



**PEMODELAN SEL SURYA FILM TIPIS ZnO/CdS/CdTe  
MENGUNAKAN AFORS-HET : PENGARUH KETEBALAN CdS DAN  
TEMPERATUR DEVAIS TERHADAP PERFORMANSI SEL SURYA**

**Skripsi**

**disajikan sebagai salah satu syarat  
untuk memperoleh gelar Sarjana Sains  
Program Studi Fisika**

**oleh**

**Priandika Dwi Rizaldi  
4211414030**

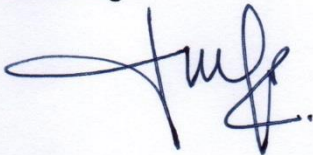
**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG  
2018**

## PERSETUJUAN PEMBIMBING

Skripsi ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang ujian skripsi Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang.

Semarang, Agustus 2018

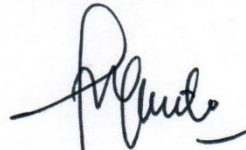
Pembimbing I



Drs. Ngurah Made Darma Putra, M.Si., Ph.D.

NIP. 196702171992031002

Pembimbing II



Dr. Sugianto, M.Si.

NIP. 196102191993031001

## PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang berjudul :

“Pemodelan Sel surya Film Tipis ZnO/CdS/CdTe Menggunakan AFORS-HET : Pengaruh Ketebalan CdS dan Temperatur Devais terhadap Performansi Sel Surya”

ini bebas plagiat, dan apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam skripsi ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan perundang-undangan.

Semarang, 26 September 2018



Priyandika Dwi Rizaldi

4211414030



## PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul

Pemodelan Sel surya Film Tipis ZnO/CdS/CdTe Menggunakan AFORS-HET  
: Pengaruh Ketebalan CdS dan Temperatur Devais terhadap Performansi Sel  
Surya

disusun oleh

Priyandika Dwi Rizaldi

4211414030

telah dipertahankan di hadapan sidang Panitia Ujian Skripsi FMIPA UNNES pada  
tanggal 26 September 2018.



Prof. Dr. Zaenuri, S.E., M.Si., Akt.

NIP. 196412231988031001

Ketua Penguji

Dr. Sulhadi, M.Si

NIP. 197108161998021001

Anggota Penguji/

Pembimbing I

Drs. Ngurah Made Darma Putra, M.Si., Ph.D.

NIP. 196702171992031002

Sekretaris,

Dr. Suharto Linuwih, M.Si.

NIP. 196807141996031005

Pembimbing II

Dr. Sugianto, M.Si.

NIP. 196102191993031001

## **PERSEMBAHAN**

*Kupersembahkan skripsi ini untuk Allah SWT sebagai bentuk pengabdian dan rasa bersyukur, Ibu dan Ayah sebagai rasa hormat atas segala rasa kasih sayang, cinta, dan pengorbanan kepada anak-anaknya, Teman seperjuangan Fisika sebagai rasa terima kasih atas pengalaman menyenangkan dan menyedihkan selama masa perkuliahan*

## *MOTTO*

- *Tidur saja bisa menjadi ibadah, apalagi beraktivitas.*
- *Jagalah alam niscaya alam akan menjaga kita*

## **PRAKATA**

Syukur Alhamdulillah kepada Allah SWT atas berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul "Pemodelan Sel Surya Film Tipis ZnO/CdS/CdTe Menggunakan AFORS-HET : Pengaruh Ketebalan CdS dan Temperatur Devais terhadap Performansi Sel Surya".

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan tenaga, pikiran, sarana, dan dana dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang tulus kepada :

1. Dr. Suharto Linuwih, M.Si., selaku ketua Jurusan Fisika yang telah menyemangati dan membina mahasiswa fisika.
2. Drs. Ngurah Made Darma Putra., M.Si selaku pembimbing I yang telah membimbing dengan penuh kesabaran serta meluangkan waktu memberikan masukan, saran dan motivasi selama penyusunan skripsi.
3. Dr. Sugianto, M.Si. selaku pembimbing II yang dengan penuh kesabaran memberikan bimbingan, arahan dan koreksi dalam penulisan skripsi ini.
4. Dr. Sulhadi, M.Si., selaku penguji skripsi yang telah banyak memberikan koreksi dalam penyusunan skripsi ini.
5. Mas Agus Andi Wibowo yang telah membimbing mahasiswa film tipis dengan sangat sabar dan penuh perhatian.
6. Keluarga PALAFI yang selalu memberikan motivasi dan semangat dalam pengerjaan skripsi

7. Teman seperjuangan Fisika 2014 yang telah mengalami susah sedih senang bersama dalam menghadapi skripsi
8. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, terima kasih untuk selalu memberikan bantuan moral dan spiritual.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih jauh dari sempurna karena keterbatasan pengetahuan. Demikian penulis menyampaikan ungkapan ini, dan suatu hal yang tidak ilmiah apabila penulis tidak menerima kritik dan sumbangan saran dari pembaca sebagai bahan pijakan di kemudian hari.

Semoga laporan skripsi ini dapat menambah pengetahuan dan bermanfaat bagi kita semua. Amin.

Semarang, 26 September 2018



Penulis



## ABSTRAK

**Priyandika D.R.** 2018. *Pemodelan Sel Surya Film Tipis ZnO/CdS/CdTe Menggunakan AFORS-HET : Pengaruh Ketebalan CdS dan Temperatur Devais terhadap Performansi Sel Surya*. Skripsi, Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang. Pembimbing I Drs. Ngurah Made Darma Putra, M.Si., Ph.D. dan Pembimbing II Dr. Sugianto, M.Si.

Kata kunci: Sel surya ZnO/CdS/CdTe, Ketebalan CdS, Temperatur devais, Performansi sel surya

Indonesia merupakan negara tropis yang memiliki intensitas matahari lebih tinggi dari negara lain. Salah satu cara memanfaatkan keunggulan tersebut adalah dengan teknologi sel surya. Sel surya yang sekarang sedang dikembangkan adalah sel surya heterojunction CdS/CdTe. Performansi sel surya dapat ditingkatkan dengan optimasi ketebalan emitor dan optimasi temperatur devais. Untuk meminimalisir kerugian dalam pembuatan sel surya, dilakukan simulasi sel surya untuk mendapatkan parameter yang sesuai. Pada penelitian ini dilakukan simulasi sel surya ZnO/CdS/CdTe menggunakan *software* AFORS-HET dengan variasi ketebalan CdS dan variasi temperatur devais. Variasi ketebalan CdS yang digunakan adalah 50 nm - 10  $\mu$ m dan variasi temperatur devais yang digunakan adalah 270 K – 310 K. Simulasi I-V dilakukan untuk mengetahui sifat kelistrikan sel surya. Hasil simulasi menunjukkan grafik hubungan antara arus dan tegangan, yang selanjutnya dibutuhkan dalam perhitungan daya keluaran, FF, dan efisiensi. Variasi ketebalan CdS memberikan pengaruh terhadap keluaran. Pada temperatur ruang, semakin tinggi ketebalan CdS nilai  $J_{sc}$  dan  $V_{oc}$  semakin menurun dan menyebabkan daya maksimal yang dihasilkan sel surya rendah. Pmax tertinggi saturasi pada ketebalan 50 – 100 nm yaitu 0,032 W/cm<sup>2</sup>. Perbandingan daya keluaran dan daya masukan menghasilkan nilai efisiensi. Nilai efisiensi sel surya ZnO/CdS/CdTe tertinggi ada pada ketebalan CdS 50 – 100 nm yaitu 32 %, dan efisiensi terendah pada ketebalan CdS 10  $\mu$ m yaitu 6,7 %. Variasi temperatur devais memberikan pengaruh terhadap data keluaran sel surya. Semakin tinggi temperatur devais, maka nilai  $J_{sc}$  dan  $V_{oc}$  semakin menurun dan menyebabkan daya keluaran pada sel surya rendah. Sel surya ZnO/CdS/CdTe dengan ketebalan CdS 50 nm didapatkan nilai Pmax tertinggi pada temperatur devais 270 K yaitu 0,0336 W/cm<sup>2</sup>. Nilai efisiensi tertinggi sel surya ZnO/CdS/CdTe dengan ketebalan CdS 50 nm ada pada temperatur devais 270 K yaitu 33,6 %.

