses deposisi dimulai.
- g. Dilihat apakah sudah terbentuk plasma di dalam *chamber* MPZ melalui kaca transparan yang ada di samping MPZ.
- h. Jika sudah terbentuk plasma maka *timer* dinyalakan, jika belum maka parameter deposisi di cek ulang. Menurut Eddy Yahya [2010], plasma tidak muncul akibat dari besarnya daya RF atau reaktor *chamber* yang kasar.
- i. Setelah waktu deposisi sudah sesuai dengan parameter, maka daya RF dan sistem gas dimatikan, kemudian substrat dikeluarkan menggunakan lengan robotik.

3.2.2. Anil pasca deposisi

Anil adalah salah satu proses perlakuan panas dimana sampel dipanaskan kemudian ditahan pada temperatur tertentu, kemudian dibiarkan mendingin pada temperatur ruang.

Proses anil pasca deposisi ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perlakuan panas terhadap nilai energi gap serta hubungannya dengan perubahan fasa. Pada saat proses aniling, sampel diletakkan di dalam furnace dengan lapisan tipis menghadap ke atas, untuk menghindari gesekan dengan bagian dalam furnace sehingga lapisan deposisi tidak rusak. Pada proses anil ini digunakan alat furnace, menggunakan variasi temperatur, $T=200^{\circ}\text{C}$, 300°C , 400°C dan variasi waktu, $t=30$ m, 60 m, 90m.

3.2.3. Anil Untuk Substrat Tanpa Film

Anil untuk substrat tanpa film ini dilakukan dengan variasi temperatur, $T=200^{\circ}\text{C}$, 300°C , 400°C dengan waktu konstan $t=30$ menit. Anil ini nantinya digunakan sebagai data pembanding pada saat karakterisasi FTIR.

3.2.4. Karakterisasi

Karakterisasi ini digunakan untuk mengetahui karakter dari sampel hasil deposisi dan aniling. Pada tahap ini dilakukan 3 jenis karakterisasi, yaitu : difraksi sinar-X (XRD), *Furier Transform Infre-Red* (FTIR), dan spektrometer UV-Vis.

3.2.4.1. Difraksi Sinar-X (XRD)

Sinar-X merupakan radiasi gelombang elektromagnetik transversal dengan daerah panjang gelombang 0,1–1000 Å yang terdiri dari partikel tidak bermuatan [Beiser, 1995]. Sinar-X dapat terbentuk bilamana suatu logam sasaran ditembak dengan berkas elektron berenergi tinggi. Dalam eksperimen digunakan sinar-X yang monokromatis. Kristal akan memberikan hamburan yang kuat jika arah bidang kristal terhadap berkas sinar-X (sudut θ) memenuhi persamaan Bragg, seperti ditunjukkan dalam persamaan 3. 1 [Callister, 2003] :

$$n \lambda = 2 d \sin\theta \quad (3.1)$$

dengan:

$n = \text{orde } (0, 1, 2, 3, \dots)$,

$\lambda = \text{panjang gelombang sinar-X yang digunakan,}$

$d = \text{jarak antar bidang kristal,}$

$\theta = \text{sudut datang sinar-X.}$

Analisis pola defraksi yang diperoleh dari defraktometer X-Ray dapat menggambarkan kristalinitas sampel hasil deposisi. Dari pola defraksi tersebut dapat diperkirakan ada tidaknya fasa kristal dan/ataupun amorf. Fasa kristal ditunjukkan dengan adanya puncak-puncak tajam, sedangkan fasa amorf ditunjukkan dengan adanya puncak-puncak yang landau ataupun intensitas latar yang tidak teratur. Proses identifikasi fasa dapat dilakukan dengan metode cari dan cocokkan (*search-match*, S/M). Metode S/M tersebut dilakukan dengan mencocokkan data posisi puncak defraksi terukur dengan database, misalnya dalam bentuk kartu PDF (*Powder Deffraction File*).

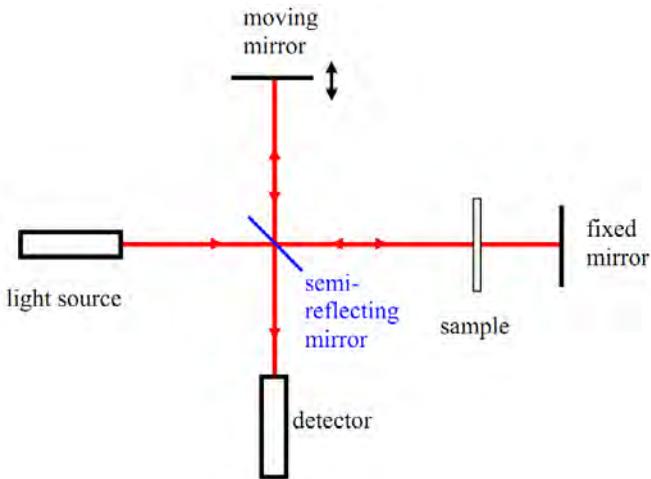


Gambar 3.1. XRD 'Philips X'Pert PRO.

3.2.4.2. Fourier-Transform Infra-Red (FTIR)

Fourier-Transform Infra-Red (FTIR) adalah metode spektroskopi untuk mengetahui ikatan kimia pada sistem molekuler. Pada karakterisasi FTIR ini puncak absorpsi memiliki korespondensi dengan frekuensi dari ikatan kimia dalam molekul penyusun material. Pada prosesnya digunakan sebuah interferometer untuk mengkodekan sinyal yang terdeteksi, yang selanjutnya ditransformasi fourier untuk membentuk spektrum FTIR (intensitas terabsorpsi / % transmitansi vs bilangan gelombang).

Spektroskopi FTIR ini menggunakan sumber cahaya infra merah, yang selanjutnya diukur menggunakan metode interferometer Michelson dengan dua buah cermin reflektor yaitu cermin statis (*fixed mirror*) dan cermin dinamis. Cermin dinamis memindai sampel ketika bergerak, sehingga didapatkan intensitas variabel absorpsi (ataupun transmitansi) pada fungsi waktu $I(t)$.



Gambar 3.2. Interferometer Michelson pada FTIR

Didefinisikan energi E , frekuensi ν , panjang gelombang λ , dan bilangan gelombang $k = 1/\lambda$, maka :

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = hck \quad (3.2)$$

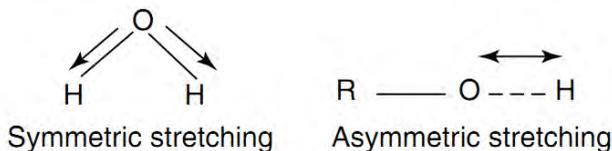
Metode transformasi Fourier digunakan untuk mengubah intensitas sebagai fungsi waktu $I(t)$ menjadi intensitas sebagai fungsi bilangan gelombang $I(k)$

$$I(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} I(t) \exp(i\omega t) dt \quad (3.3)$$

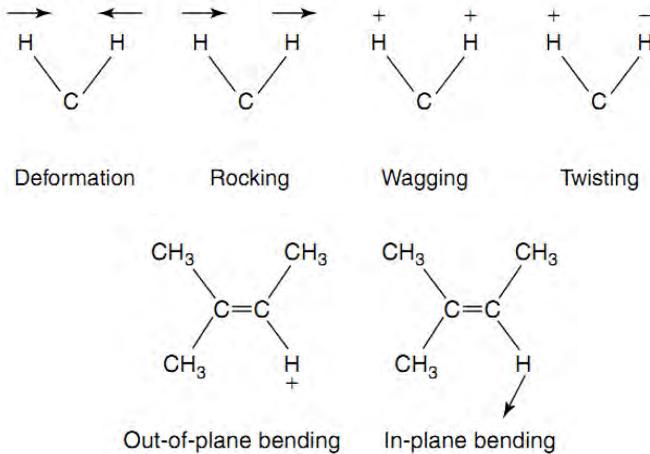
$$I(k) = 2\pi c I(\omega) = 2\pi c \int_{-\infty}^{\infty} I(t) \exp(i\omega t) dt \quad (3.4)$$

Prinsip dasar dari spektroskopi FTIR adalah harus terjadi perubahan momen dipol ketika terjadi getaran pada molekul. Syarat ini dipenuhi oleh ikatan antar atom yang tidak sejenis, karena memiliki momen dipol yang berbeda. Sedangkan pada ikatan antar atom yang sejenis syarat tersebut tidak dipenuhi, karena momen dipolnya selalu sama tidak dipengaruhi oleh panjang maupun sudut ikatan kimianya.

Momen dipol pada ikatan kimia dapat berubah ketika terjadi vibrasi. Terdapat dua jenis vibrasi yang paling utama yaitu 1) *stretching* terjadi karena perubahan jarak antar atom dan 2) *bending* terjadi karena perubahan sudut ikatan [Stuart, 2004].



Gambar 3.3. Jenis vibrasi *Stretching*

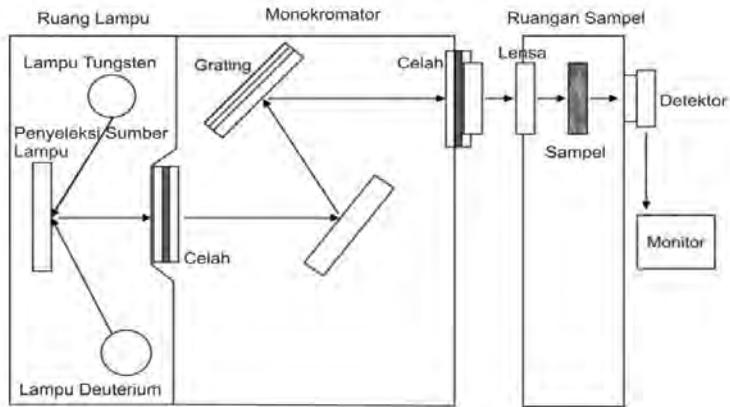


Gambar 3.4. Jenis vibrasi *Bending*

3.2.4.3. Spektrometer Ultraviolet-Visual (UV-Vis)

Salah satu cara untuk menentukan sifat optik suatu bahan yaitu dengan menggunakan metode spektroskopi UV-VIS. Spektroskopi UV-VIS adalah teknik yang digunakan untuk mengeksitasi elektron valensi dalam atom seperti mencari celah energi dari atom atau molekul. Spektroskopi UV-VIS memiliki rentang panjang gelombang antara 200-950 nm [Grady, 2006].

Pada kenyataannya molekul memiliki kemampuan untuk menyerap ultraviolet atau cahaya tampak. Absorpsi ini sesuai untuk mengeksitasi elektron terluar pada molekul terkait. Ketika molekul menyerap energi elektron dinaikkan dari HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*) ke LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*).



Gambar 3.5. Jalur sinar pada Spektrometer UV-Vis

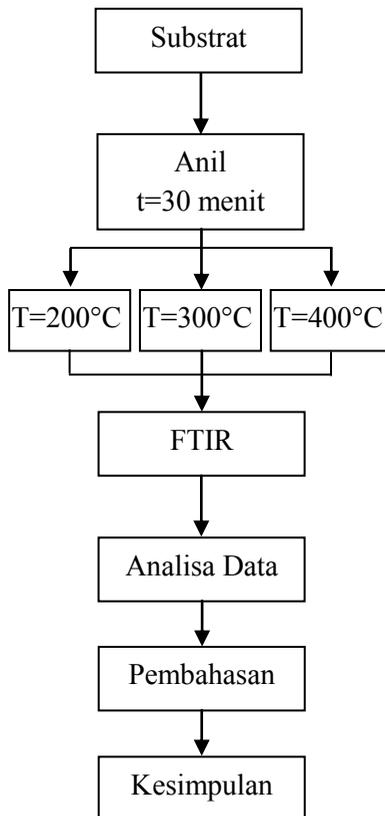
Bagian-bagian Spektrofotometer UV-VIS adalah : sumber cahaya, monokromator dan detektor. Monokromator bekerja seperti kisi difraksi untuk membagi cahaya kedalam bermacam panjang gelombang. Peran detektor adalah untuk merekam intensitas cahaya yang ditransmisikan [A. Gahr].



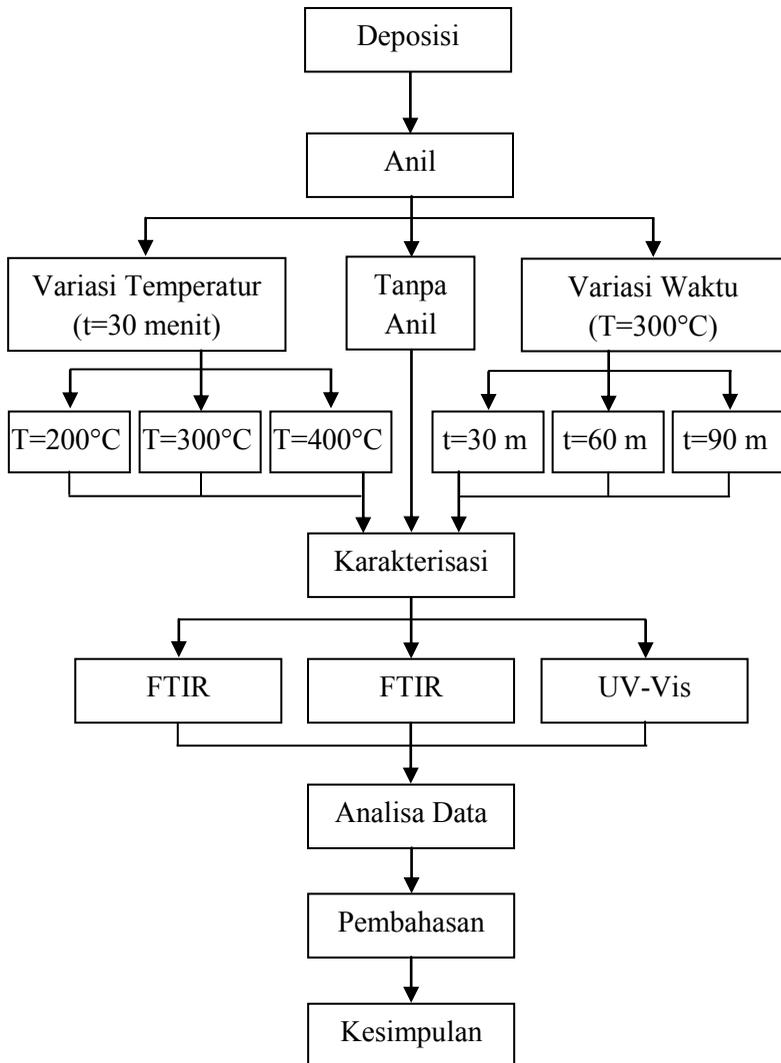
Gambar 3.6. Spektrometer UV-Vis 'GENESYS 10S UV-Vis' di Laboratorium Zat Padat

Pada saat karakterisasi menggunakan spectrometer UV-Vis ini, setiap sampel dikarakterisasi menggunakan panjang gelombang $\lambda = 250-800$ nm. Pada saat pengambilan data sampel yang telah dideposisi dimasukkan ke slot 1, dan sebagai pembanding kaca yang tanpa di deposisi dimasukkan ke slot B. Data yang diambil adalah transmitansi vs panjang gelombang.

3.3 Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir



Gambar 3.7. Diagram alir untuk sampel tanpa film



Gambar 3.8. Diagram alir untuk sampel dengan film.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV

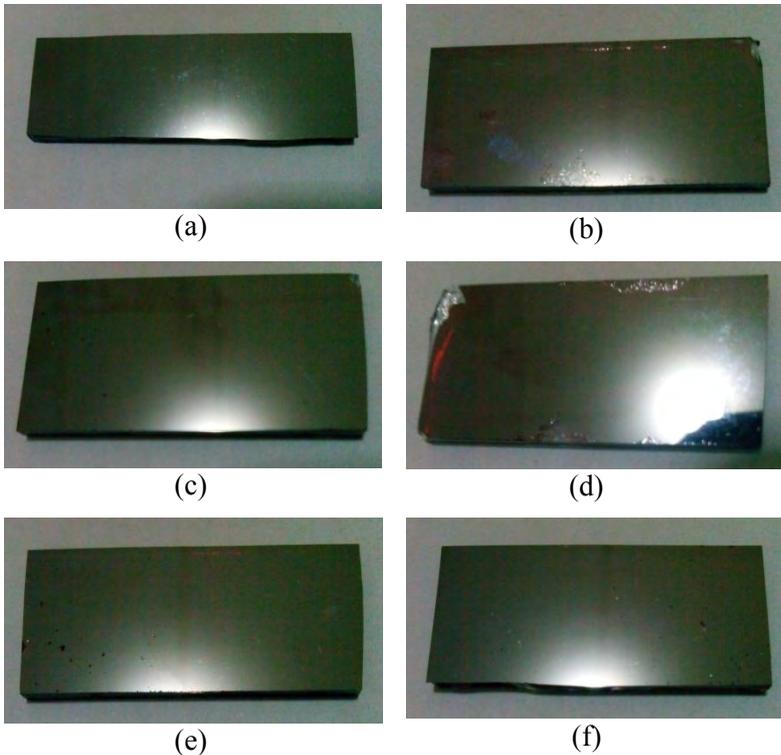
ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pembuatan Lapisan Tipis a-Si:H

Penelitian ini menggunakan bahan dasar gas SiH_4 dan gas Hidrogen (H_2). Selanjutnya SiH_4 dan H_2 digunakan untuk menumbuhkan lapisan film tipis diatas substrat kaca sehingga terbentuk lapisan tipis Si:H (silikon terhidrogenasi). Penumbuhan lapisan tipis (deposisi) ini menggunakan metode *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition* (PECVD).

Di dalam proses PECVD, gas SiH_4 dan gas H_2 diubah menjadi plasma melalui tumbukan inelastik antara molekul gas dengan elektron di dalam *chamber discharge*. Tumbukan inelastik antara molekul gas dengan elektron menimbulkan molekul baru yang sangat reaktif. Molekul yang sangat reaktif inilah yang ditumbuhkan (deposisi) diatas substrat kaca dengan temperatur chamber yang rendah. Gas SiH_4 yang bereaksi dengan molekul yang sangat reaktif dapat membentuk berbagai macam molekul antara lain SiH, SiH_2 , SiH_3 , Si_2H_6 , dan H_2 .

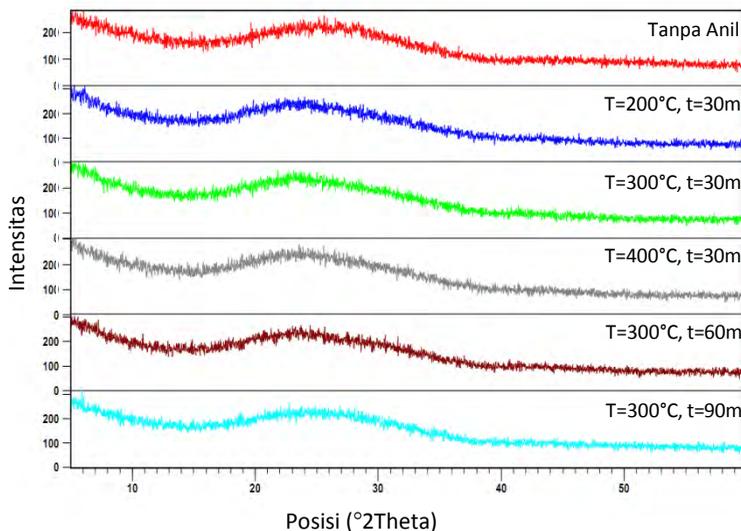
Proses anil pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efek perlakuan panas pada ikatan yang terbentuk antara silikon dan hidrogen (SiH, SiH_2). Hal ini berkaitan dengan kestabilan dan rapat keadaan ikatan yang terbentuk. Ketika ikatan antara silikon dan hidrogen terputus akibat perlakuan panas, maka akan terbentuk *dangling bond* dalam struktur film. *Dangling bond* ini merupakan *defect* utama yang merugikan pada material a-Si:H, dan merupakan salah satu faktor penyebab efek Staebler-Worski.



Gambar 4.1. Foto sampel setelah perlakuan anil (a) tanpa anil, (b) $t=30$ mnt $T=200^{\circ}\text{C}$, (c) $t=30$ mnt $T=300^{\circ}\text{C}$, (d) $t=30$ mnt $T=400^{\circ}\text{C}$, (e) $t=60$ mnt $T=300^{\circ}\text{C}$, (f) $t=90$ mnt $T=300^{\circ}\text{C}$

4.2. Analisis Karakterisasi XRD

Karakterisasi menggunakan difraksi sinar-X ini bertujuan untuk mengetahui tingkat amorfus-kristalinitas dari film. Karakterisasi dilakukan pada rentang nilai $2\theta = 5^{\circ} - 60^{\circ}$. Hasil output berupa file '*PHILIPS Binary Scan*' (*.rd) dan '*Comma Separated Values File*' (*.csv). Hasil karakterisasi XRD disajikan dalam Gambar 4.2 berikut.



Gambar 4.2. Hasil karakterisasi XRD

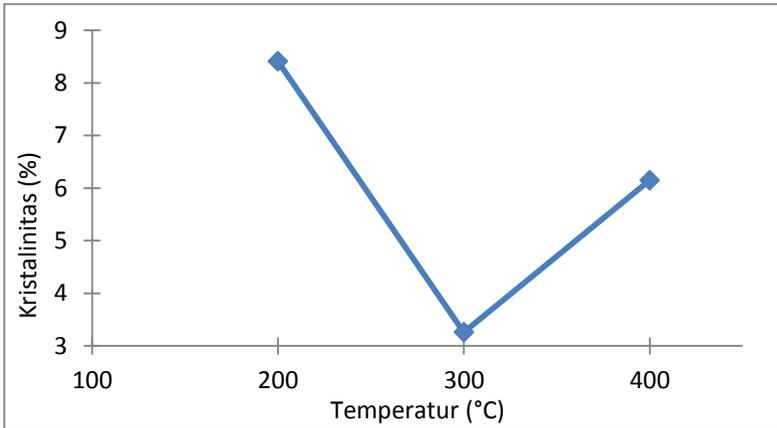
Kemudian penentuan kristalinitas film dilakukan menggunakan software X'Pert HighScore Plus (HSP). Hasil penentuan kristalinitas didapatkan sebagaimana diberikan pada Tabel 4.1 dibawah:

Tabel 4.1. Kristalinitas Film menggunakan HSP

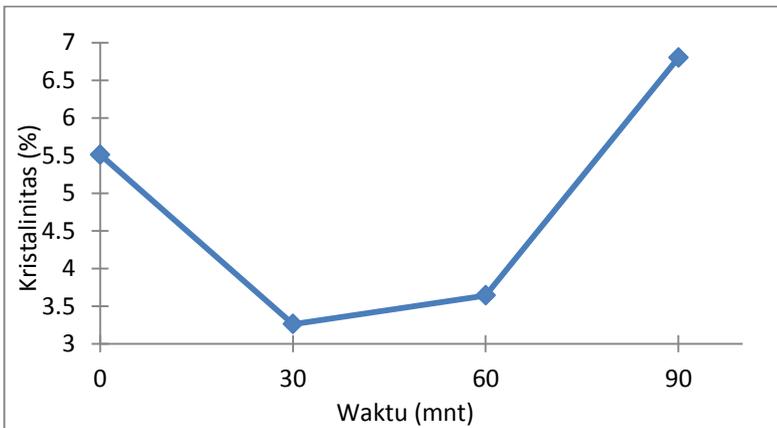
t=30 menit		T=300°C	
T	%kristalinitas	t	%kristalinitas
200	8,41	0	5,51
300	3,26	30	3,26
400	6,15	60	3,64
		90	6,80

Dari nilai %kristalinitas terlihat bahwa tanpa anil kristalinitas film adalah 5.51%. Pada variasi waktu terjadi

penurunan pada $t=30$ m menjadi 3.26%. Kemudian mengalami kenaikan yang signifikan untuk $t=60$ m dan $t=90$ m menjadi 3.64% dan 6.80%. Sedangkan pada variasi temperatur terjadi kenaikan pada $T=200^{\circ}\text{C}$ menjadi 8.41%. Kemudian penurunan tajam pada $T=300^{\circ}\text{C}$ menjadi 3.26% dan kenaikan kembali pada $T=400^{\circ}\text{C}$ menjadi 6.15%. Dari nilai %kristalinitas tersebut, maka tingkat amorf dari film berada pada rentang nilai 96.74%–93.2%.



Gambar 4.3. Kristalinitas untuk variasi temperatur

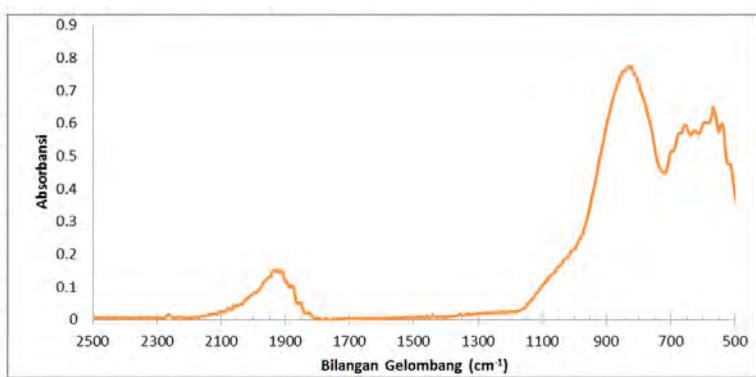


Gambar 4.4. Kristalinitas untuk variasi waktu

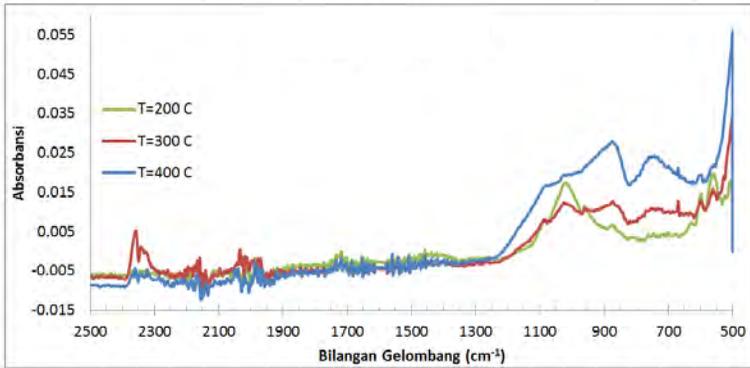
4.3. Analisis Hasil Karakterisasi FTIR

Karakterisasi dengan FTIR ini bertujuan untuk mengetahui ikatan kimia yang terjadi dalam film. Karakterisasi dilakukan pada bilangan gelombang $k = 400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$. Hasil pengukuran adalah nilai transmitansi untuk setiap bilangan gelombang.

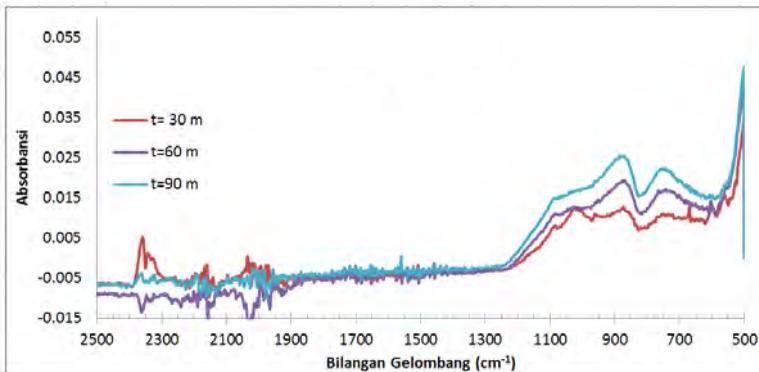
Hasil output berupa file berekstensi 'Comma Separated Values File' (*.CSV) dan SPA File (*.SPA). Dari file CSV tersebut dapat dibuka menggunakan software Microsoft Excel, dan dibuat dalam grafik absorbansi dalam fungsi bilangan gelombang. Sedangkan dari file SPA dapat dibuka menggunakan software Essential FTIR untuk mencari puncak (*peak*) dari nilai absorbansi.



Gambar 4.5. Grafik hasil karakterisasi FTIR untuk film tanpa anil



Gambar 4.6. Grafik hasil karakterisasi FTIR untuk variasi temperatur



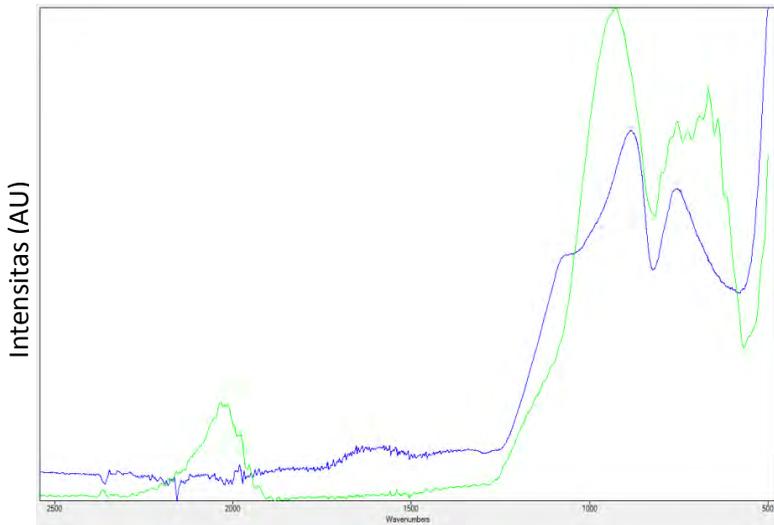
Gambar 4.7. Grafik hasil karakterisasi FTIR untuk variasi waktu

Dari Gambar 4.5, 4.6, dan 4.7 terlihat bahwa film yang tanpa anil memiliki rata-rata nilai absorbansi dan puncak yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan film yang dikenai anil.

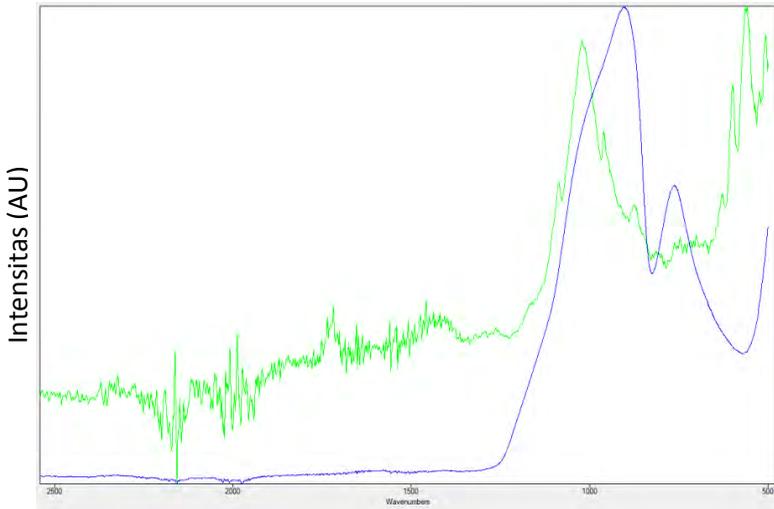
Dari Gambar 4.6 dan 4.7 terlihat bahwa pada bilangan gelombang dibawah 1200 nilai absorbansi meningkat secara signifikan dibanding nilai absorbansi pada bilangan gelombang

yang lain. Dari bentuk grafik pada bilangan gelombang dibawah 1200, terlihat bahwa pada area tersebut merupakan puncak-puncak nilai absorbansi yang saling berdekatan. Karena hal ini maka sebagian puncak pada bagian tersebut kemungkinan tidak terlihat.

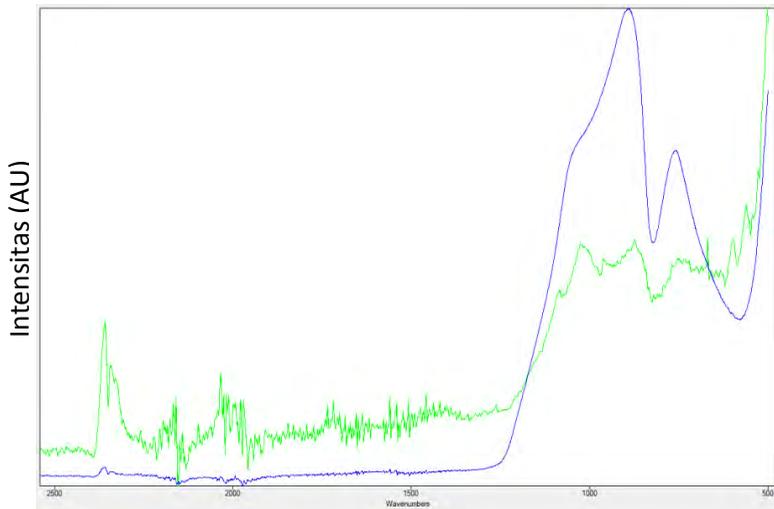
Pada karakterisasi FTIR ini, sebagai data pembanding juga dilakukan karakterisasi untuk substrat kaca pada variasi temperatur $T=200^{\circ}\text{C}$, 300°C , 400°C . Hal ini dilakukan untuk mengetahui puncak-puncak yang mana yang berasal dari substrat dan puncak-puncak yang mana yang berasal dari film. Terutama pada bilangan gelombang dibawah 1200 dimana nilai puncaknya saling berdekatan. Berikut disajikan grafik pencocokan posisi puncak untuk sampel tanpa film (hanya substrat) dan dengan film (substrat+film).



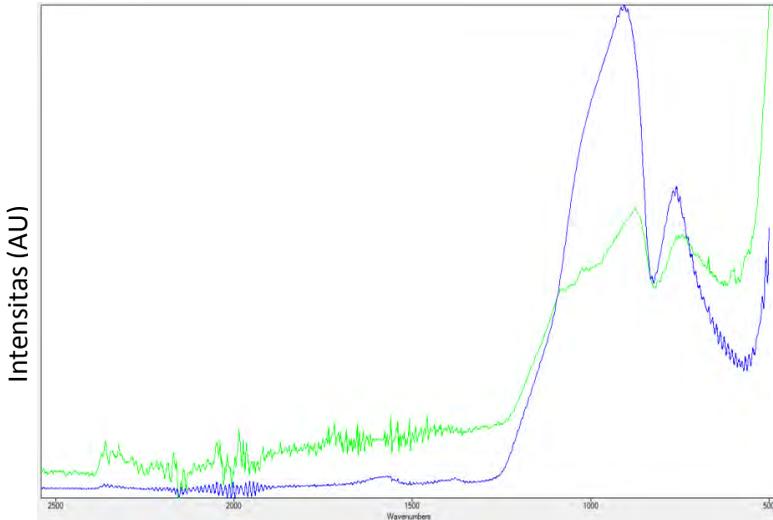
Gambar 4.8. Grafik pencocokan posisi puncak untuk sampel tanpa film (biru) dan dengan film (hijau) untuk sampel tanpa anil



Gambar 4.9. Grafik pencocokan posisi puncak untuk sampel tanpa film (biru) dan dengan film (hijau) untuk $T=200^{\circ}\text{C}$



Gambar 4.10. Grafik pencocokan posisi puncak untuk sampel tanpa film (biru) dan dengan film (hijau) untuk $T=300^{\circ}\text{C}$



Gambar 4.11. Grafik pencocokan posisi puncak untuk sampel tanpa film (biru) dan dengan film (hijau) untuk $T=400^{\circ}\text{C}$

Dari Gambar 4.8, 4.9, 4.10, dan 4.11 terlihat bahwa pada sampel tanpa film (substrat kaca) memiliki 2 puncak utama yaitu pada bilangan gelombang ~ 890 dan ~ 760 . Selain 2 puncak utama tersebut juga terdapat puncak kecil pada bilangan gelombang ~ 2357 untuk variasi temperatur 300°C dan 400°C .