## DAFTAR ISI

JUDUL .....	i
PRAKATA .....	vii
ABSTRAK .....	ix
DAFTAR ISI .....	x
DAFTAR TABEL .....	xii
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
BAB I .....	1
PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	4
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Manfaat Penelitian .....	4
1.5 Penegasan Istilah .....	5
BAB II .....	6
LANDASAN TEORI .....	6
2.1 Sel Surya .....	6
2.2 Material Semikonduktor .....	8
2.3 Film Tipis .....	9
2.4 Heterojunction Sel Surya ZnO/CdS/CdTe .....	10
2.4.1 Zinc Oxide (ZnO) .....	11
2.4.2 Sel Surya CdS/CdTe .....	13
2.5 Sistem Sel Surya p-n <i>Junction</i> .....	16
2.6 Pemodelan Sel Surya .....	17
2.7 Pengaruh Ketebalan Emitor dan Temperatur Devais .....	21
2.8 AFORS-HET .....	23
2.9 Kerangka Berfikir .....	24
BAB III .....	26
METODE PENELITIAN .....	26

3.1	Alur Penelitian.....	26
3.2	Prosedur Penelitian.....	27
3.2.1	Penentuan Parameter Sel surya .....	27
3.2.2	Pemodelan Sel surya .....	28
3.3	Analisis Data Keluaran.....	31
HASIL DAN PEMBAHASAN.....		33
4.1	Pengaruh Ketebalan CdS terhadap Performasi Sel surya.....	33
4.2	Pengaruh Temperatur Devais terhadap Performasi Sel surya .....	43
4.3	Perbandingan Data Simulasi dan Eksperimen.....	48
BAB V.....		34
PENUTUP.....		34
5.1	Simpulan.....	34
5.2	Saran .....	34
DAFTAR PUSTAKA .....		34
LAMPIRAN.....		61

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Parameter sel surya ZnO/CdS/CdTe.....	29
Tabel 4.1	Pengaruh ketebalan CdS terhadap performansi sel surya ZnO/CdS/CdTe.....	35
Tabel 4.2	Pengaruh temperatur devais terhadap performa sel surya pada ketebalan CdS 1 $\mu\text{m}$ .....	44



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Konfigurasi film tipis sel surya ZnO/CdS/CdTe.....	11
Gambar 2.2	Struktur kristal ZnO.....	12
Gambar 2.3	Struktur kristal heksagonal CdS.....	14
Gambar 2.4	Struktur zincblende CdTe.....	15
Gambar 2.5	Struktur kristal heksagonal CdTe.....	16
Gambar 2.6	Pergerakan elektron dan hole pada sambungan p-n.....	17
Gambar 2.7	Kurva I-V modul fotovoltaik pada kondisi normal light dan dark Current.....	20
Gambar 2.8	Skema pergerakan elektron menuju tanggul potensial.....	21
Gambar 2.9	Ilustrasi fungsi gelombang pada pergerakan elektron.....	22
Gambar 2.10	Tampilan AFORS-HET.....	24
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian.....	26
Gambar 3.2	Skema susunan sel surya ZnO/CdS/CdTe.....	27
Gambar 3.3	Tampilan awal AFORS-HET.....	28
Gambar 3.4	Proses input data parameter sel surya ZnO/CdS/CdTe.....	30
Gambar 3.5	Karakteristik I-V sel surya (Afrian, 2015) .....	31
Gambar 4.1	Kurva I-V dengan variasi ketebalan CdS pada sel surya ZnO/CdS/CdTe.....	33
Gambar 4.2	Grafik hubungan antara ketebalan (thickness) film tipis CdS terhadap : a) Arus short circuit ( $J_{sc}$ ), b) Tegangan open circuit ( $V_{oc}$ ), dan c) Daya maksimal yang dihasilkan ( $P_{max}$ ).....	36
Gambar 4.3	Grafik hubungan antara ketebalan (thickness) film tipis CdS terhadap <i>fill factor</i> (FF) .....	38
Gambar 4.4	Grafik hubungan antara ketebalan (thickness) film tipis CdS terhadap efisiensi sel surya : a) pada skala 50 nm – 10 $\mu$ m, b) pada skala 50 – 100 nm.....	40
Gambar 4.5	Pengaruh ketebalan CdS terhadap nilai <i>quantum efficiency</i> sel surya ZnO/CdS/CdTe.....	41
Gambar 4.6	<i>Band diagram</i> sel surya ZnO/CdS/CdTe dengan ketebalan CdS 1 $\mu$ m.....	43
Gambar 4.7	Kurva I-V dengan variasi temperatur devais pada sel surya ZnO/CdS/CdTe.....	46
Gambar 4.8	Grafik hubungan antara temperatur devais terhadap : a) FF sel surya, dan b) efisiensi sel surya pada ketebalan CdS 1 $\mu$ m.....	47
Gambar 4.9	Perbandingan performansi sel surya CdS/CdTe secara praktik dan simulasi.....	49

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Indonesia merupakan negara tropis yang memiliki intensitas matahari lebih tinggi dari negara lain. Lama Penyinaran Matahari di Indonesia berkisar antara 5-8 jam perhari (Tunggadewi, 2015). Hal ini menyebabkan Indonesia memiliki potensi yang sangat kuat dalam pemanfaatan energi alternatif, yaitu energi surya. Pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi alternatif pembangkit energi listrik memiliki keunggulan yang luar biasa, selain karena matahari adalah sumber energi yang sangat besar, pemanfaatan energi surya tidak menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Pada pengaplikasiannya, energi matahari dikonversi menjadi energi listrik dengan menggunakan devais semikonduktor yang disebut sel surya (*sel surya*).