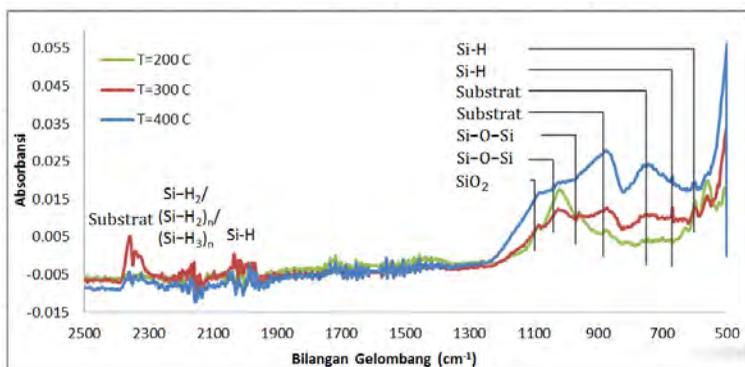
4.3.1. Analisis Puncak Absorbansi Berdasar Referensi

Dari Gambar 4.5, 4.6, dan 4.7 puncak-puncak nilai absorbansi terjadi pada nilai bilangan gelombang : 2357, ~ 2165 , ~ 2000 , 1083, 1017, 967, 881, 745, 667, 600. Puncak-puncak diatas dapat dibandingkan dengan data referensi pada Tabel 4.2 berikut:

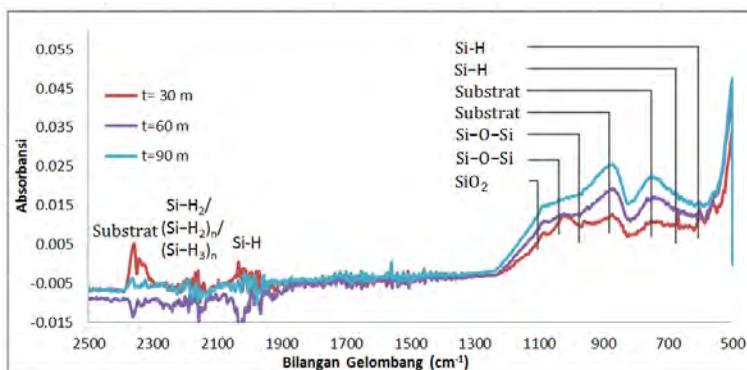
Tabel 4.2. Puncak intensitas dan struktur kimia referensi
 [Yang, 2011.Lim dkk, 2006.Launer, 1987.Stuart, 2004.Groza
 dkk, 2005.Shokri dkk, 2008. Morajev, 2003]

k (cm^{-1})	Struktur Kimia	Keterangan
600-650	Si-H	<i>Wagging/ Rocking</i>
~667	Si-H	-
970	Si-O-Si	-
1000-1130	Si-O-Si	<i>Asymmetric Stretching</i>
1080-1110	SiO ₂	-
1083	Si-O-Si	<i>Stretching</i>
~2000	Si-H	<i>Stretching</i>
~2150	Si-H ₂ /(Si-H ₂) _n /(Si-H ₃) _n	<i>Stretching</i>

Dari puncak referensi dari Tabel 4.2 dapat dibandingkan dengan nilai puncak yang terdapat pada Gambar 4.5, 4.6, dan 4.7. Hasil pencocokan disajikan dalam grafik hasil pencocokan antara puncak data dengan referensipada Gambar 4.12 dan Gambar 4.13 berikut :



Gambar 4.12. Grafik Pencocokan puncak data dan referensi untuk variasi temperatur



Gambar 4.13. Grafik Pencocokan puncak data dan referensi untuk variasi waktu

Dari Gambar 4.12 dan 4.13 terlihat bahwa puncak pada bilangan gelombang 1083 cm^{-1} adalah SiO_2 (silikon dioksida). Semua bentuk SiO_2 memiliki puncak yang kuat pada nilai bilangan gelombang tersebut. SiO_2 ini adalah kandungan utama dari substrat kaca, yaitu silika.

4.3.2. Perhitungan Konsentrasi Hidrogen Dalam Film

Konsentrasi hidrogen dalam film dapat dihitung menggunakan persamaan [Kroll dkk, 2000] :

$$C(H) = \frac{A_k}{N_{Si}} \int_k \frac{\alpha(k)}{k} dk \approx \frac{A_k}{N_{Si}} \sum \frac{\alpha(k)}{k} \Delta k \quad (4.1)$$

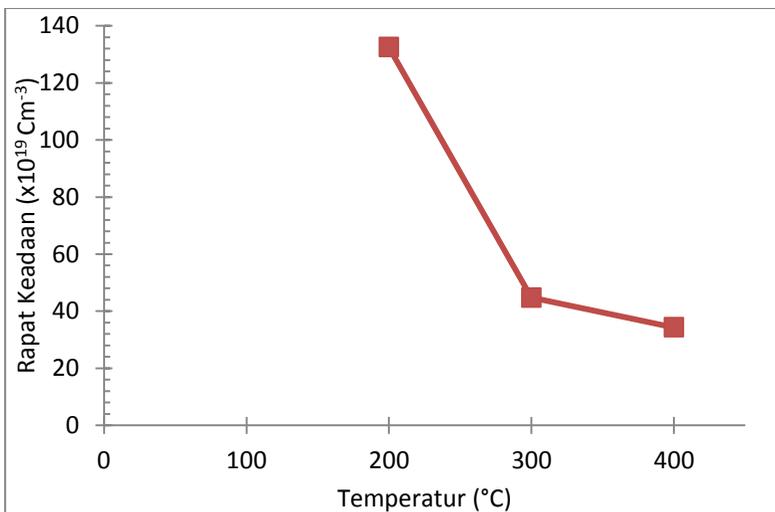
dimana $\alpha(k)$ adalah nilai koefisien absorpsi pada bilangan gelombang k , A_k konstanta untuk hidrogen bernilai $1.6 \times 10^{19} \text{cm}^{-2}$, N_{Si} untuk silikon amorf $\alpha\text{-Si:H}$ adalah $5.8 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$. Nilai $\alpha(k)$ dapat dihitung menggunakan persamaan 2.8, dengan tebal lapisan dihitung menggunakan persamaan Swanepoel 2.14, 2.15, dan 2.16. Perhitungan menggunakan persamaan Swanepoel secara rinci disajikan dalam lampiran D. Selanjutnya dari persamaan 4.1. dapat ditentukan rapat keadaan (*density of state*) dari atom H yang terikat dengan Si menggunakan persamaan :

$$N_H = C(H) \cdot N_{Si} \quad (4.2)$$

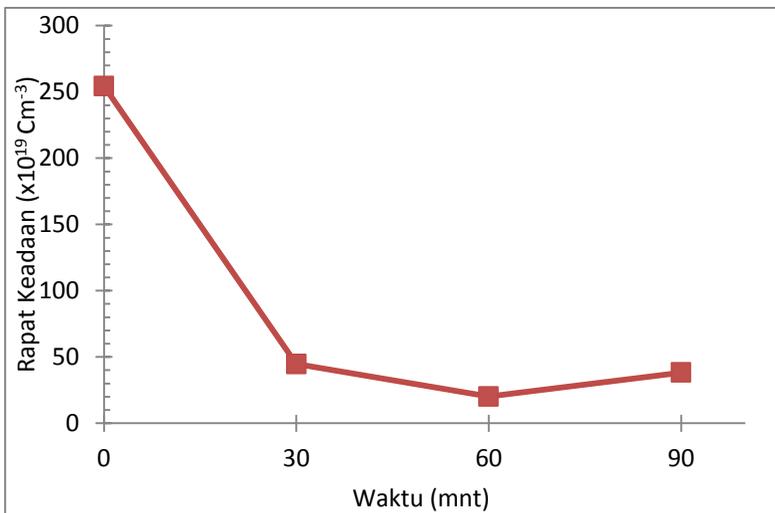
Selanjutnya dari persamaan 4.2 dapat dihitung rapat keadaan Si-H pada 600 cm^{-1} dan 667 cm^{-1} . Hasil perhitungan disajikan dalam Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3. Rapat Keadaan hidrogen

t=30 menit		T=300°C	
T	$N_{(Si-H)}$	t	$N_{(Si-H)}$
200	$1,32 \times 10^{20}$	0	$2,54 \times 10^{20}$
300	$4,47 \times 10^{19}$	30	$4,47 \times 10^{19}$
400	$3,43 \times 10^{19}$	60	$2,01 \times 10^{19}$
		90	$3,82 \times 10^{19}$



Gambar 4.14. Rapat keadaan hidrogen untuk variasi temperatur



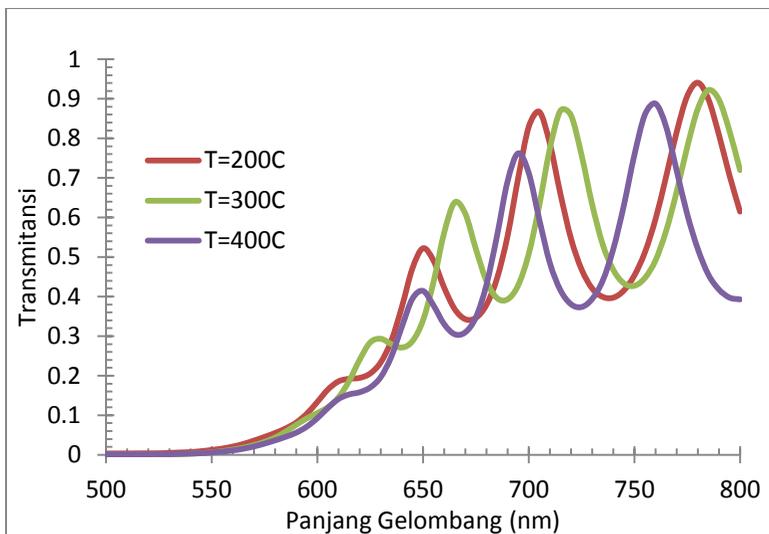
Gambar 4.15. Rapat keadaan hidrogen untuk variasi waktu

Dari gambar 4.14 dan 4.15 terlihat bahwa konsentrasi Si-H dalam film cenderung mengalami penurunan untuk setiap kenaikan variasi temperatur maupun waktu, kecuali pada variasi waktu 90 menit. Kecenderungan penurunanan ini dikarenakan ikatan Si-H akan putus ketika dikenai panas. akibat dari lepasnya atom hidrogen maka akan terjadi *dangling bond* pada atom silikon menjadi Si-DB. Dangling bond merupakan sebab utama munculnya efek Staebler-Worski

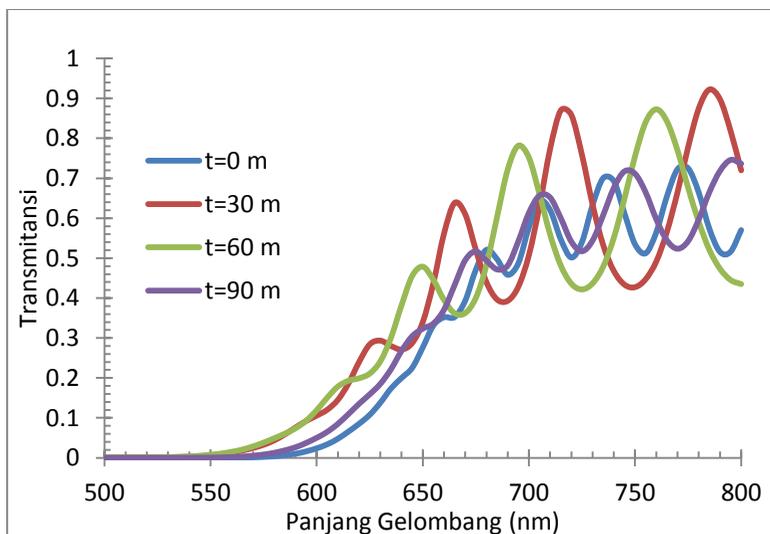
4.4. Analisis Karakterisasi Spektrometer UV-Vis

Pengukuran dengan spektrometer UV-Vis ini bertujuan untuk mengetahui besaran optik, yaitu absorbansi dan transmitansi. Alat uji yang digunakan adalah 'GENESYS 10S UV-Vis' yang ada di laboratorium zat padat. Pengukuran dilakukan pada panjang gelombang $\lambda = 250-800$ nm.

Hasil pengukuran spektrometer UV-Vis ini adalah panjang gelombang dan %transmitansi. Hasil output berupa file berekstensi '*Comma Separated Values File*' (*.CSV). Dari file CSV tersebut dapat dibuka menggunakan software Microsoft Excel, dan dibuat dalam grafik transmitansi dalam fungsi panjang gelombang.



Gambar 4.16. Nilai transmitansi untuk variasi temperatur



Gambar 4.17. Nilai transmitansi untuk variasi waktu

Berdasarkan pada Gambar 4.16 dan 4.17 terlihat bahwa nilai transmitansi maksimal, diatas 40%, terjadi pada panjang gelombang diatas 600 nm. Hal ini berarti bahwa panjang gelombang pada nilai yang melebihi 600 nm tidak dapat diserap oleh film, sehingga hanya diteruskan saja (ditransmisikan). Sebaliknya pada nilai panjang gelombang yang rendah, yaitu pada rentang 300 nm sampai dengan 550 nm terjadi transmitansi minimal. Hal ini mengindikasikan nilai absorptansi yang maksimal. Nilai absorptansi yang tinggi ini mengindikasikan bahwa panjang gelombang pada rentang tersebut dapat diserap secara efektif oleh film. Hal ini menandakan daerah kerja efektif dari film berada pada panjang gelombang antara 300 nm sampai dengan 550 nm.

Pada daerah transisi fundamental, yang terjadi pada nilai panjang gelombang ~550 nm hingga ~615 nm, tampak terjadi perubahan kurva transmitansi yang sangat besar. Hal ini terjadi karena pada daerah transisi fundamental tersebut terjadi penyerapan foton oleh elektron untuk berpindah dari pita valensi ke pita konduksi (*direct gap*).

Nilai transmitansi suatu film juga dapat dihubungkan dengan kualitas kristal film. Plot grafik yang berbentuk tajam pada tepi grafik transmitansi menunjukkan bahwa kualitas kristal film yang semakin bagus. Selain dipengaruhi oleh kualitas kristal film, menurut Purwaningsih dkk. [2005] nilai transmitansi juga dipengaruhi oleh doping atau ketakmurnian. Dalam hal ini ketakmurnian dalam sampel adalah adanya atom hidrogen, serta pengaruh *dangling bond*.

4.4.1. Perhitungan Tebal Lapisan Deposisi

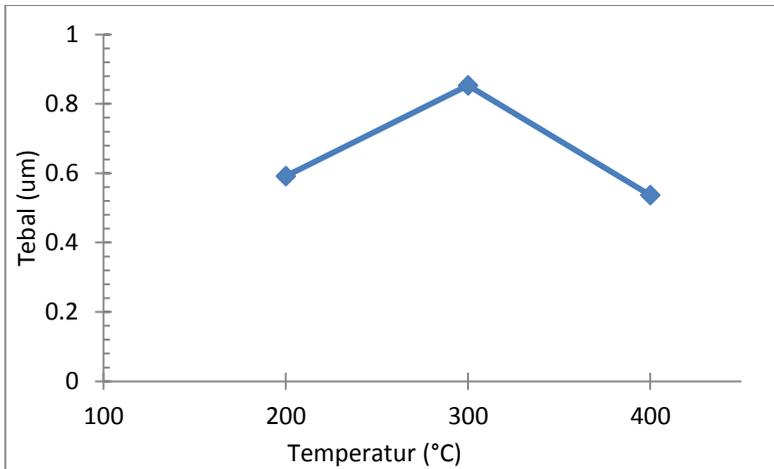
Plot grafik pada Gambar 4.16 dan 4.17 memperlihatkan bahwa nilai transmitansi mulai naik pada panjang gelombang ~550 nm untuk semua sampel. Kemudian mulai terjadi osilasi dimulai dari panjang gelombang ~635 nm. Osilasi yang muncul

pada spektrum transmitansi disebabkan oleh efek interferensi yang disebabkan oleh perbedaan nilai indeks bias dalam lapisan [Mursal dkk., 2006]. Osilasi menunjukkan ketebalan suatu film. Ketebalan suatu film sangat berpengaruh terhadap nilai transmitansi. Ketika suatu film memiliki lapisan yang tebal maka akan menurunkan nilai transmitansi optik pada daerah spektrum cahaya tampak.