Sel surya adalah semikonduktor penghantar aliran listrik yang dapat secara langsung mengubah energi surya menjadi bentuk tenaga listrik secara efisien, hal ini disebut dengan efek fotovoltaiik. Semikonduktor yang sering digunakan dalam pembuatan sel surya adalah kristal tunggal silikon. Panel sel surya silikon yang telah diproduksi diketahui memiliki efisiensi sebesar 14% sampai 17% (Makhnunah, 2011). Permasalahannya, dalam pembuatan kristal tunggal silikon diperlukan semikonduktor murni sehingga biaya produksinya tinggi. Silikon yang tersedia di bumi suatu saat juga akan habis jika digunakan secara terus menerus. Untuk mengantisipasi hal tersebut perlu dilakukan usaha untuk mempertipis lapisan silikon dari ketebalan sekarang yang mencapai ratusan mikron. Film tipis (*thin film*)

merupakan teknologi alternatif yang dapat digunakan untuk pembuatan sel surya. Film tipis memiliki banyak kegunaan, dibidang industri seperti industri mikroelektronik, film tipis digunakan sebagai transistor (Petti, *et al.* 2016), kapasitor (Graddage N., 2016), serta dalam bidang metalurgi dapat dimanfaatkan untuk mencegah korosi dan menambah kekerasan (Erni, 2007). Selain itu, film tipis dapat diaplikasikan untuk fotokatalis *transpsrent conductors*, *sel surya windows*, sensor gas, dan perangkat *photovoltaic* (Durri, 2015). Dalam pembuatan film tipis, dilakukan dengan penumbuhan agar membentuk suatu lapisan yang tipis pada suatu substrat. Film tipis merupakan suatu lapisan dengan ketebalan mikro hingga nano yang terbuat dari bahan organik, inorganik, metal maupun campuran metal organik (*organometallic*) yang memiliki sifat-sifat konduktor, semikonduktor, superkonduktor maupun isolator.

Sel surya terdiri dari beberapa lapisan. Sel surya heterojunction adalah salah satu contoh jenis sel surya. Sel surya heterojunction adalah sel surya yang terdiri dari p-n junction yang terbuat dari material semikonduktor yang berbeda. Salah satu contoh sel surya heterojunction adalah sel surya ZnO/CdS/CdTe. Sel surya ini memiliki 3 lapisan film tipis yaitu film tipis ZnO sebagai window layer, CdS semikonduktor tipe-n sebagai emitor, dan CdTe semikonduktor tipe-p sebagai absorber. Ketebalan lapisan pada sel surya mempengaruhi kinerja sel surya. Ketebalan emitor sebagai pemancar, akan mempengaruhi performansi sel surya. Pada devais sel surya ZnO/CdS/CdTe, ketebalan CdS memberikan performansi maksimum yaitu pada ketebalan 10-50 nm (Razykov, 2011). Selain itu, ada yang menggunakan dengan ketebalan 1-2 $\mu$ m (McCandless dan Birkmire, 1991).

Menurut data Badan Pusat Statistik (2017), pada tahun 2015 suhu minimum di Indonesia mencapai  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dan suhu maksimum di Indonesia mencapai  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Suhu udara mempengaruhi performansi sel surya, ketika sel surya menyerap cahaya matahari, maka temperatur matahari akan mempengaruhi temperatur devaisnya. Semakin besar suhu udara maka kenaikan temperatur devais akan meingkat. Hal ini akan mengurangi nilai produksi daya yang dihasilkan oleh sel surya (Greentumble editorial team, 2018). Temperatur mempengaruhi sistem elektronik dari bahan. Hal yang paling mendasar pada bahan adalah pita energi, Eg. Semakin tinggi temperatur maka semakin rendah nilai energi gap dan mengakibatkan rentang intensitas cahaya yang mampu dikonversikan sel surya semakin menurun dan menghasilkan daya keluaran yang semakin rendah.

Sel surya CdTe mengalami perkembangan dari tiap hasil penelitian. Pada tahun 2015, didapatkan sel surya CdTe dengan efisiensi 21,5% mengalahkan efisiensi sel surya pada tahun 2014 yaitu 20,4%. Pada tahun 2016, sel surya CdTe dapat dikembangkan sehingga efisiensi sel surya CdTe meningkat menjadi 22,1% (Wesoff, 2016). Produksi sel surya memerlukan biaya yang tidak murah dan waktu produksi yang cukup lama. Sehingga perlu ada langkah yang lebih efisien dalam pembuatan sel surya, salah satunya melakukan simulasi agar didapatkan sel surya yang sesuai harapan. Salah satu program simulasi yang sekarang ini umum digunakan adalah AFORS-HET. AFORS-HET memiliki fungsi matematis untuk mengetahui teknik perhitungan analog dan simulasi sel surya heterojunction. AFORS-HET mampu melakukan perhitungan dan simulasi graik I-V yang merupakan parameter utama untuk menentukan performansi sel surya.



Penelitian yang dilakukan penulis adalah pemodelan pengaruh ketebalan CdS dan temperatur devais terhadap performansi kelistrikan sel surya film tipis ZnO/CdS/CdTe menggunakan *software* AFORS-HET.

## **1.2 Perumusan Masalah**

Penggunaan struktur sel surya film tipis ZnO/CdS/CdTe akan dikaji melalui pemodelan menggunakan AFORS-HET dan parameter-parameter empiris tertentu dengan rumusan masalah sebagai berikut :

- 1) Bagaimana pengaruh ketebalan CdS terhadap performansi sel surya ZnO/CdS/CdTe?
- 2) Bagaimana pengaruh temperatur devais terhadap performansi sel surya ZnO/CdS/CdTe?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Berdasarkan ulasan topik diatas, maka tujuan dari penelitian ini yaitu :

- 1) Mengetahui pengaruh ketebalan CdS terhadap performansi sel surya ZnO/CdS/CdTe.
- 2) Mengetahui pengaruh temperatur devais terhadap performansi sel surya ZnO/CdS/CdTe.

## **1.4 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini bermanfaat untuk mengetahui pengaruh ketebalan CdS dan temperatur devais terhadap performansi sel surya ZnO/CdS/CdTe. Hasil penelitian ini diharapkan dapat dijadikan tambahan ilmu dalam melakukan simulasi sel surya dan dapat menjadi parameter acuan dalam pembuatan sel surya ZnO/CdS/CdTe secara praktik.

## 1.5 Penegasan Istilah

Pemodelan sel surya dilakukan untuk menemukan parameter yang sesuai dalam pembuatan sel surya ZnO/CdS/CdTe secara empiris. Struktur sel surya ZnO/CdS/CdTe merupakan sel surya heterojunction dengan ZnO sebagai *window layer*, CdS sebagai semikonduktor tipe-n, dan CdTe sebagai semikonduktor tipe-p. Variasi yang dilakukan pada penelitian ini adalah ketebalan CdS dengan ketebalan 50 nm – 10  $\mu$ m dan temperatur devais yaitu 270 K – 310 K. Pemodelan dilakukan dengan karakterisasi I-V yaitu untuk mengetahui sifat kelistrikan sel surya yaitu *fill factor* dan tingkat efisiensi.

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Sel Surya

Sel surya merupakan suatu devais yang mampu mengkonversi energi matahari menjadi listrik. Perubahan energi dicapai dengan absorpsi sinar matahari oleh sel surya yang menyebabkan eksitasi elektron dari tingkat energi awal ke tingkat energi yang lebih tinggi (Isabella, *et al.*, 2014). Panel surya sering kali disebut sel photovoltaic. Efek fotovoltaiik ini ditemukan oleh Becquerel pada tahun 1839, dimana Becquerel mendeteksi adanya tegangan foto ketika sinar matahari mengenai elektroda pada larutan elektrolit (Heri, 2012). Bahan yang biasa digunakan dalam pembuatan sel surya adalah silikon kristal tunggal.

Prinsip kerja dari sel surya adalah, ketika sinar matahari mengenai sel surya, energi matahari yang memiliki energi lebih besar dari *band gap* akan diserap, dan yang lebih kecil dari *band gap* akan diteruskan. Energi yang diserap mengakibatkan terjadinya ekstitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi, dan terbentuk *hole* pada pita valensi. Pasangan *hole-electron* akan mengalir ke daerah persimpangan dan dipisahkan oleh medan listrik yang terbentuk pada sambungan (*built in electrical field*). Hal ini menyebabkan terjadinya beda potensial dan arus listrik akan mengalir.

Ada beberapa parameter dalam sel surya yang dapat dipengaruhi, yaitu *short circuit current* ( $I_{sc}$ ), *open circuit voltage* ( $V_{oc}$ ), *fill factor* ( $FF$ ), dan *efficiency*.

- 1)  $I_{sc}$  (*short circuit current*) adalah nilai arus maksimum ketika dua terminal terhubung dan nilai tegangan adalah nol.

- 2)  $V_{oc}$  (*open circuit voltage*) adalah keadaan ketika sel tidak terhubung dengan beban apapun dan tidak ada arus yang mengalir, sehingga tegangan pada sel surya adalah maksimum.
- 3) FF (*fill factor*) adalah perbandingan daya maksimum sel surya yang sebenarnya terhadap tegangan maksimum ( $V_{oc}$ ) dan arus maksimum ( $I_{sc}$ ).
- 4) Efisiensi adalah nilai perbandingan antara daya keluaran terhadap daya masukan dari matahari

(Chikate, *et al.*, 2015).

Beberapa parameter dalam sel surya di atas merupakan suatu tolak ukur untuk menentukan baik atau buruknya performansi sel surya. Performansi sel surya sendiri dipengaruhi oleh dua faktor, yaitu faktor tipe teknologi photovoltaic yang digunakan dan faktor lingkungan sekitaran.

- 1) Tipe teknologi sel surya yang digunakan, mampu memengaruhi performansi sel surya. Ada beberapa tipe teknologi sel surya yang telah dikembangkan, diantaranya *monocrystalline silicon cells*, *multicrystalline silicon cells*, *amorphous silicon cells*, dan tipe lain sel surya. *Monocrystalline silicon cells* adalah tipe sel surya yang disusun menggunakan silikon monokristal murni. Pada kasus ini, silikon memiliki struktur kristal tunggal dengan tanpa kecacatan dan ketakmurnian. *Multicrystalline silicon cells* merupakan sel surya yang disusun dengan menggunakan beberapa monokristal silikon. *Amorphous silicon cells* tersusun dari atom silikon dalam bentuk lapisan tipis yang homogen dengan susunan kristal yang terbentuk adalah amorfus. Sedangkan tipe lain sel surya yang



menjanjikan dalam pembuatan sel surya seperti CdTe dan CuInSe (Chikate, *et al.*, 2015).

2) Ada beberapa faktor lingkungan yang mempengaruhi performansi sel surya. Diantaranya adalah temperatur lingkungan, iradiasi sel surya, intensitas penyinaran matahari, bayangan (*shading*). Temperatur dan iradiasi sel surya mampu mempengaruhi nilai keluaran sel surya. Ketika suhu meningkat, celah pita dari semikonduktor akan menyusut, dan nilai  $V_{oc}$  akan menurun mengikuti suhu tegangan pada junction p-n (Chikate, *et al.*, 2015) (Wolpert dan Ampadu, 2012). Sedangkan pengaruh intensitas penyinaran dan bayangan merupakan pengaruh penempatan sel surya dalam pemasangannya. Sel surya dengan pemasangan yang jauh dari penghalang dan terkena intensitas penyinaran tinggi akan memberikan kinerja sel surya yang tinggi pula (Raditya, 2015).

Selain dua faktor di atas, ada faktor lain yang dapat mempengaruhi performansi sel surya, yaitu faktor parameter bahan. Ada beberapa sifat bahan yang dapat diubah dan mempengaruhi performansi sel surya. Ketebalan emittor dan absorber adalah salah satu yang dapat mempengaruhi performansi sel surya (Goyal, 2016). Selain itu, ada beberapa sifat bahan yang dapat diubah, yaitu konsentrasi elektron dan hole dalam bahan. Hal ini dapat dilakukan dengan melakukan doping pada semikonduktor untuk membentuk semikonduktor tipe-n atau tipe-p.

## 2.2 Material Semikonduktor

Material berdasarkan konduktivitasnya dibagi menjadi tiga kategori, 1) konduktor, dengan resistivitas  $<10^{-4} \Omega m$ , 2) insulator, yang resistivitasnya adalah  $>10^{12} \Omega m$  dan 3) semikonduktor, dengan resistivitas diantara konduktor dan

isolator. Material semikonduktor banyak diaplikasikan dibidang teknologi modern seperti devais elektronik, optoelektronik, dan sensor.

Semikonduktor adalah bahan dengan energi gap sekitar 1–2 eV (Ariswan, 2013). Ditinjau dari pembuatannya, semikonduktor dibagi menjadi dua, yaitu intrinsik dan ekstrinsik. Bahan semikonduktor intrinsik yaitu bahan semikonduktor yang tidak mengandung material pengotor atau ketakmurnian, sehingga hantaran listrik yang dihasilkan adalah elektron dan *hole*. Bahan semikonduktor ekstrinsik adalah bahan semikonduktor yang dalam pembuatannya mengandung pengotor, sehingga muatan didominasi elektron saja atau hole saja (Sugianto, 2009).

Material semikonduktor dibagi menjadi dua tipe, yaitu semikonduktor tipe-p dan semikonduktor tipe-n. Untuk membentuk semikonduktor tipe-p, dapat dilakukan dengan penambahan dopan bervalensi 3. Penambahan dopan ini akan mengakibatkan semikonduktor kelebihan *hole*. Sedangkan untuk membentuk semikonduktor tipe-n, dapat dilakukan dengan penambahan dopan bervalensi 5, sehingga bahan semikonduktor tersebut akan kelebihan elektron.

### **2.3 Film Tipis**

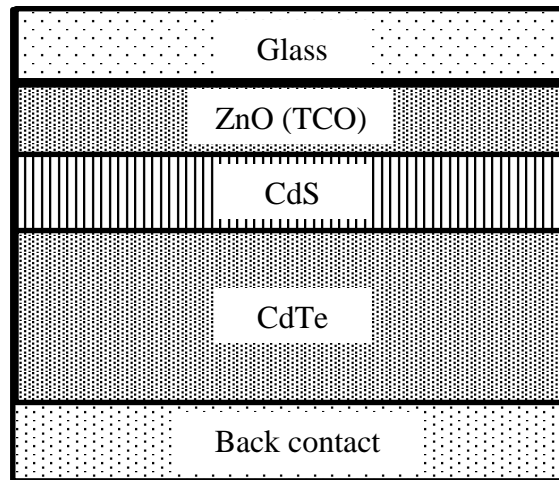
Lapisan tipis merupakan suatu lapisan yang terdiri dari bahan organik, anorganik, metal maupun campuran metal organik (*organometallic*) dengan ketebalan dalam orde nm (nanometer) hingga  $\mu\text{m}$  (mikrometer) yang memiliki sifat-sifat konduktor, semikonduktor, superkonduktor, maupun isolator (Puspitaningrum, 2017). Film tipis dapat digolongkan sebagai nanoteknologi ketika memiliki ketebalan  $< 100$  nm. Menurut Filipponi dan Duncan (2013), skala nanometer secara konvensional yaitu pada ketebalan 1nm - 100 nm. Kisaran ukuran

minimum yaitu 1 nm, untuk menghindari adanya atom tunggal atau kelompok atom yang sangat kecil atau nano objek. Ada beberapa metode untuk mendapatkan hasil film tipis dengan ukuran nano. Hal ini digolongkan menjadi dua fase, yaitu fase gas dan fase cair. Fase gas terdiri dari fase transpor uap (Zhao, *et al.*, 2007), deposisi pulsa laser (Barman, *et al.*, 2015) dan deposisi uap kimia (Mattevi, *et al.*, 2011). Fase cair terdiri dari deposisi *chemical-bath*, sol gel, dan metode hidrotermal (Ye, *et al.*, 2015).