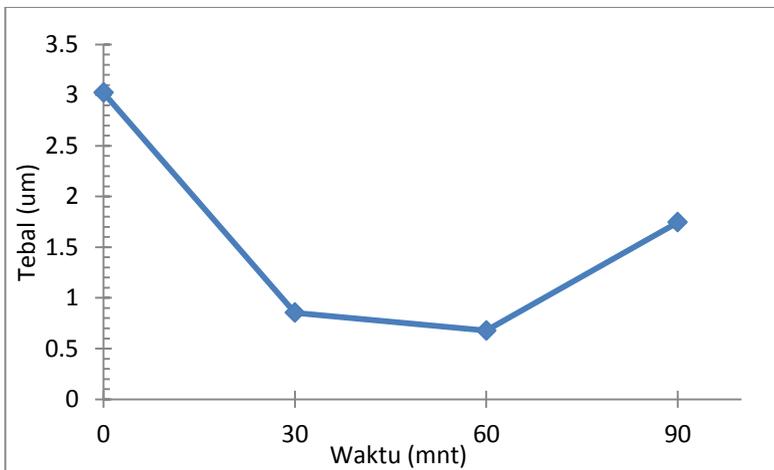
Perhitungan tebal lapisan film hasil deposisi dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan Swanepoel (persamaan 2.14, 2.15, 2.16) [Bilalodin, 2012]. Rincian perhitungan untuk penentuan tebal lapisan dapat dilihat di lampiran D. Berikut ini disajikan hasil perhitungan tebal lapisan deposisi untuk variasi temperatur dan variasi waktu dalam bentuk tabel dan gambar grafik.

Tabel 4.4. Hasil perhitungan tebal lapisan deposisi (dalam μm)

t=30 menit		T=300°C	
T	Tebal	t	Tebal
200	0,59	0	3,02
300	0,85	30	0,85
400	0,54	60	0,68
		90	1,74



Gambar 4.18. Tebal film untuk variasi temperatur



Gambar 4.19. Tebal film untuk variasi waktu

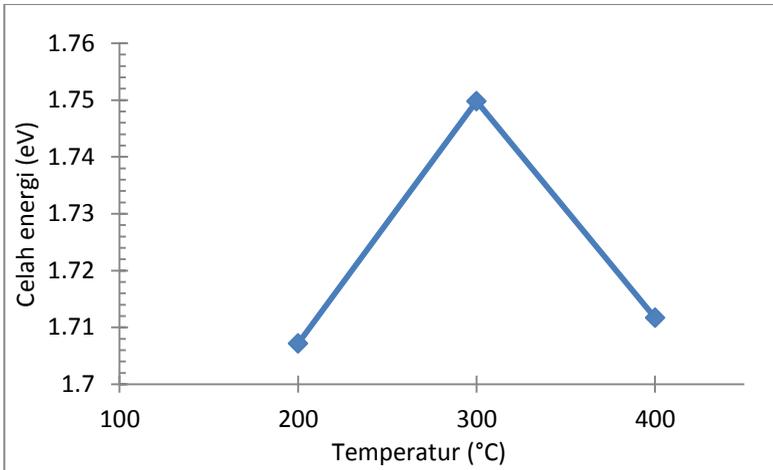
4.4.2. Penentuan Celah Energi

Penentuan celah energi dilakukan dengan menggunakan metode tauc plot. Pada metode ini diplot nilai dari $(\alpha hv)^{1/2}$ sebagai ordinat dan hv sebagai absis. Kemudian pada bagian yang naik secara tajam (zona B sebagaimana pada Gambar 2.9) diekstrapolasi, lalu bagian yang memotong absis merupakan nilai celah energinya. Dalam penentuan celah energi ini digunakan software *microsoft excel* dan ekstrapolasinya menggunakan *linear trendline*. Penentuan celah energi menggunakan metode Tauc plot secara rinci disajikan dalam lampiran E.

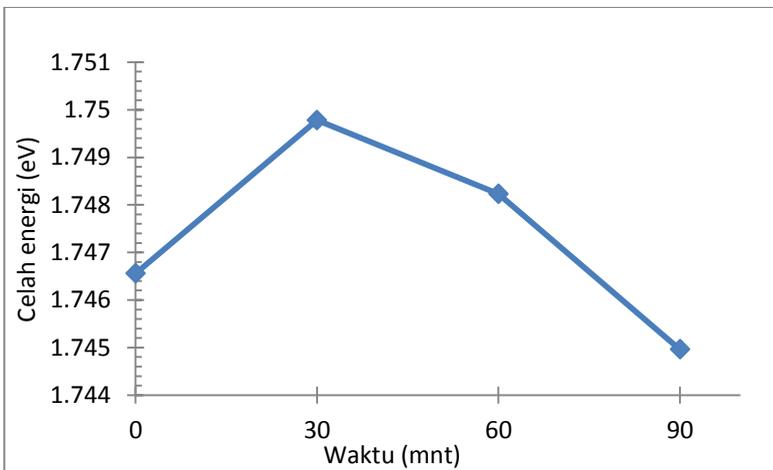
Berikut disajikan dalam bentuk tabel hasil perhitungan celah energi dengan menggunakan metode Tauc plot untuk variasi temperatur dan variasi waktu :

Tabel 4.5. Hasil perhitungan celah energi (eV)

t=30 menit		T=300°C	
T	E Gap	t	E Gap
200	1,71	0	1,75
300	1,75	30	1,75
400	1,71	60	1,75
		90	1,74



Gambar 4.20. Celah energi untuk variasi temperatur



Gambar 4.21. Celah energi untuk variasi waktu

4.4.3. Penentuan Energi Urbach

Dari karakterisasi sifat optik dapat ditentukan energi urbach. Energi urbach ditentukan berdasarkan persamaan 2.9. Penentuan energi urbach dilakukan dengan membuat plot grafik dengan konstanta absorpsi α sebagai ordinat dan $h\nu$ sebagai absis. Kemudian ditarik *trendline* secara eksponensial. Dari grafik didapatkan persamaan garis dalam bentuk :

$$y = C \exp(Kx) \quad (4.3)$$

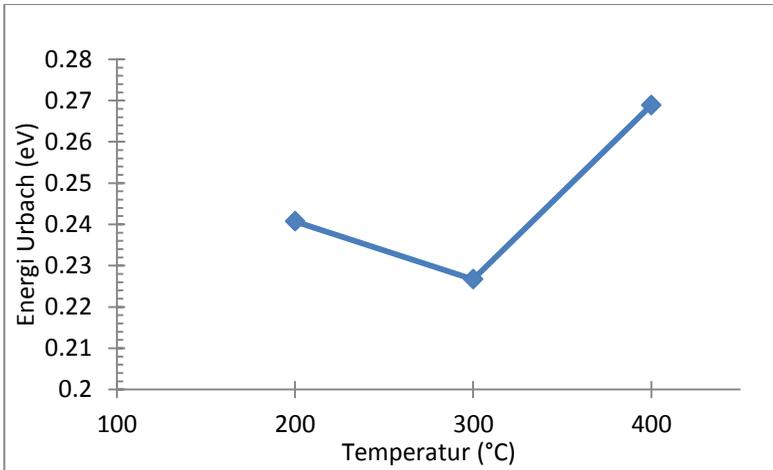
Dari persamaan tersebut nilai y bersesuaian dengan absorbansi α , nilai C bersesuaian dengan konstanta α_0 , dan nilai K bersesuaian dengan seper energi urbach $1/E_u$. Dalam penentuan energi urbach ini digunakan software microsoft excel dengan menggunakan *exponential trendline*. Penentuan energi urbach menggunakan *exponential trendline* secara rinci disajikan dalam lampiran F.

Dari sini didapatkan nilai energi urbach dari variasi waktu dan temperatur sebagaimana disajikan dalam tabel dan grafik.

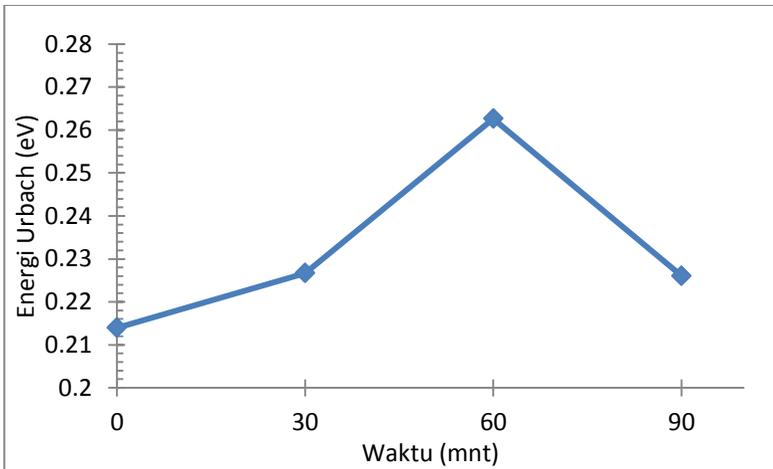
Tabel 4.6. Hasil perhitungan Energi Urbach (eV)

t=30 menit		T=300°C	
T	E Urbach	t	E Urbach
200	0,24	0	0,21
300	0,23	30	0,23
400	0,27	60	0,26
		90	0,23

Energi urbach terbentuk karena adanya cacat kristal atau konsentrasi doping / ketakmurnian yang tinggi dan bergabung ke dalam pita konduksi atau pita valensi [Wiyanto dkk., 2004]. Efek ini menghasilkan tepi absorpsi eksponensial dalam bahan semikonduktor.



Gambar 4.22. Energi urbach untuk variasi temperatur



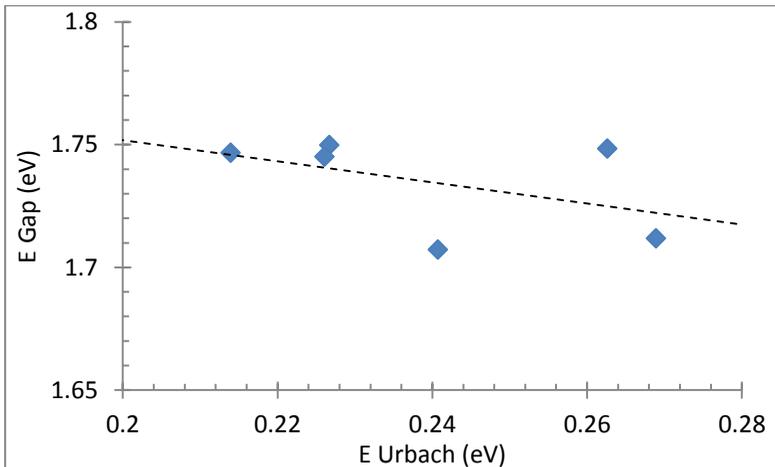
Gambar 4.23. Energi urbach untuk variasi waktu

Pada material semikonduktor a-Si:H ini energi urbach dipengaruhi oleh *dangling bond*. Dari gambar grafik terlihat

bahwa energi urbach paling kecil adalah pada sampel yang tanpa dikenai perlakuan panas anil. Hal ini dikarenakan ketika pemanasan ikatan antara silikon dengan hidrogen lepas, sehingga meningkatkan *dangling bond* pada material.

4.4.4. Hubungan Celah energi dan Energi Urbach

Nilai dari energi urbach berkaitan dengan adanya *defect* pada film. *Defect* yang paling utama adalah munculnya *dangling bond* pada film. Ketika *dangling bond* pada film meningkat, maka nilai dari celah energi akan menurun. Hal ini terjadi karena konsentrasi *dangling bond* yang meningkat menyebabkan *exponential bandtail* yang semakin landai pada pita konduksi maupun pita valensi. Akibatnya nilai band gap akan semakin kecil. Gambar grafik hubungan antara celah energi dan energi urbach diberikan pada Gambar 4.24. Nilai *trendline* yang menurun bersesuaian dengan hasil penelitian oleh RN.Kré dkk [2010].



Gambar 4.24. Hubungan antara celah energi dan energi urbach

4.5. Rapat Keadaan Silikon dan Hidrogen Dalam Film

Dangling bond terbentuk dari atom silikon yang tidak berikatan, baik dengan silikon tetangganya maupun dengan hidrogen. Akibatnya elektron dari silikon tersebut tidak berpasangan, sehingga akan ada spin elektron yang tidak berpasangan. Rapat keadaan dari spin elektron tersebut dapat ditentukan menggunakan persamaan RN. Kré dkk [2010] :

$$N(S) = 1 \times 10^{15} \cdot \alpha_{1,2}^{1.3501} \quad (4.4)$$

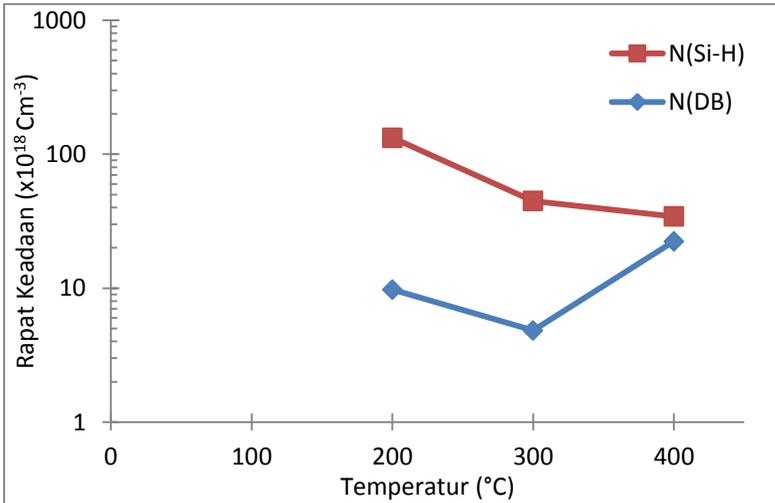
dimana N_s adalah rapat keadaan spin (dalam cm^{-3}), dan $\alpha_{1,2}$ adalah nilai koefisien absorbs pada saat nilai $h\nu = 1.2 \text{ eV}$. Karena karakterisasi UV-Vis hanya dilakukan untuk nilai $h\nu$ antara 1.55 eV hingga 4.97 eV, maka nilai dari $\alpha_{1,2}$ ditentukan secara matematik. Penentuan nilai $\alpha_{1,2}$ dilakukan menggunakan *exponential trendline* pada persamaan 4.3, dengan $x = 1.2$.

Dari perhitungan didapatkan nilai rapat keadaan N_s sebagaimana disajikan dalam Tabel 4.7.

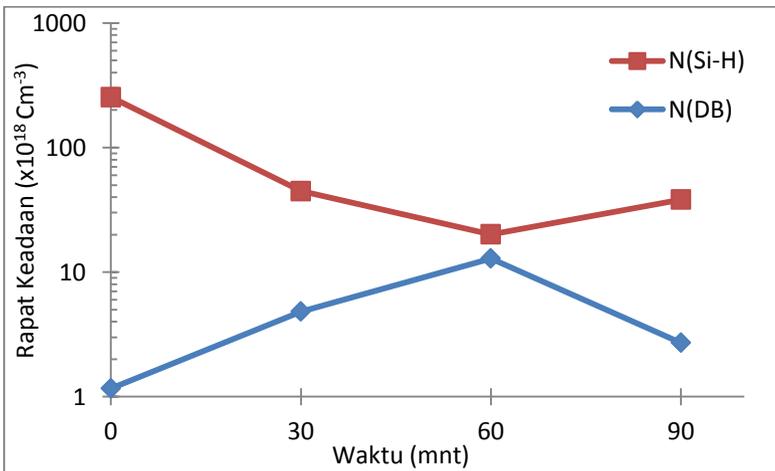
Tabel 4.7. Rapat keadaan spin elektron

t=30 menit		T=300°C	
T	N_s	t	N_s
200	$9,75 \times 10^{18}$	0	$1,16 \times 10^{18}$
300	$4,82 \times 10^{18}$	30	$4,82 \times 10^{18}$
400	$2,24 \times 10^{19}$	60	$1,29 \times 10^{19}$
		90	$2,71 \times 10^{18}$

Berikut ini disajikan dalam gambar grafik hasil perhitungan rapat keadaan spin dari Tabel 4.7 digabungkan dengan rapat keadaan Si-H dari Tabel 4.3.



Gambar 4.25. Rapat keadaan untuk variasi temperatur



Gambar 4.26. Rapat keadaan untuk variasi waktu

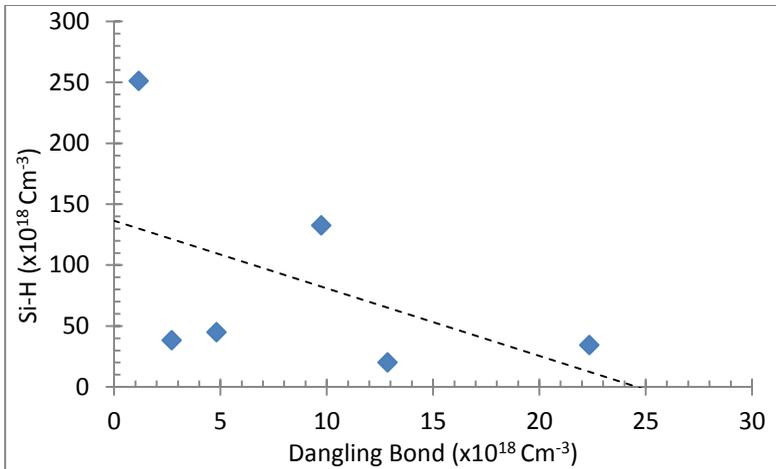
Rapat keadaan dari *dangling bond* didekati dengan rapat keadaan spin. Dari hasil perhitungan didapatkan nilai *dangling bond* berada pada orde 10^{18} cm^{-3} . Sebagai pembandingan nilai rapat keadaan *dangling bond* untuk film a-Si:H terbaik yang dideposisi dengan gas silan adalah pada orde 10^{15} cm^{-3} hingga 10^{16} cm^{-3} [Kré dkk, 2010]. Sehingga dapat dinyatakan film sampel yang digunakan adalah kualitas yang kurang baik.