Dalam pengaplikasiannya, film tipis memiliki peranan penting di setiap bidang. Pengaplikasian film tipis di bidang industri meliputi produksi piranti elektronika, seperti kapasitor, transistor, fotodetektor, rangkaian hybrid, sel surya, dan teknologi mikroelektronika. Dalam bidang optika, digunakan sebagai lapisan antirefleksi, filter interferensi, cermin reflektor tinggi, kaca pelindung dari cahaya, transmisi daya tinggi, maupun dalam bidang lain yaitu bidang mekanik (Muhammad, 2016).

#### **2.4 Heterojunction Sel Surya ZnO/CdS/CdTe**

Heterojunction sel surya merupakan sel surya yang terdiri dari p-n junction yang terbuat dari material semikonduktor yang berbeda. Heterojunction sel surya terdiri dari *front contact*, *window layer*, semikonduktor tipe-n dan tipe-p sebagai p-n junction, serta *back contact*. Heterojunction sel surya yang dibahas dalam penelitian ini adalah heterojunction sel surya yang terbentuk dari ZnO/CdS/CdTe. Sel surya ZnO/CdS/CdTe memiliki susunan *device* seperti pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Konfigurasi film tipis sel surya ZnO/CdS/CdTe

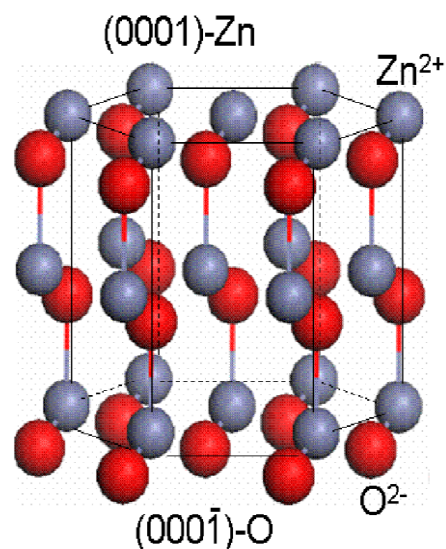
Pada gambar di atas, *glass* sebagai *front contact* berfungsi untuk meneruskan cahaya matahari menuju window layer. ZnO *transparent conductive oxide* (TCO) memiliki energi gap yang besar  $\sim 3,37$  eV pada temperatur rendah dan 3,30 eV pada temperatur ruang (Liewhiran, *et al.*, 2007). TCO dengan energi gap 3,3 eV berperan sebagai window layer pada film tipis CdS/CdTe, untuk meminimalisir terjadinya *optical loss* (kerugian optik) (Fardi dan Fatima, 2013). CdS dan CdTe berperan sebagai film tipis sel surya. CdS berperan sebagai semikonduktor tipe-n dan CdTe berperan sebagai semikonduktor tipe-p yang membentuk sambungan p-n junction. Selanjutnya, *back contact* terbentuk dari material metal yang konduktif yang berfungsi sebagai penghantar.

#### 2.4.1 Zinc Oxide (ZnO)

ZnO merupakan semikonduktor perpaduan golongan II-VI dengan energi gap pada jangkauan *ultraviolet* yaitu 3,37 eV. Hal ini menjadikan ZnO menjadi material yang sangat berpotensi luas dalam pengaplikasiannya di bidang fisika, salah satunya sebagai *window layer* (M.Sathya, 2012) (Firmaningsih, 2014).



ZnO merupakan material semikonduktor yang memiliki struktur heksagonal dengan tipe kristal *wurtzite*. ZnO memiliki nilai densitas donor yaitu berkisar  $1 \times 10^{18} - 3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  dengan densitas elektron pada pita valensi memiliki nilai yang lebih besar dari hole pada pita konduksi yaitu  $1,8 \times 10^{19}$  (Shoewu, 2016). Hal ini menunjukkan sifat ZnO sebagai semikonduktor tipe-n dalam peranannya sebagai sel surya heterojunction. Sifat-sifat yang menarik dari material ZnO lainnya adalah anisotropi dalam struktur kristal, struktur cacat *non-stoichiometric*, transparansi optik dalam daerah cahaya tampak dan indeks biasnya cukup tinggi. Konduktivitas listrik dalam ZnO dapat ditimbulkan karena *nonstoichiometric* yang disebabkan oleh kelebihan ion-ion *zinc* ( $\text{Zn}^{2+}$ ). Kelebihan kation ini diimbangi oleh muatan negatif dengan jumlah yang sama, yaitu dua elektron. Elektron-elektron ini bebas bergerak di dalam kristal di bawah pengaruh medan listrik luar (Firmaningsih, 2014) . Berikut struktur kristal ZnO ditunjukkan pada Gambar 2.2.

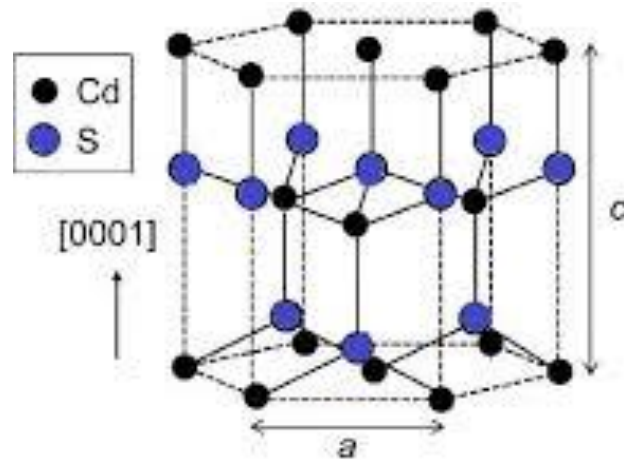


Gambar 2.2 Struktur kristal ZnO

## 2.4.2 Sel Surya CdS/CdTe

*Cadmium sulphide* dan *cadmium telluride* difabrikasi untuk membentuk sel surya CdS/CdTe. Sel surya CdS/CdTe merupakan sel surya dengan band gap yang ideal sebagai sel surya, dengan penyerapan optik dan stabilitas kedua material yang baik (Touskova, 1994). Pada sel surya CdS/CdTe, CdS berperan sebagai semikonduktor tipe-n. Pada pemodelan, CdS memiliki nilai densitas donor  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . CdTe pada sel surya berperan sebagai semikonduktor tipe-p, CdTe memiliki densitas penerima (acceptor density)  $7 \times 10^{16} - 7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

CdS merupakan paduan dua bahan semikonduktor Cd dan S yang membentuk semikonduktor tipe-n. Paduan CdS ini mempunyai titik leleh jauh lebih tinggi bila dibandingkan dengan bahan Cd dan S, dan mempunyai energi gap sekitar 2,4 eV (Wirjoadi, *et al.*, 2007) sehingga akan meneruskan cahaya dengan energi kurang dari 2,4 eV. Pada sel surya, CdS merupakan lapisan tipis semikonduktor tipe-n yang disambung dengan lapisan tipis semikonduktor tipe-p. CdS dengan energi gap 2,4 eV dan struktur heksagonal mempunyai keunggulan untuk aplikasi sel surya sebagai window layer (Hadi, *et al.*, 2013). Dalam pengaplikasiannya sebagai devais, ketebalan film tipis CdS yang digunakan berkisar 1 – 2  $\mu\text{m}$  (McCandless dan Birkmire, 1991). Ketebalan ini dipercaya memiliki nilai efisiensi yang paling optimum. CdS memiliki nilai densitas donor yaitu berkisar  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  (Kosyachenko, 2010), hal ini menunjukkan bahwa CdS memiliki nilai densitas elektron yang besar. Sehingga dalam pengaplikasiannya sebagai devais sel surya ZnO/CdS/CdTe, CdS sering digunakan sebagai *emitter* yaitu CdS digunakan sebagai *supply* elektron. Berikut struktur kristal CdS ditunjukkan pada Gambar 2.3.

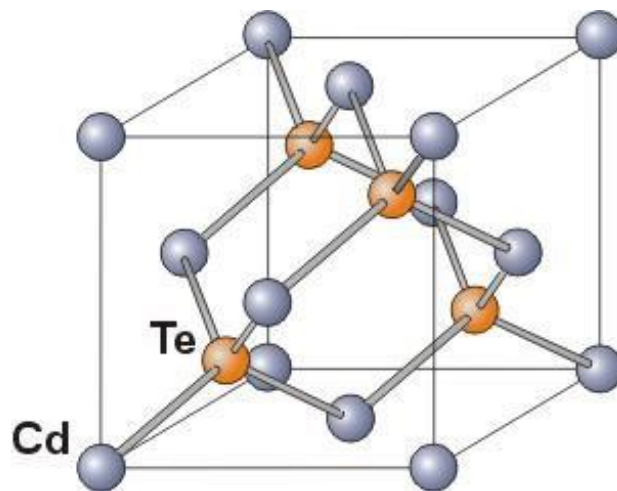


Gambar 2.3 Struktur kristal heksagonal CdS

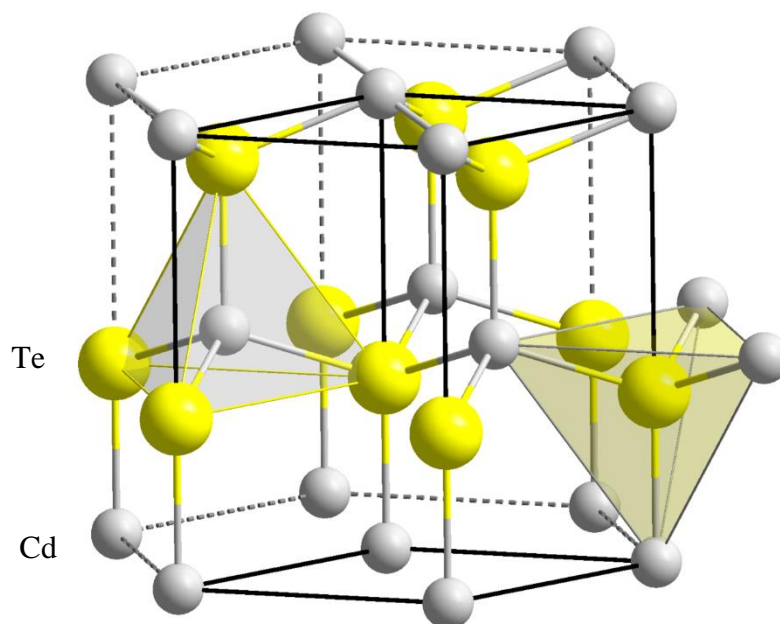
CdTe merupakan material semikonduktor paduan golongan II-VI yang saat ini sedang dikembangkan dalam pemanfaatannya sebagai material fotovoltaik. CdTe memiliki energi band gap 1,45 eV pada suhu ruangan yang merupakan bandgap ideal dengan koefisien absorpsi  $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ , yang mana sangat mendukung dalam pengaplikasiannya sebagai fotovoltaik konfersi energi (Islam, *et al.*, 2013) (Becerril, *et al.*, 2009). Hal ini menunjukkan bahwa CdTe mampu menyerap cahaya dengan intensitas yang tinggi. Pada proses absorpsi energi, cahaya dengan energi di bawah *band gap* material tidak dapat mengeksitasi elektron, jadi cahaya tersebut diteruskan. Secara spesifik *band gap* dinyatakan sebagai energi minimum yang dibutuhkan untuk membebaskan elektron dari pita valensi (tingkat energi rendah) ke pita konduksi (tingkat energi lebih tinggi) (Wibowo, 2008: 12).

CdTe mempunyai struktur heksagonal dan kubik. Pada penelitian Wibowo (2008), menunjukkan lapisan tipis CdTe memili *band gap* mendekati optimal  $\sim 1,5$  eV dan koefisien absorpsi  $\sim 8 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$  dengan struktur FCC (*Face Center Cubic*). Sedangkan pada penelitian Kumarangsihe (2017), menunjukkan kristal tunggal (111) dengan struktur kubik *zinc-blende*. Berikut ini struktur *zinc-blende* CdTe

yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 dan struktur heksagonal CdTe yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.



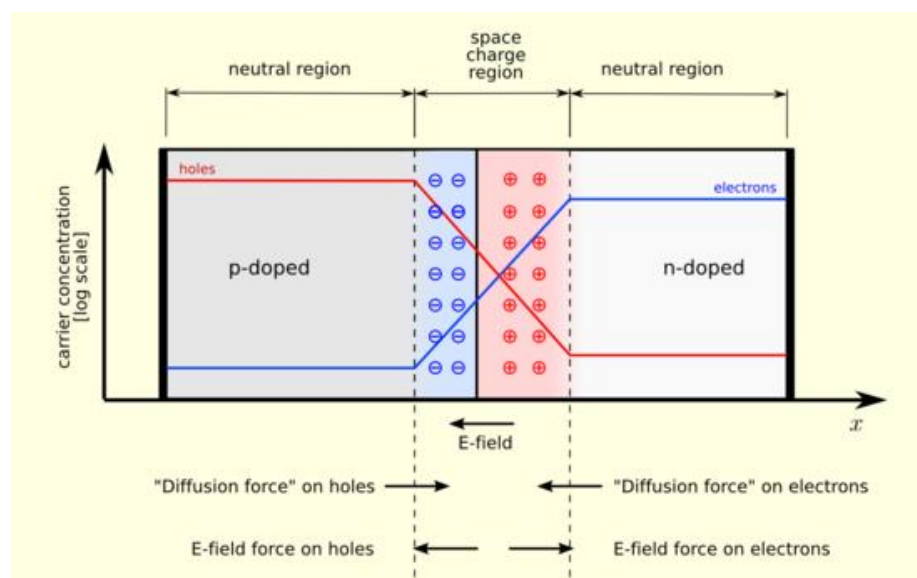
Gambar 2.4 Struktur zinblende CdTe



Gambar 2.5 Struktur kristal heksagonal CdTe

## 2.5 Sistem Sel Surya p-n Junction

p-n *junction* merupakan sambungan antara semikonduktor tipe-p dan tipe-n. Interaksi antara semikonduktor tipe-n dan semikonduktor tipe-p menyebabkan elektron dari semikonduktor tipe-n mengalir menuju semikonduktor tipe-p, atau dapat juga dikatakan *hole* dari semikonduktor tipe-p di tempati elektron semikonduktor tipe-n demi mencapai kesetimbangan muatan listrik. Pada proses perpindahan muatan elektron dan *hole* tersebut, elektron yang sampai di semikonduktor tipe-p berkumpul di perbatasan sambungan p-n, dan *hole* yang sampai di semikonduktor tipe-n juga berkumpul di perbatasan sambungan n-p (sambungan p-n dari sisi semikonduktor tipe-n). Hal ini menyebabkan keberadaan *space charge region*, yang membentuk medan listrik untuk membuat elektron di semikonduktor tipe-p bergerak menuju semikonduktor tipe-n dan *hole* bergerak ke arah sebaliknya (Jojo, 2014). Skema pergerakan elektron dan hole ditunjukkan pada Gambar 2.6