Dari Gambar 4.25 dan 4.26 terlihat bahwa rapat keadaan *dangling bond* yang paling kecil, yaitu $1.16 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, terjadi pada film yang tidak dikenai anil. Hal ini disebabkan karena tanpa perlakuan anil tidak ada ikatan Si-H yang terlepas. Sebaliknya rapat keadaan *dangling bond* tertinggi, yaitu $2.24 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, terjadi pada saat anil pada temperatur 400°C , yang merupakan temperatur anil tertinggi pada penelitian ini.

Si-H dan *dangling bond* memiliki hubungan keterkaitan yang rumit. Hal ini dikarenakan pada saat proses anil terjadi beberapa kemungkinan, antara lain adalah :

- ❖ Ketika ikatan Si-H putus, atom H yang terlepas selanjutnya membentuk Si-H₂ dan meninggalkan *dangling bond*. Dengan demikian maka rapat keadaan Si-H berbanding terbalik dengan rapat keadaan *dangling bond* dan juga Si-H₂.
- ❖ Ketika salah satu atom H pada Si-H₂ terlepas, maka akan membentuk Si-H dan *dangling bond*, sehingga membentuk H-Si-DB.

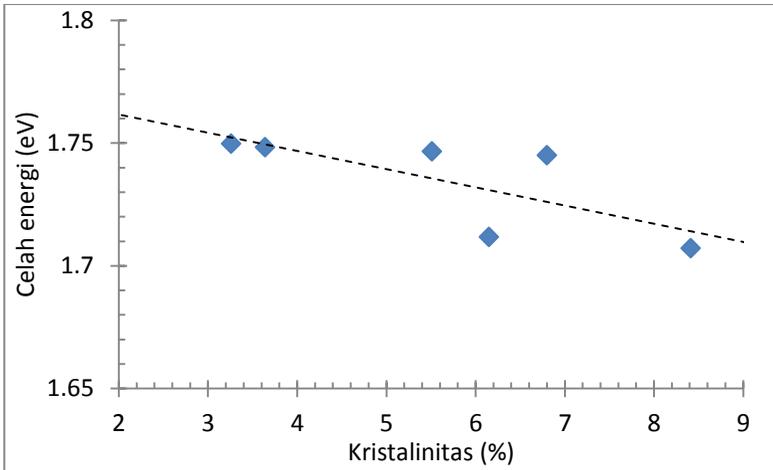
Sesuai penjelasan diatas maka secara teoritik Si-H berbanding terbalik dengan *dangling bond*. Hal ini terlihat dari Gambar 4.27, dimana rapat keadaan Si-H cenderung turun ketika rapat keadaan *dangling bond* naik.



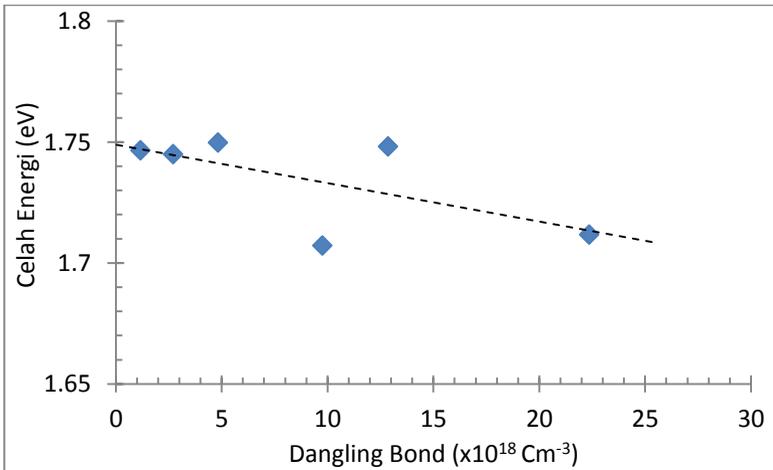
Gambar 4.27. Hubungan antara rapat keadaan Si-H dengan *dangling bond*

4.6. Faktor Yang Mempengaruhi Celah Energi

Dari penelitian ini didapatkan hasil bahwa celah energi film dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain yaitu : 1) %kristalinitas, dan 2) rapat keadaan *dangling bond*. Pada %kristalinitas terlihat bahwa celah energi cenderung turun ketika %kristalinitas naik. Pada rapat keadaan *dangling bond*, terlihat bahwa celah energi cenderung turun ketika rapat keadaan *dangling bond* naik.



Gambar 4.28. Hubungan antara celah energi dan %kristalinitas



Gambar 4.29. Hubungan antara celah energi dan rapat keadaan *dangling bond*

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dengan judul “Studi Pengaruh Anil Pada Sifat Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H) Yang Ditumbuhkan Dengan Metode PECVD” maka dapat ditarik kesimpulan bahwa :

1. Nilai kristalinitas didapatkan pada nilai antara 3.26% – 6.8%. Nilai kristalinitas terendah pada temperatur 300°C dan waktu 30 menit. Nilai kristalinitas tertinggi pada temperatur 300°C dan waktu 90 menit.
2. Energi gap didapatkan pada nilai antara 1.707 – 1.750 eV. Energi gap terendah pada temperatur 200°C dan waktu 30 menit. Energi gap tertinggi pada temperatur 300°C dan waktu 30 menit.
3. Energi urbach didapatkan pada nilai antara 0.214 – 0.269 eV. Energi urbach terendah pada film tanpa anneal. Energi urbach tertinggi pada temperatur 400°C dan waktu 30 menit.
4. *Dangling bond* didapatkan pada nilai antara $1.16 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ – $2.24 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. *Dangling bond* terendah pada film tanpa anneal. *Dangling bond* tertinggi pada pada temperatur 400°C dan waktu 30 menit.
5. Rapat keadaan *dangling bond* cenderung berbanding terbalik dengan rapat keadaan Si-H.
6. Energi gap berbanding terbalik dengan energi urbach.
7. Energi gap berbanding terbalik dengan % kristalinitas.

8. Energi gap berbanding terbalik dengan rapat keadaan *dangling bond*.

5.2. Saran

1. Untuk penelitian selanjutnya disarankan menggunakan substrat ITO ataupun *Corning Glass*, sehingga perlakuan anneal bisa mencapai temperatur $\sim 900^{\circ}\text{C}$.
2. Proses anneal pasca deposisi dan karakterisasi disarankan dilakukan sesegera mungkin setelah proses deposisi selesai untuk menghindari terkelupasnya lapisan film dari substrat.

DAFTAR PUSTAKA

- Aamodt, Tor Ingve. 2011. “*Characterization of ZnS:Cr films for Intermediate Band Solar Cells*”. Department of Physics. Norwegian University of Science and Technology : Norwegia
- Beiser, A. 1992.”*Konsep Fisika Modern*”. Erlangga.
- Bilalodin. 2012. “*Pembuatan Dan Penentuan Celah Pita Optik Film Tipis TiO₂*”. Prosiding Pertemuan Ilmiah XXVI HFI Jateng & DIY : Purworejo. ISSN : 0853-0823
- Callister, J.W.D., 2003. “*Materials Science and Engineering: An Introduction*”. John Wiley & Sons : New York.
- Darminto. “*Fisika Zat Padat*”. Surabaya : Bahan kuliah Fisika Zat Padat Fisika FMIPA-ITS.
- Deng, Xunming. Schiff, Eric A. 2003. “*Amorphous Silicon-Based Solar Cell*”. John Wiley and Sons : London.
- Dessyntya, Rizky Mayang. Yahya, Eddy. 2010. “*PECVD Sistem Permasalahan dan Penyelesaian*”. Jurusan Fisika FMIPA ITS : Surabaya.
- Dimroth, Frank. Kurtz, Sarah. 2007. “*High Efficiency Multijunction Solar Cells*”. MRS Bulletin, Vol 32. (www.mrs.org/bulletin).
- Emery, Keith. 2003. “*Measurement and Characterization of Solar Cells and Modules*”. John Wiley and Sons : London.
- Fonash, Stephen J. 2010. “*Solar Cell Devices Physics*”. Elsevier (www.elsevier.com).
- Gahr and D. Koppenkastrop. “*UV/VIS Measurement of Load, Sludge Characterictics and Toxicity*”. STIP Isco GmbH, 64823 Groß-Umstadt, Siemenstrasse 2, Germany.

- Groza, A. dkk. 2005. “*Infrared Spectral Investigation Of Organosilicon Compounds Under Corona Charge Injection In Air At Atmospheric Pressure*”. National Institut for Laser : Bucharest.
- Irzaman, Y. Darvina. dkk. “*Physical and Pyroelectric properties of antalum-xide doped lead Zirconium titanate [Pb_{0,995}O(Zr_{0,525}Ti_{0,465}Ta_{0,010})O₃] Thin Film and Their Application for IR Sensor*”, phys, stat, sol (a), 199, no.3. 416-424,9 (2003).
- Krane, Kenneth S. 2008. “*Fisika Modern*”. UI-Press : Jakarta. ISSN: 979-456-102-9.
- Kré, R.N. dkk. 2010. “*Optical absorption of the hydrogenated evaporated amorphous silicon*”. International Journal of the Physical Sciences Vol. 5(6), pp. 675-682.
- Kroll, U. Mikhailov, S. 1996. “*Hydrogen in amorphous and microcrystalline silicon films prepared by hydrogen dilution*”. Applied Physics Journal : USA.
- Launer, Philip J.1987. “*Infrared Analysis of Organosilicon Compound : Spectra-Structure Correlation*”. Laboratory for Material, Inc : New York.
- Lim, PK. Dkk. “*Effect of hydrogen on dangling bond in a-Si thin film*”. Journal of Physics: Conference Series 61 (2007) 708–712.
- Luque, Antonio. Marti, Antonio. 2003. “*Theoretical Limit of Photovoltaic Conversion*”. John Wiley and Sons : London.
- M. M. Grady, A. Morlok, C. D. Fernandes, and D. Johnson. 2006. “*Spectroscopy of Stardust from 200nm to 16μm (with a Gap in the Middle)*”. Planetary and Space Sciences Research institute. The Open University, Walton Hall, MK7 6AA : UK.

- Mitayani, Maulida. 2013. “*Struktur Dan Sifat Optik Film Tipis Cds Doping Zn Yang Ditumbuhkan Dengan DC Magnetron Sputtering*”. Laporan Tugas Akhir Fisika FMIPA-UNNES : Semarang.
- Morajev, M. dkk. 2003. “*Plasma enhanced chemical vapour deposition of hydrogenated amorphous silicon at atmospheric pressure*”. Universiti of California : Los Angeles.
- Munyeme, Geoffrey. 2003. “*Experimental and Computer Modelling Studies of Metastability of Amorphous Silicon Based Solar Cell*”. Netherland Organization for Scientific Research : Netherland.
- Purwaningsih, S.Y. Karyono. Sudjatmoko. 2005. “*Efek Doping Al pada Sifat Optik dan Listrik Lapisan Tipis ZnO Hasil Deposisi dengan DC Sputtering*”. Jurnal Fisika dan Aplikasinya. Volume 1, Nomor 1, 1-5.
- REN21. 2014. “*Renewables 2014, Global Status Reports*”. (www.ren21.net).
- Romzie, M. 2008. “*Studi Konduktivitas Listrik, Kurva I-V Dan Celah Energi Fotodiode Berbasis Film Tipis $Ba_{0,75}Sr_{0,25}TiO_3$ (BST) Yang Didadah Galium (BSGT) Menggunakan Metode Chemical Solution Deposition (CSD)*”. Laporan Tugas Akhir Fisika FMIPA-IPB : Bogor.
- Saragih, Horasdia, H. Aliah, E. Sustini, A. Limbong, A. M. Hutapea. 2010. “*Sifat Optik Lapisan Tipis In_2O_3 yang Ditumbuhkan dengan Metode MOCVD*”. Journal Matematika dan Sains, Vol. 12 Nomor 2, 85-92
- Schroder, K.D. 2006. “*Semiconductor Material and Device Characterization*”. John wiley & sons : Canada.

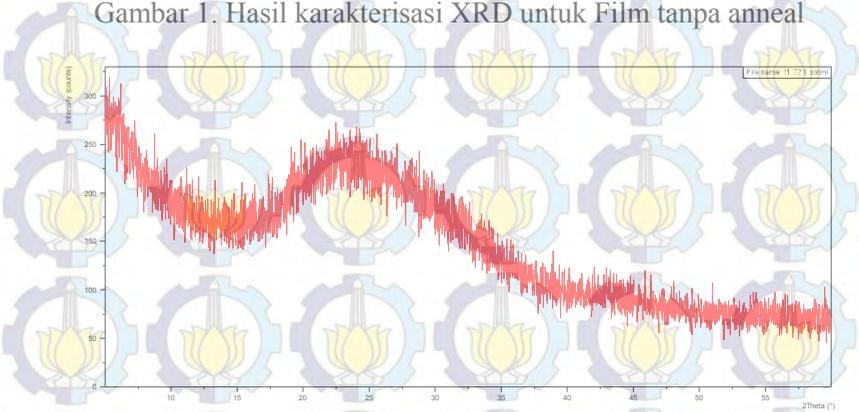
- Shokri, B. Firouzjah, MA. Hosseini SI. “*FTIR Analysis of silicon dioxide thin film deposited by Metal organic-based PECVD*”. Shahid Bahesti University : Tehran.
- Smets, A. H. M. 2002. “*Growth Related Material Properties Of Hydrogenated Amorphous Silicon*”. tesis in Universitat de Barcelona. <http://alexandria.tue.nl/extra2/200211441.pdf>
- Street, RA. 1991. “*Hydrogenated Amorphous Silicon*”. Cambridge University Press : Cambridge.
- Stuart, Barbara. 2004. “*Infrared Spectroscopy : Fundamental and Application*”. John Wiley and Sons. ISBN 0-470-85427.
- Syamsu, Darsikin¹, Iqbal, Jusman¹, Winata², T., Sukirno, Barmawi, M. 2005. “*Penumbuhan Lapisan Tipis $\mu\text{C-Si:H}$ Dengan Sistem Hot Wire Pecvd Untuk Aplikasi Divais Sel Surya*”. Jurnal Matematika dan Sains, Vol. 10 No. 3, hal 93-96.
- Vilamitjana, D. S. 2004. “*Amorphous Silicon Solar Cells Obtained By Hot-Wire Chemical Vapour Deposition*”. tesis in Universitat de Barcelona. <http://alexandria.tue.nl/extra2/200211441.pdf>
- Wiyanto. Sugianto, I. Supomo. 2004. “*Pengaruh Anneling pada film tipis Ta_2O_5 Ditumbuhkan dengan Metode DC magnetron sputtering*”. Prosiding Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses. ISSN 1411-4216, 1-5
- Yang, Cheng-Chieh. 2011. “*Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide Prepared using DC Saddle Field PECVD for Photovoltaic Applications*”. University of Toronto : Toronto.
- Zse, S.M. Kwok, K.Ng. 2007. “*Physics of Semiconductor Devices*”. John Wiley and Sons : New Jersey.

LAMPIRAN A

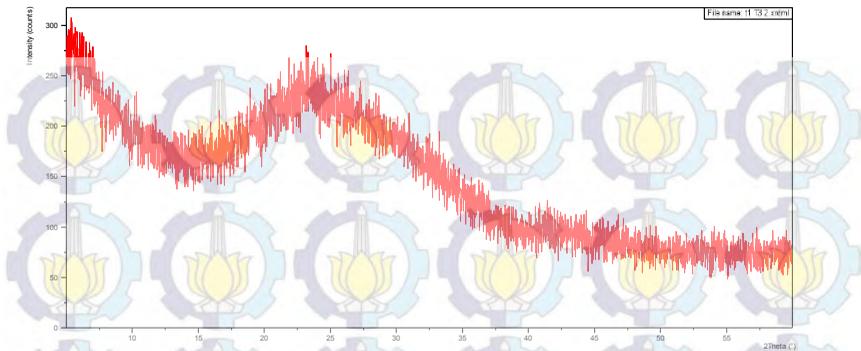
GRAFIK HASIL KARAKTERISASI XRD



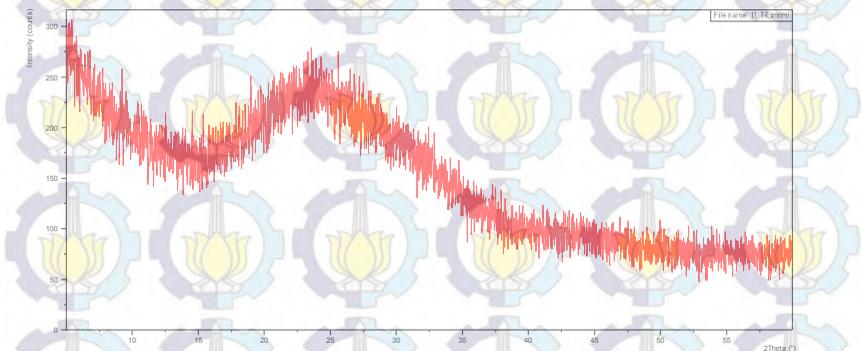
Gambar 1. Hasil karakterisasi XRD untuk Film tanpa anneal



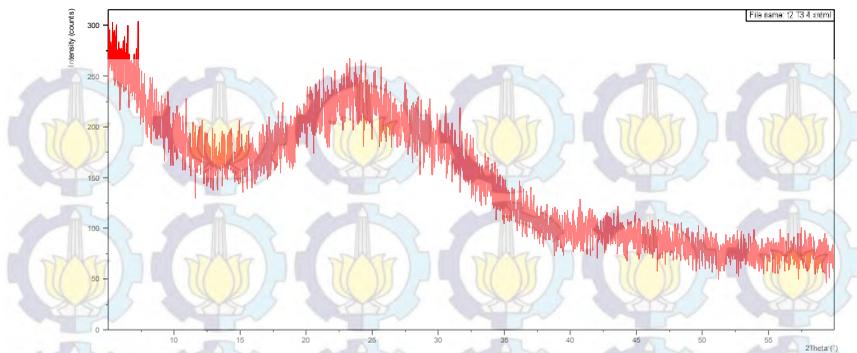
Gambar 2. Hasil karakterisasi XRD untuk Film T=200C t=30m