Gambar 2.6 Pergerakan elektron dan hole pada sambungan p-n (Jojo, 2014)

Meningkatnya ketebalan semikonduktor tipe-n mempengaruhi kerapatan pembawa muatan minoritas yaitu hole. Semakin tebal semikonduktor tipe-n, maka semakin lebar wilayah minoritas dan semakin baik rekombinasi pembawa minoritas, dikarenakan harus menempuh jarak yang semakin jauh ketika ketebalan meningkat. Maka proses menuju pada junction akan semakin jauh. Ketika sel surya diberi energi dari luar atau energi matahari, maka elektron pada junction akan kembali menuju daerah semikonduktor tipe-n dan hole pada junction akan kembali menuju semikonduktor tipe-p dengan peningkatan mobilitas elektron dan hole (Diallo, 2017). Semakin meningkat ketebalan semikonduktortipe-n, maka tingkat kerapatan pembawa muatan elektron kecil, dan wilayah *space charge* semakin tebal. Menyebabkan proses kembalinya elektron dari *junction* menuju semikonduktor tipe-n akan menumbuk suatu tanggul yang semakin tebal seiring meningkatnya ketebalan semikonduktor tipe-n sehingga nilai arus yang dihasilkan semakin kecil.

## **2.6 Pemodelan Sel Surya**

Identifikasi kualitas sel surya dapat dilakukan dengan analisis sifat listrik sel surya dan menganalisa perubahan parameter penting yang mengakibatkan terjadinya depresiasi daya modul. Parameter penting dari modul *photovoltaic* (PV) yang sering menjadi acuan penurunan mutu panel surya adalah tahanan seri internal yang menggambarkan rugi-rugi internal (*internal losses*) akibat kontak listrik antar sel surya (Benghanem, 2008). Sifat listrik dari modul fotovoltaik biasanya diwakili dengan kurva I-V.

Jika  $J_n$  dan  $J_p$  adalah nilai *current density* elektron dan hole, maka persamaan kontinuitas untuk elektron dan hole adalah :

$$\frac{-1}{q} \frac{\delta J_p}{\delta x} + G(x) - R(x) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{-1}{q} \frac{\delta J_n}{\delta x} + G(x) - R(x) = 0 \quad (2)$$

Dimana  $G(x)$  dan  $R(x)$  adalah tingkat generasi dan rekombinasi pembawa muatan.

Jika  $n(x)$  dan  $p(x)$  adalah konsentrasi elektron dan hole, maka dengan menggunakan model *drift-diffusion*, nilai  $J_p$  dan  $J_n$  adalah :

$$J_n(x) = q\mu_n n(x)E(x) + qD_n \frac{\delta n}{\delta x} \quad (3)$$

$$J_p(x) = q\mu_p p(x)E(x) + qD_p \frac{\delta p}{\delta x} \quad (4)$$

Dimana  $E(x)$  adalah medan listrik dan  $D_n$  dan  $D_p$  adalah koefisien difusi elektron dan hole. Konsentrasi doping Na pada p-CdTe adalah  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  dan Nd pada n-CdS adalah  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Nd memiliki nilai lebih tinggi dari pada Na, maka daerah penipisan akan meluas terutama di wilayah tipe-p. Jika diberikan tegangan  $V$  pada devais, maka  $V_0$  adalah tegangan junction dan  $d$  adalah ketebalan semikonduktor tipe-p, sehingga bisa diasumsikan tegangan pada medan listrik di wilayah p adalah:

$$E(x) = \frac{V_0 - V}{d} = E \quad (5)$$

Dengan tingkat generasi yaitu :

$$G(x) = G_0 e^{-\alpha x} \quad (6)$$

Dimana  $G_0$  adalah tingkat generasi pembawa pada  $x=0$  dan  $\alpha$  adalah koefisien absorpsi CdTe.  $G_0$  memiliki nilai  $4,64 \times 10^{26} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$  dan  $\alpha$  adalah  $10^5 \text{ m}^{-1}$  pada setiap kasus. Tingkat rekombinasi elektron dan hole dapat ditentukan dengan  $n(x)/\tau_n$  dan  $p(x)/\tau_p$ . Jika kita substitusikan semua persamaan ke dalam persamaan kontinuitas

(1) dan (2), dengan mengganti notasi  $n(x)$  dan  $p(x)$  menjadi lebih simpel yaitu  $n$  dan  $p$ , maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_p E \frac{\delta p}{\delta x} - \frac{p}{\tau_p} + G_0 e^{-\alpha x} = 0 \quad (7)$$

$$D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - \mu_n E \frac{\delta n}{\delta x} - \frac{n}{\tau_n} + G_0 e^{-\alpha x} = 0 \quad (8)$$

Pada  $x=0$ , yaitu pada *junction*,  $n$  dan  $p$  akan bernilai nol. Kondisi batasan lainnya yaitu pada keadaan dimana nilai arus sama dengan nilai arus rekombinasi permukaan. Kondisi ini dapat dilakukan dengan menjadikan konsentrasi elektron dan hole sebagai parameter, yaitu  $n(x)$  dan  $p(x)$ . Dari  $n(x)$  dan  $p(x)$ , selanjutnya didapatkan nilai  $J_n(x)$  dan  $J_p(x)$ . Total densitas arus  $J$  merupakan jumlah dari densitas arus elektron dan densitas arus hole, yaitu :

$$J = J_n(x) + J_p(x) \quad (19)$$

(Ghosh, 2013)

Pada uji IV sel surya terdiri dari tiga parameter yaitu tegangan dan arus maksimum ( $V_{mp}$  dan  $I_{mp}$ ), tegangan *open circuit* ( $V_{oc}$ ), arus *short circuit* ( $I_{sc}$ ). Tegangan *open circuit* adalah tegangan yang diukur ketika rangkaian sel surya dalam keadaan terbuka, sehingga tidak ada arus yang mengalir ke rangkaian luar dan arus bernilai nol. Tegangan *open circuit* merupakan tegangan maksimal yang dapat dibangkitkan sel surya. Arus *short circuit* merupakan arus yang diukur ketika tegangan bernilai nol dan sel surya dalam keadaan *short*. Arus *short circuit* dapat dikatakan sebagai nilai arus tertinggi yang dapat dihasilkan sel surya (Adityawan, 2010). Selanjutnya nilai  $I_{sc}$  dan  $V_{oc}$  dijadikan parameter untuk menentukan nilai *fill*