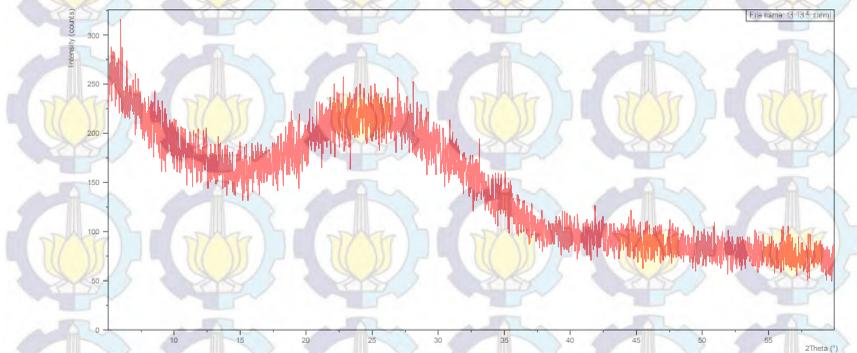
Gambar 3. Hasil karakterisasi XRD untuk Film T=300C t=30m



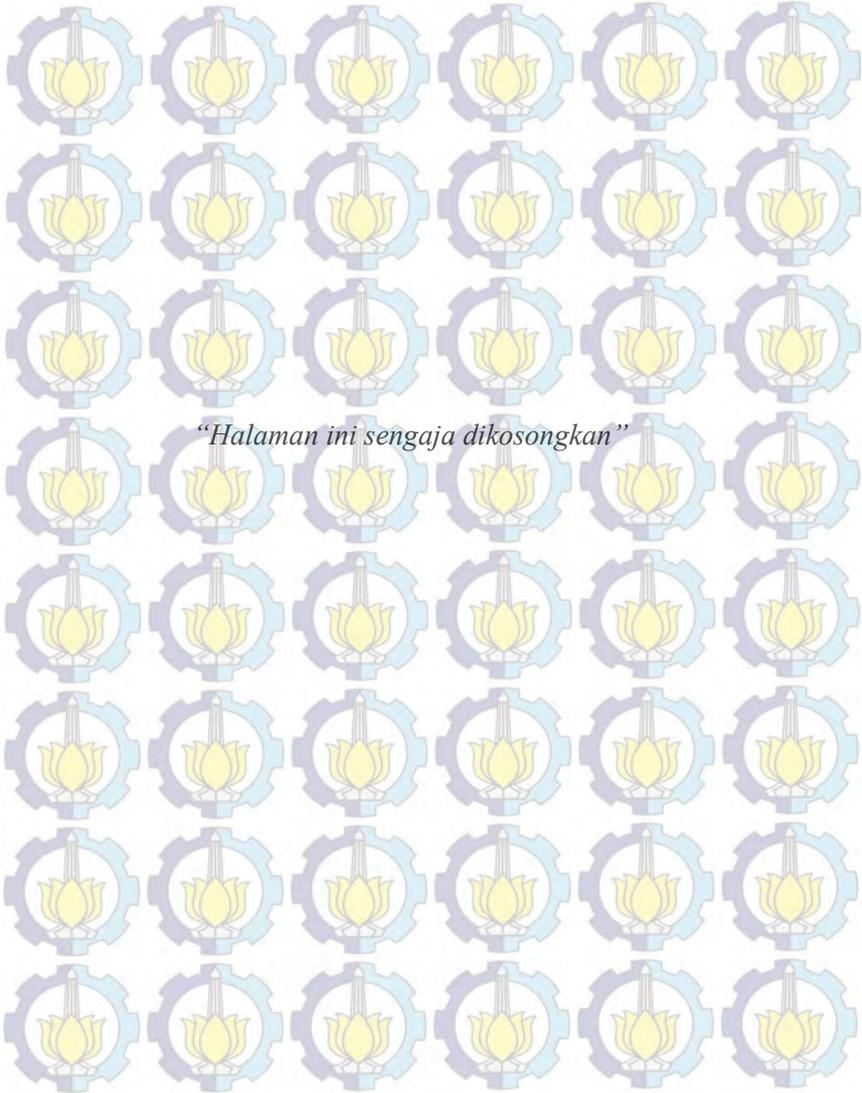
Gambar 4. Hasil karakterisasi XRD untuk Film T=400C t=30m



Gambar 5. Hasil karakterisasi XRD untuk Film $T=300\text{C}$ $t=60\text{m}$



Gambar 6. Hasil karakterisasi XRD untuk Film $T=300\text{C}$ $t=90\text{m}$

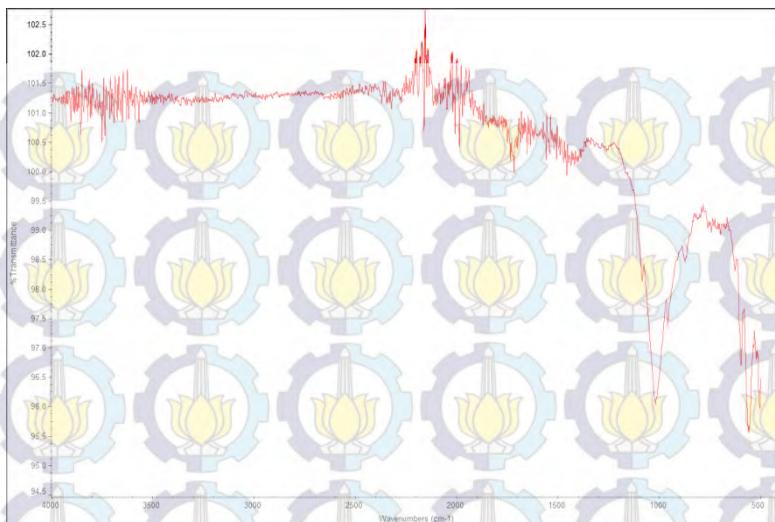


LAMPIRAN B

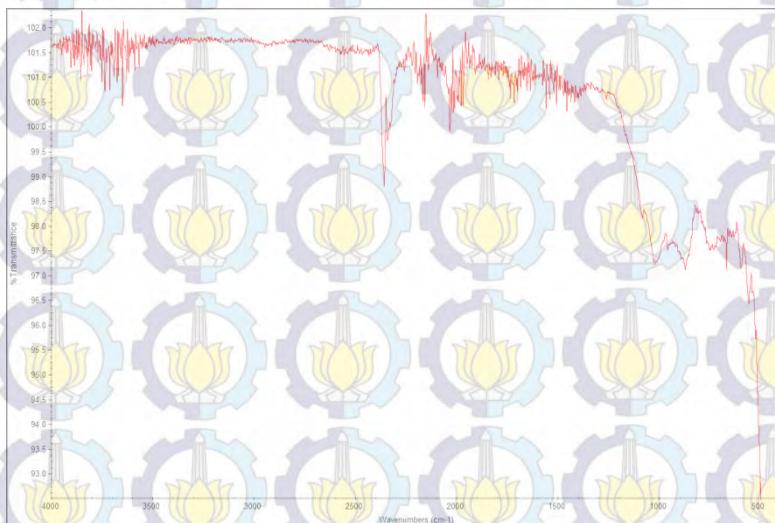
GRAFIK HASIL KARAKTERISASI FTIR



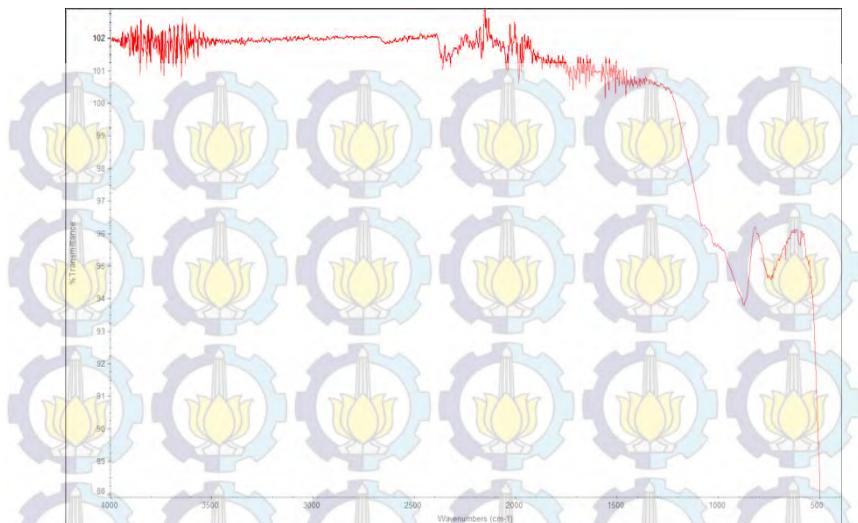
Gambar 1. Hasil karakterisasi FTIR untuk film tanpa anneal



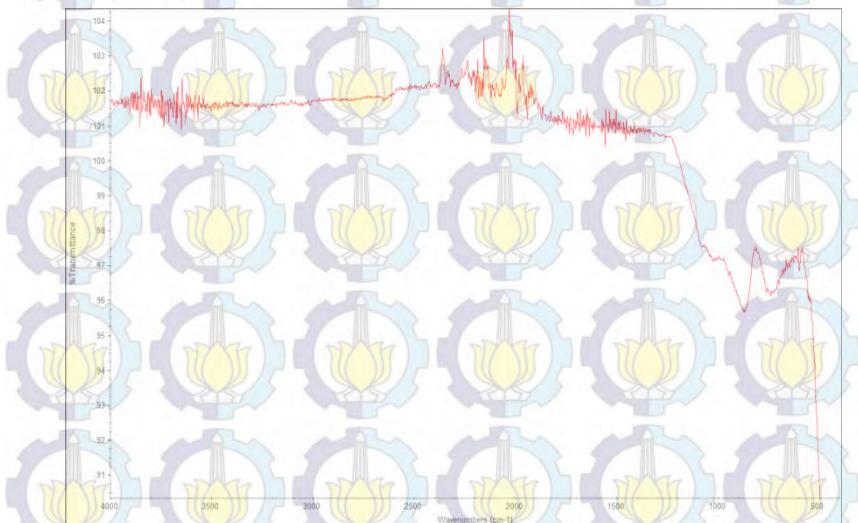
Gambar 2. Hasil karakterisasi FTIR untuk film T=200C t=30m



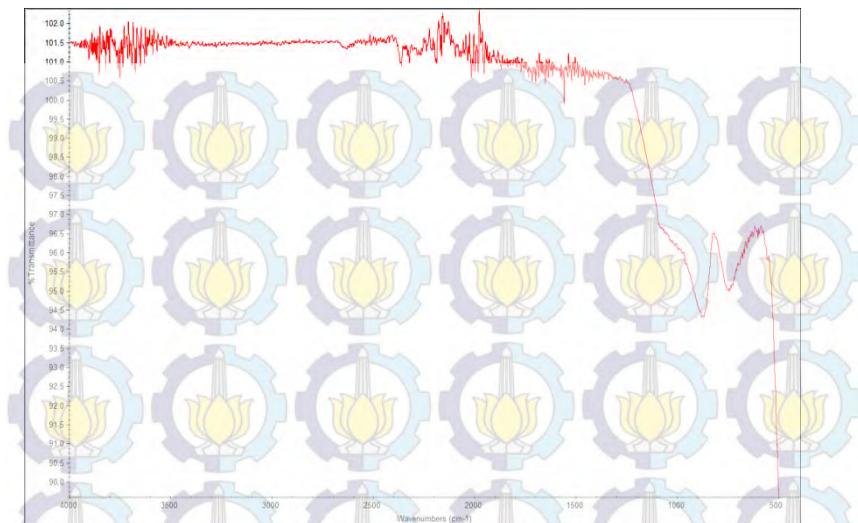
Gambar 3. Hasil karakterisasi FTIR untuk film T=300C t=30m



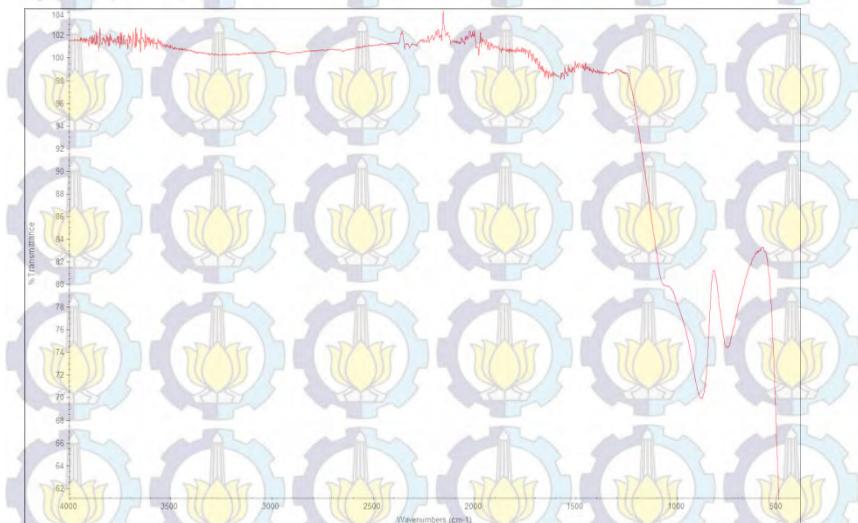
Gambar 4. Hasil karakterisasi FTIR untuk film $T=400^{\circ}\text{C}$ $t=30\text{m}$



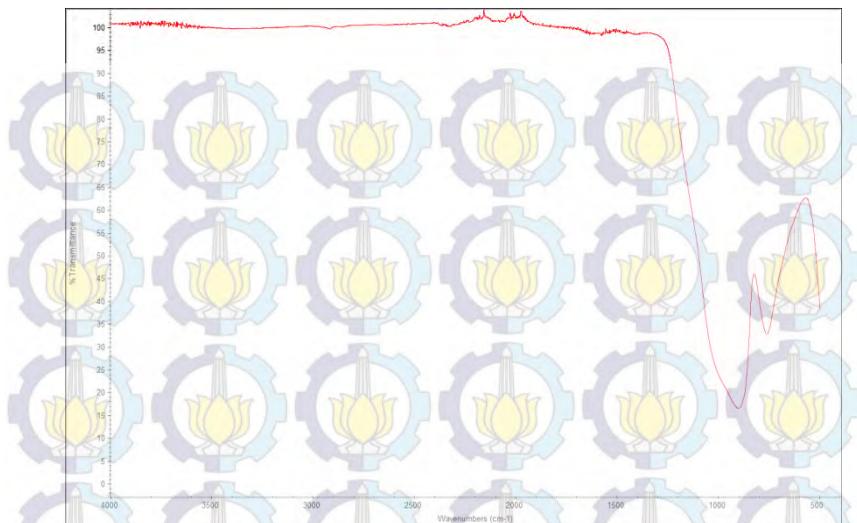
Gambar 5. Hasil karakterisasi FTIR untuk film $T=300^{\circ}\text{C}$ $t=60\text{m}$



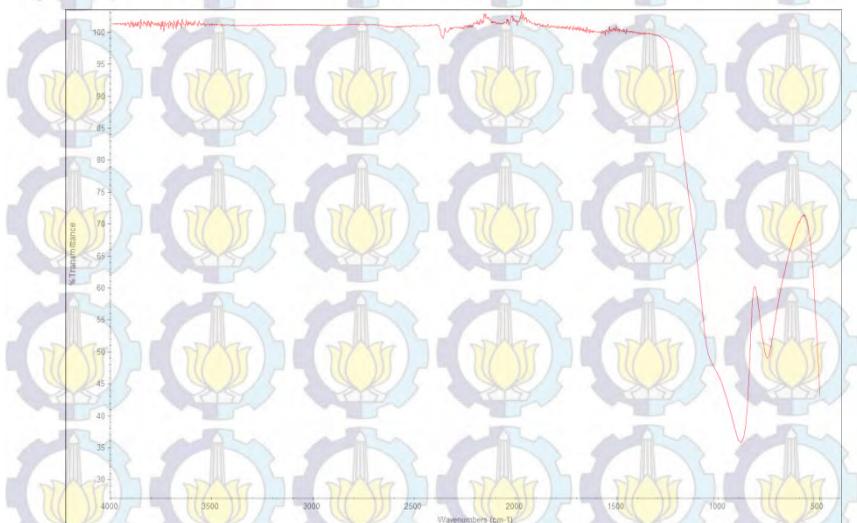
Gambar 6. Hasil karakterisasi FTIR untuk film T=300C t=90m



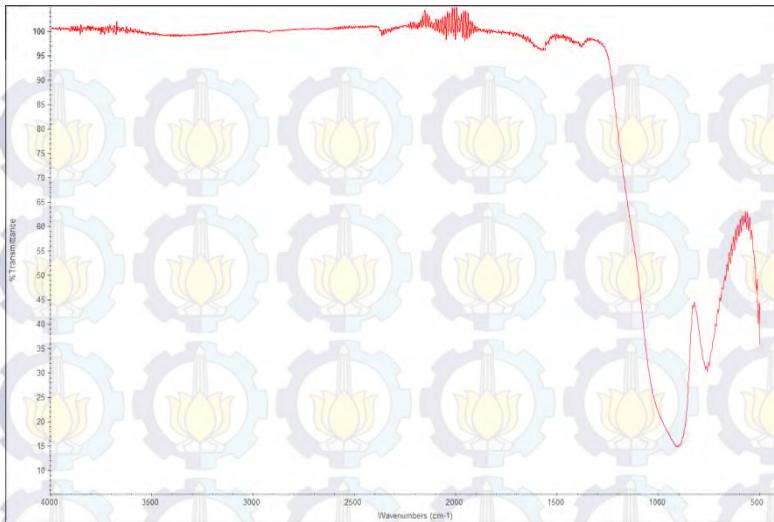
Gambar 7. Hasil karakterisasi FTIR untuk substrat tanpa anneal



Gambar 8. Hasil karakterisasi FTIR untuk substrat T=200C



Gambar 9. Hasil karakterisasi FTIR untuk substrat T=300C



Gambar 10. Hasil karakterisasi FTIR untuk substrat T=400C

LAMPIRAN C

DATA HASIL KARAKTERISASI MENGGUNAKAN SPEKTROSKOPI UV-VIS

Tabel 1. Data Hasil Karakterisasi Menggunakan
Spektrometer UV-Vis

Lambda	Transmitansi (%)					
	Tanpa Aneal	T=200 t=30	T=300 t=30	T=400 t=30	T=300 t=40	T=300 t=90
250	****	****	****	****	****	1.998
255	****	****	****	****	****	****
260	0.247	****	****	****	****	****
265	****	****	****	****	****	****
270	****	****	****	****	****	3.31
275	1.813	****	****	****	****	****
280	****	****	****	****	****	****
285	****	****	****	****	****	****
290	****	****	****	****	****	2.37
295	****	****	****	****	****	****
300	0.207	****	89.428	****	****	****
305	****	59.678	15.993	30.944	35.182	****
310	****	9.906	2.697	5.129	5.834	****
315	****	2.644	0.738	1.397	1.558	0.001

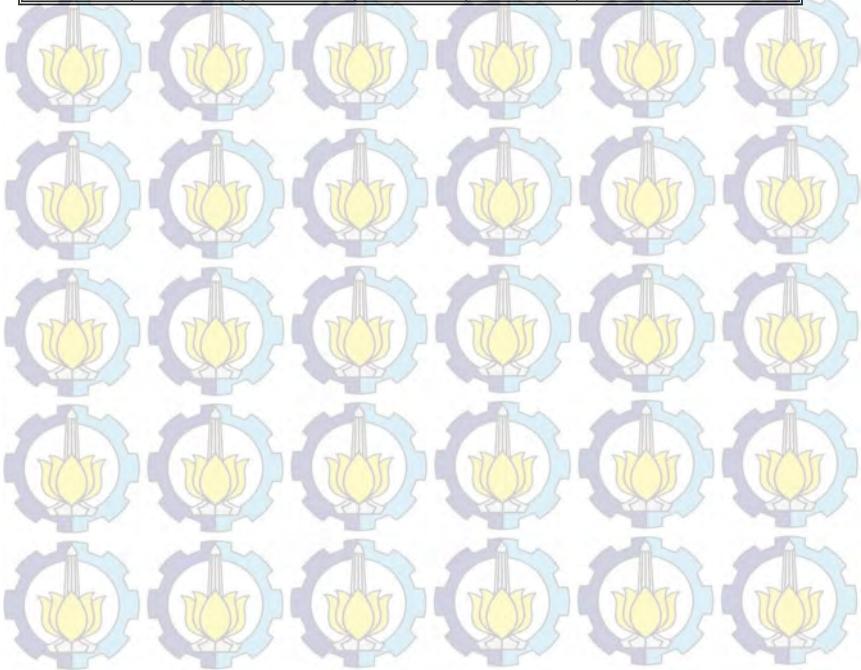
320	****	1.333	0.379	0.711	0.773	****
325	****	0.581	0.124	0.271	0.273	****
330	****	0.513	0.108	0.242	0.235	****
335	****	0.397	0.078	0.182	0.165	****
340	****	0.374	0.074	0.175	0.151	****
345	****	0.302	0.055	0.139	0.109	****
350	****	0.328	0.065	0.157	0.125	****
355	****	0.281	0.049	0.129	0.097	****
360	****	0.254	0.041	0.116	0.082	0.001
365	****	0.297	0.054	0.13	0.1	****
370	****	0.325	0.061	0.152	0.123	****
375	****	0.292	0.054	0.135	0.104	0.007
380	****	0.306	0.055	0.133	0.103	****
385	****	0.29	0.05	0.126	0.094	0.002
390	****	0.276	0.048	0.121	0.088	****
395	****	0.27	0.044	0.115	0.079	0.001
400	****	0.291	0.051	0.131	0.096	0.005
405	****	0.271	0.046	0.117	0.081	0.001
410	****	0.28	0.049	0.129	0.089	0.002
415	****	0.286	0.051	0.127	0.091	0.004
420	****	0.247	0.041	0.109	0.07	0.004
425	****	0.258	0.039	0.103	0.067	0.002

430	0.003	0.29	0.045	0.111	0.08	0.003
435	****	0.306	0.046	0.113	0.084	0.005
440	****	0.277	0.042	0.11	0.076	0.005
445	****	0.275	0.041	0.109	0.072	0.003
450	****	0.288	0.043	0.107	0.075	0.004
455	****	0.302	0.045	0.11	0.079	0.001
460	****	0.264	0.035	0.098	0.062	0.002
465	****	0.3	0.044	0.11	0.076	0.005
470	****	0.325	0.048	0.118	0.085	0.004
475	****	0.326	0.052	0.119	0.085	0.001
480	****	0.311	0.046	0.114	0.081	0.003
485	****	0.297	0.033	0.084	0.052	0.004
490	****	0.302	0.043	0.102	0.069	0.005
495	****	0.325	0.05	0.119	0.085	0.003
500	****	0.329	0.051	0.118	0.089	****
505	****	0.349	0.054	0.123	0.092	0.002
510	****	0.344	0.055	0.121	0.091	0.005
515	****	0.365	0.063	0.13	0.104	0.004
520	****	0.384	0.072	0.131	0.109	0.008
525	****	0.392	0.089	0.152	0.131	0.003
530	****	0.481	0.123	0.158	0.162	0.008
535	****	0.585	0.186	0.224	0.247	0.015

540	****	0.692	0.275	0.305	0.357	0.022
545	0.003	0.917	0.411	0.408	0.516	0.036
550	****	1.227	0.615	0.584	0.761	0.055
555	0.011	1.583	0.895	0.801	1.066	0.108
560	0.034	2.092	1.302	1.12	1.504	0.191
565	0.061	2.744	1.818	1.536	2.075	0.326
570	0.117	3.594	2.46	2.112	2.853	0.529
575	0.226	4.514	3.266	2.826	3.81	0.829
580	0.389	5.521	4.368	3.646	4.896	1.257
585	0.649	6.667	5.86	4.541	6.043	1.866
590	1.016	8.157	7.568	5.592	7.373	2.634
595	1.601	10.381	9.21	7.111	9.263	3.718
600	2.381	13.357	10.558	9.243	11.92	5
605	3.377	16.495	12.047	11.843	15.082	6.501
610	4.779	18.567	14.515	14.106	17.853	8.5
615	6.583	19.226	18.625	15.265	19.313	10.959
620	8.528	19.45	24.008	15.82	19.921	13.538
625	10.765	20.559	28.399	17.011	21.101	15.895
630	13.794	23.371	29.34	19.648	24.162	18.513
635	17.347	28.831	28.014	24.803	30.048	22.168
640	19.991	37.385	27.124	32.373	38.236	26.792
645	22.528	47.136	28.733	39.471	45.528	30.452

650	27.654	52.215	34.008	41.442	47.86	32.347
655	33.141	49.066	43.735	37.741	44.569	33.624
660	35.191	42.282	56.132	33.051	39.515	37.079
665	35.243	36.843	63.836	30.478	36.193	43.276
670	39.351	34.292	60.997	30.983	36.245	49.479
675	47.104	34.62	52.057	34.744	40.06	51.68
680	52.095	37.912	43.963	42.947	48.249	49.358
685	49.73	44.566	39.638	55.32	60.316	47.163
690	45.823	55.304	39.303	69.127	72.177	48.135
695	48.676	69.908	42.825	76.233	78.157	54.194
700	57.707	82.894	50.749	71.318	75.178	61.341
705	64.299	86.73	63.022	59.539	65.98	65.685
710	62.012	78.717	77.366	48.529	55.896	65.174
715	54.725	65.995	86.985	41.636	48.171	60.038
720	50.154	54.692	85.844	38.079	43.585	54.109
725	54.02	46.911	75.848	37.362	42.171	51.72
730	63.314	42.093	63.391	39.38	43.683	54.41
735	70.052	39.938	53.232	43.993	47.886	60.778
740	69.29	39.735	46.793	51.949	55.085	67.593
745	61.254	41.527	43.369	62.977	64.859	71.728
750	53.465	45.34	42.726	75.773	75.524	71.136
755	51.21	51.211	44.717	86.023	84.056	66.471

760	56.447	59.564	49.144	88.793	87.276	59.736
765	65.439	70.279	56.562	82.975	84.286	54.454
770	72.263	81.573	66.485	71.928	76.996	52.347
775	72.497	90.68	77.788	60.841	67.628	54.254
780	66.453	94.079	87.449	52.08	59.093	59.651
785	57.38	89.945	92.215	45.583	52.088	66.489
790	51.561	80.936	89.798	41.799	47.344	71.824
795	51.585	70.672	81.888	39.754	44.53	74.596
800	57.02	61.481	71.979	39.29	43.492	73.648



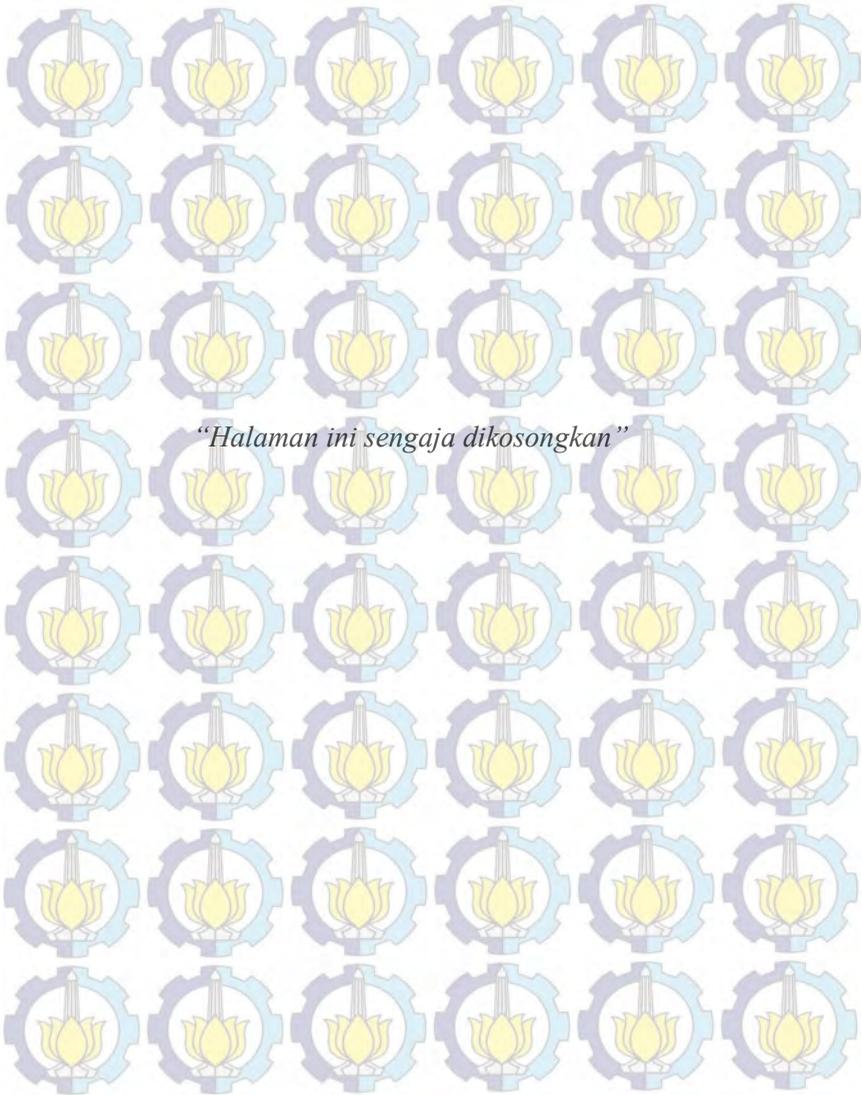
LAMPIRAN D

TABEL PERHITUNGAN TEBAL LAPISAN MENGUNAKAN PERSAMAAN SWANEPOEL

Tabel 1. Hasil Perhitungan Tebal Lapisan Deposisi
Menggunakan Persamaan Swanepoel

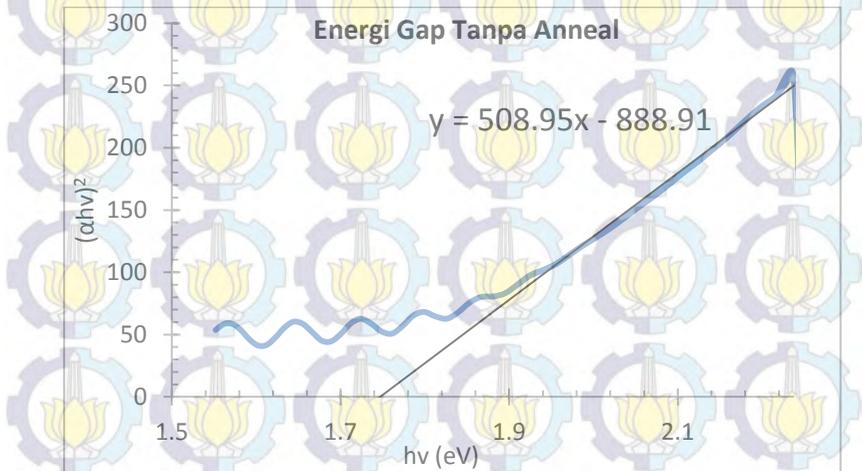
Nilai	Tanpa Anear	T=200 t=30	T=300 t=30	T=400 t=30	T=300 t=40	T=300 t=90
M_{x1}	0.725	0.9408	0.9222	0.8879	0.8728	0.6905
M_{n1}	0.5121	0.3974	0.4273	0.3736	0.4217	0.5179
λ_1	775	780	785	760	760	750
M_{x2}	0.7005	0.8673	0.8699	0.7623	0.7816	0.6327
M_{n2}	0.5015	0.3429	0.393	0.3048	0.3619	0.4717
λ_2	735	705	715	695	695	710
N_1	3.3716	6.0303	5.4334	6.322	5.3411	3.0971
N_2	3.3504	6.9647	5.8521	7.5873	6.1202	3.2688
n_1	2.5271	3.4451	3.2639	3.53	3.2349	2.4086
n_2	2.5182	3.71	3.392	3.8759	3.4715	2.4835
$d(\mu m)$	3.0243	0.5913	0.8527	0.5364	0.677	1.7452

Ket : $n_s = 1.51$

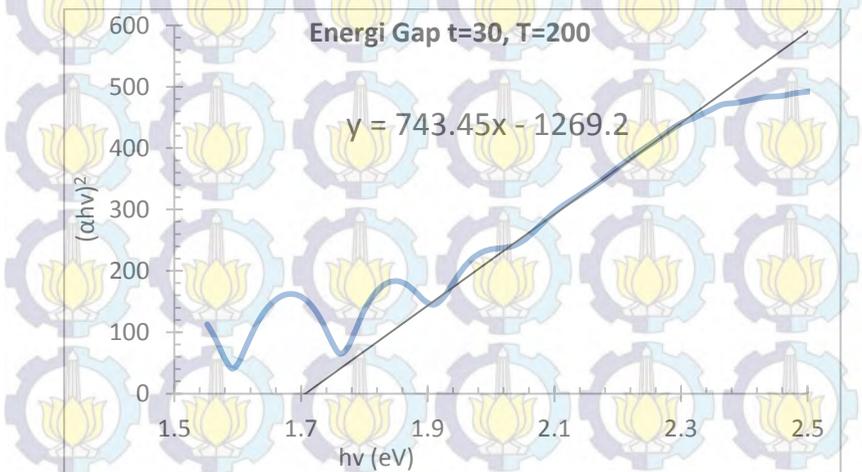


LAMPIRAN E

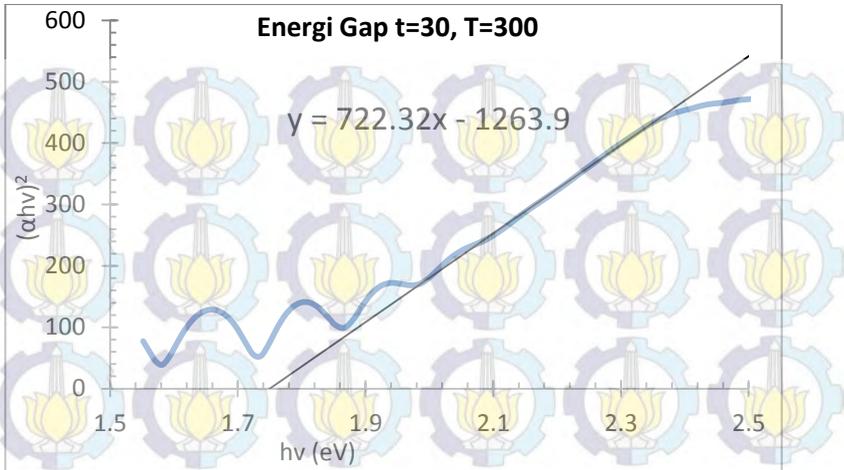
GRAFIK PENENTUAN ENERGI GAP MENGGUNAKAN METODE TAUC PLOT



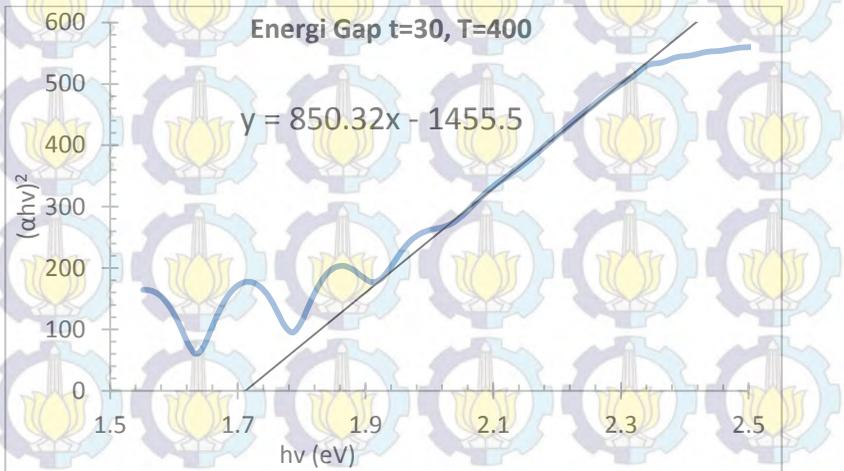
Gambar 1. Metode Tauc Plot untuk film tanpa anneal



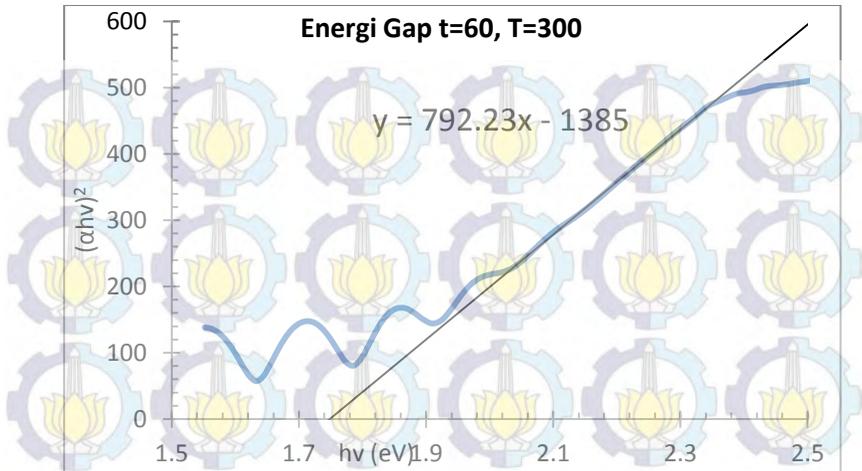
Gambar 2. Metode Tauc Plot untuk film $T=200^\circ\text{C}$ $t=30\text{m}$



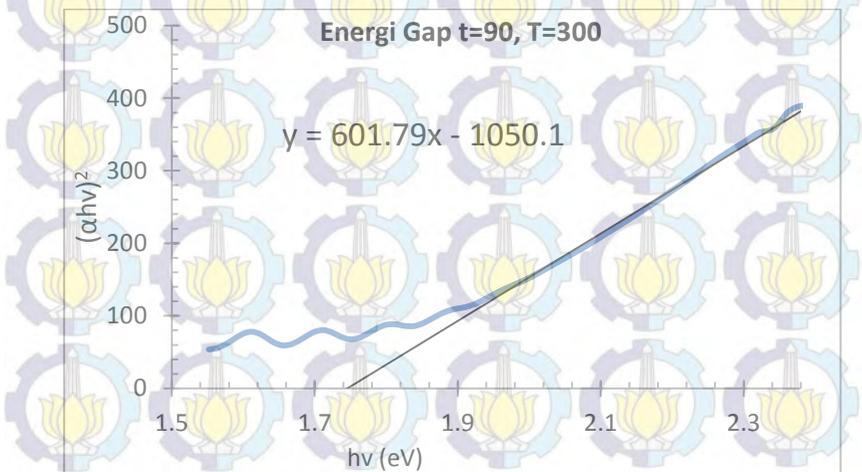
Gambar 3. Metode Tauc Plot untuk film T=300C t=30m

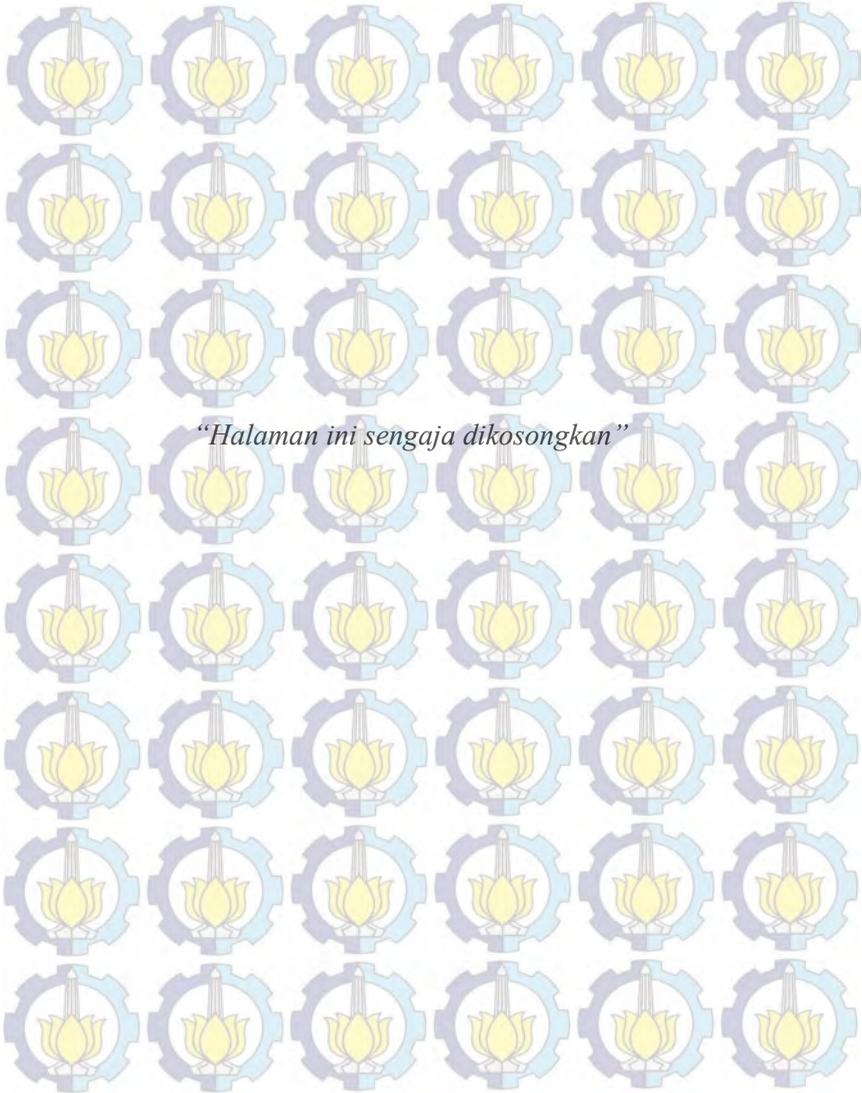


Gambar 4. Metode Tauc Plot untuk film T=400C t=30m



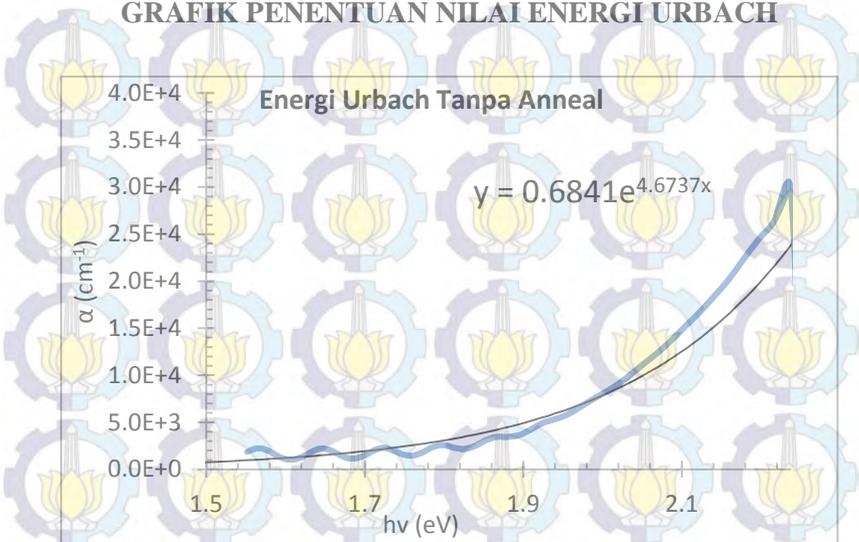
Gambar 5. Metode Tauc Plot untuk film T=300C t=60m



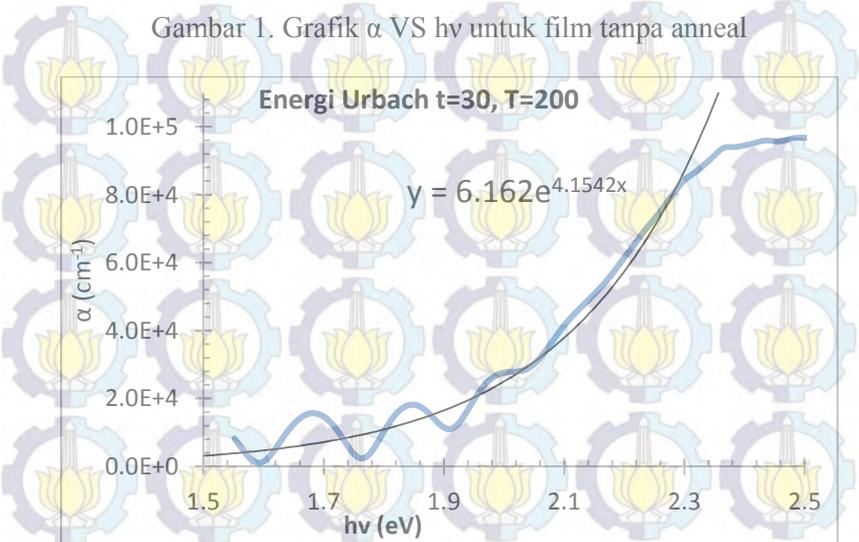


LAMPIRAN F

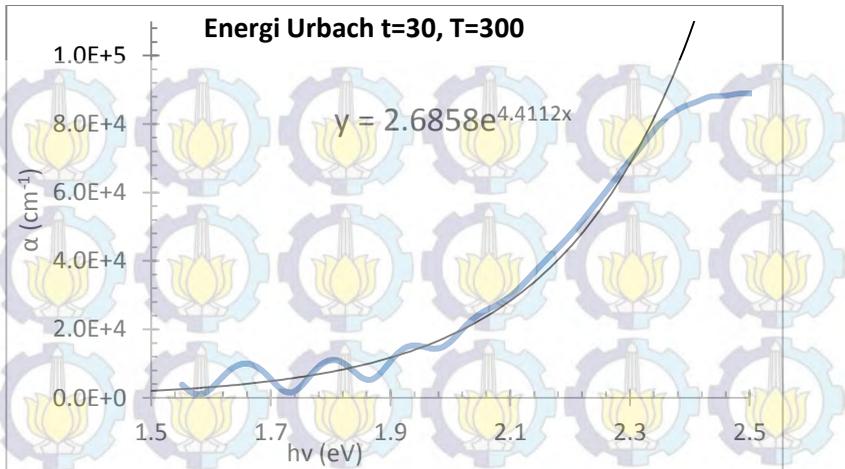
GRAFIK PENENTUAN NILAI ENERGI URBACH



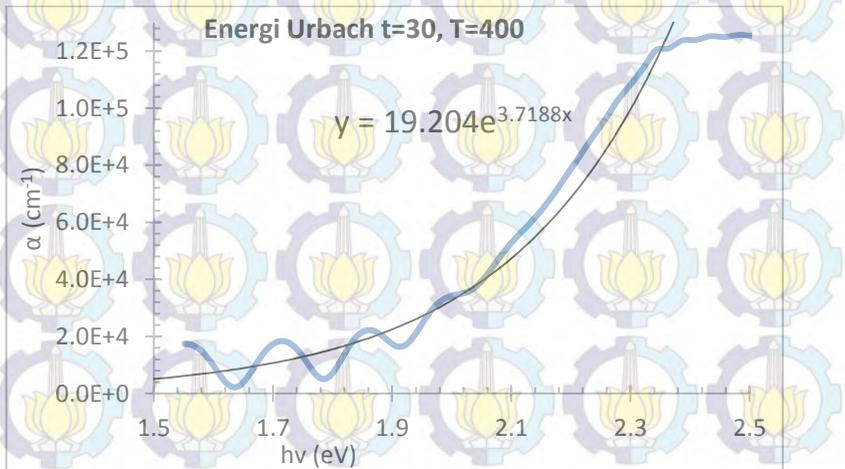
Gambar 1. Grafik α VS $h\nu$ untuk film tanpa anneal



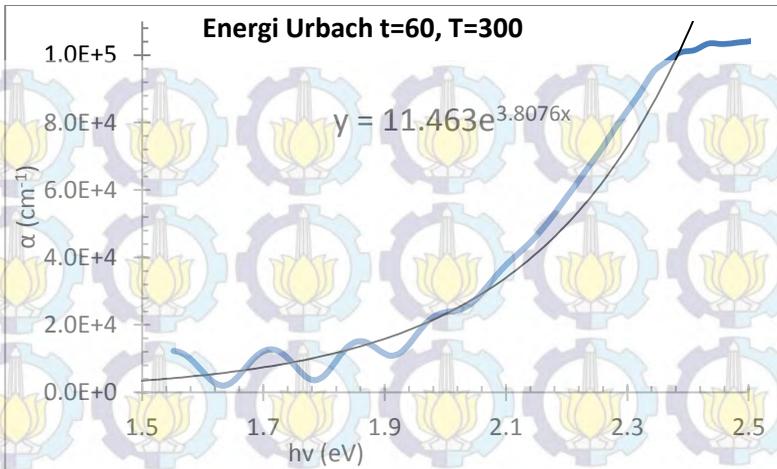
Gambar 2. Grafik α VS $h\nu$ untuk film $T=200^\circ\text{C}$ $t=30\text{m}$



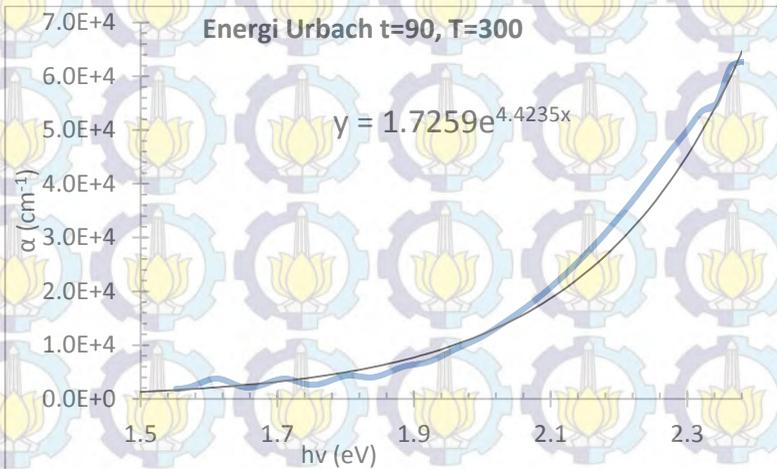
Gambar 3. Grafik α VS $h\nu$ untuk film T=300C t=30m



Gambar 4. Grafik α VS $h\nu$ untuk film T=400C t=30m



Gambar 5. Grafik α VS $h\nu$ untuk film T=300C t=60m



Gambar 6. Grafik α VS $h\nu$ untuk film T=300C t=90m



BIODATA PENULIS



Penulis “Fuad Darul Muttaqin” adalah anak ketiga dari tiga bersaudara. Lahir di kota Nganjuk 15 maret 1992 dan besar di kota Ponorogo. Semasa kecil penulis menempuh pendidikan formal antara lain di TK Bustanul Athfal Aisyiah, SD Negeri Jabung 2, MTs Negeri Jetis 1, dan SMA Negeri 2 Ponorogo. Semasa kecil juga menempuh pendidikan non formal di Madrasah Diniyah Al-Islam Nglawu.

Sejak kecil penulis diberi anugrah kelebihan pada bidang ilmu alam terutama kimia dan fisika, sehingga penulis diterima di jurusan Fisika ITS pada tahun 2010.

Semasa sekolah penulis aktif mengikuti olimpiade matematika dan sains, dan sempat menjadi juara umum olimpiade kimia yang diadakan oleh Diknas Ponorogo pada tahun 2009, serta mewakili Kabupaten Ponorogo di OSN Diknas pada tahun yang sama. Selain itu penulis juga sempat mewakili daerah Karesidenan Madiun untuk olimpiade yang diadakan oleh beberapa PTN. Semasa kuliah penulis pernah bergabung dengan organisasi Himasika.

Harapan besar dari penulis adalah bisa memanfaatkan usia yang masih muda ini untuk terus belajar dan berkarya. Belajar sampai akhir menutup mata, berkarya hingga dikenang sepanjang masa, dan beribadah hingga nyawa tak lagi ada. Tak ada keabadian dalam diri manusia, maka harapan besar penulis adalah menjadi insan bertakwa yang paham akan hakikat hidupnya (fuad.almuttaqin@gmail.com)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”