*factor* dan efisiensi sel surya. Dengan grafik I-V seperti pada Gambar 2.7, *fill factor*

dan efisiensi sel surya dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$FF (\%) = \left( \frac{V_{oc} \times J_{sc}}{P_{max}} \right) \times 100\%$$

$$\eta (\%) = \left( \frac{P_{max}}{P_{in}} \right) \times 100\%$$

dimana :

$V_{oc}$  : tegangan *open circuit*

$J_{sc}$  : arus short circuit

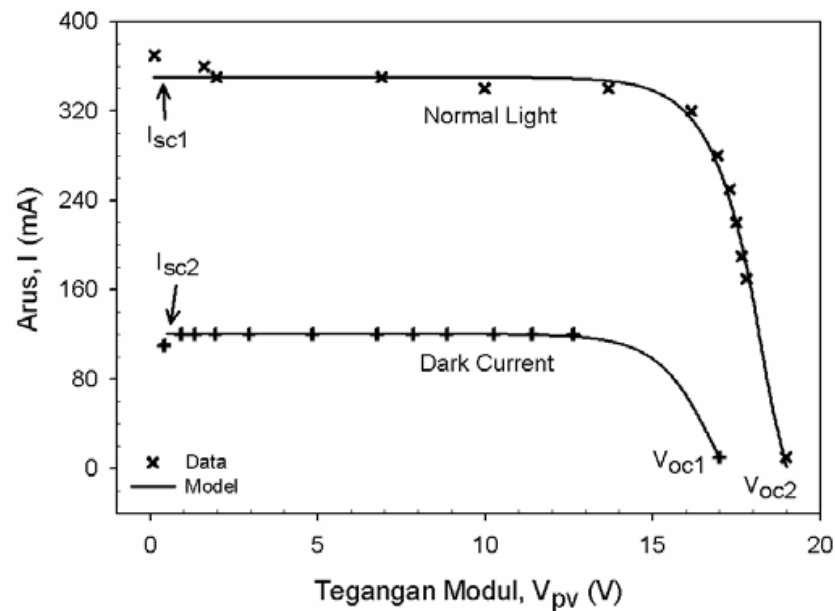
FF : *fill factor*

$\eta$  : efisiensi sel surya

$P_{max}$  : daya keluaran maksimum

$P_{in}$  : daya masukan ( $1\text{kW}/\text{cm}^2$ )

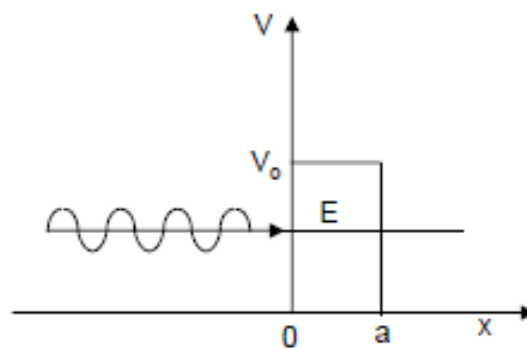
(Honsberg, 2018)



Gambar 2.7 Kurva I-V modul fotovoltaik pada kondisi normal light dan dark Current (Umar, 2015)

## 2.7 Pengaruh Ketebalan Emitor dan Temperatur Devais

Lapisan emitor pada sel surya berfungsi untuk memancarkan energi yang selanjutnya diserap oleh lapisan *absorber*. Ketebalan lapisan emitor berpengaruh besar terhadap performansi sel surya. Hal ini dapat dijelaskan dengan teori tanggul potensial seperti pada Gambar 2.8



Gambar 2.8 Skema pergerakan elektron menuju tanggul potensial

Sebuah elektron datang dari x-negatif menuju x-positif dengan menumbuk suatu tanggul potensial.

$$V = V_0 ; 0 \leq x \leq a \quad (20)$$

$$V = 0 ; x < 0, x > a \quad (21)$$

Sepanjang perjalanan elektron, energi total elektron,  $E < V_0$

Fungsi gelombang elektron berlaku persamaan Schrodinger, karena  $V = 0$  maka berlaku persamaan Schrodinger pada  $x < 0$  yaitu :

$$\Psi_1(x) = Ae^{ikx} + Be^{-ikx} ; k^2 = \frac{2m_e E}{\hbar^2} \quad (22)$$

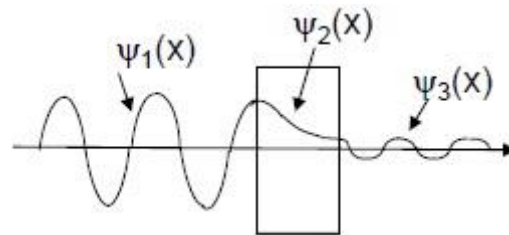
Pada daerah  $0 < x < a$ , karena  $E < V_0$  maka fungsi gelombang sebagai solusi persamaan Schrodinger adalah :

$$\Psi_2(x) = Ce^{Kx} + Be^{-Kx} ; K^2 = \frac{2m_e(V_0 - E)}{\hbar^2} = \frac{2m_e V_0}{\hbar^2} - k^2 \quad (23)$$

Pada daerah  $x > a$ ,  $V = 0$ , maka fungsi gelombang pada wilayah ini adalah :

$$\Psi_3(x) = Fe^{ikx}, \text{ dengan arah ke kanan} \quad (24)$$

Ilustrasi fungsi gelombang pada pergerakan elektron dapat dilihat pada Gambar 2.9



Gambar 2.9 Ilustrasi fungsi gelombang pada pergerakan elektron

Hal ini, menunjukkan bahwa pergerakan elektron ketika menembus suatu tanggul potensial memiliki hubungan eksponensial. Secara kuantum, elektron dapat menembus tanggul potensial dengan perubahan energi yang menurun secara eksponensial. Fenomena ini disebut sebagai *tunnel effect*.

Temperatur devais mempengaruhi performansi sel surya. Korelasi antara temperatur devais ( $T_c$ ) terhadap performansi sel surya menjelaskan pengaruh terhadap temperatur ambien ( $T_a$ ), kecepatan angin ( $V_w$ ), radiasi matahari, sistem material yang digunakan seperti tingkat transmitansi dan absorbansi (Skoplaki, 2009). Parameter yang menunjukkan tingkat performansi sel surya adalah efisiensi sel surya. Hubungan antara efisiensi sel surya dengan temperatur sel surya dapat dijelaskan dengan persamaan berikut :

$$\eta_c = \eta_{Tref} [1 - \beta_{ref}(T_c - T_{ref}) + \gamma \log_{10} I(t)]$$

Dimana  $\eta_c$  adalah efisiensi,  $I(t)$  adalah intensitas matahari,  $\eta_{Tref}$  adalah efisiensi elektrik pada  $T_{ref}$  yaitu pada radiasi sel surya  $0,1 \text{ W/cm}^2$ . Koefisien temperatur bahan  $\beta_{ref}$  dan koefisien radiasi bahan  $\gamma$  memiliki nilai sekitar  $0,0045\text{K}$  dan  $0,12$

untuk silikon kristal modul (Notton, 2005). Dari persamaan di atas, semakin tinggi temperatur devais, maka bilangan pengali terhadap efisiensi  $\eta_{Tref}$  akan semakin kecil, menyebabkan nilai efisiensi  $\eta_c$  semakin kecil. Nilai  $\eta_c$  yang semakin kecil menunjukkan menurunnya performansi sel surya terhadap peningkatan temperatur devais

## 2.8 AFORS-HET

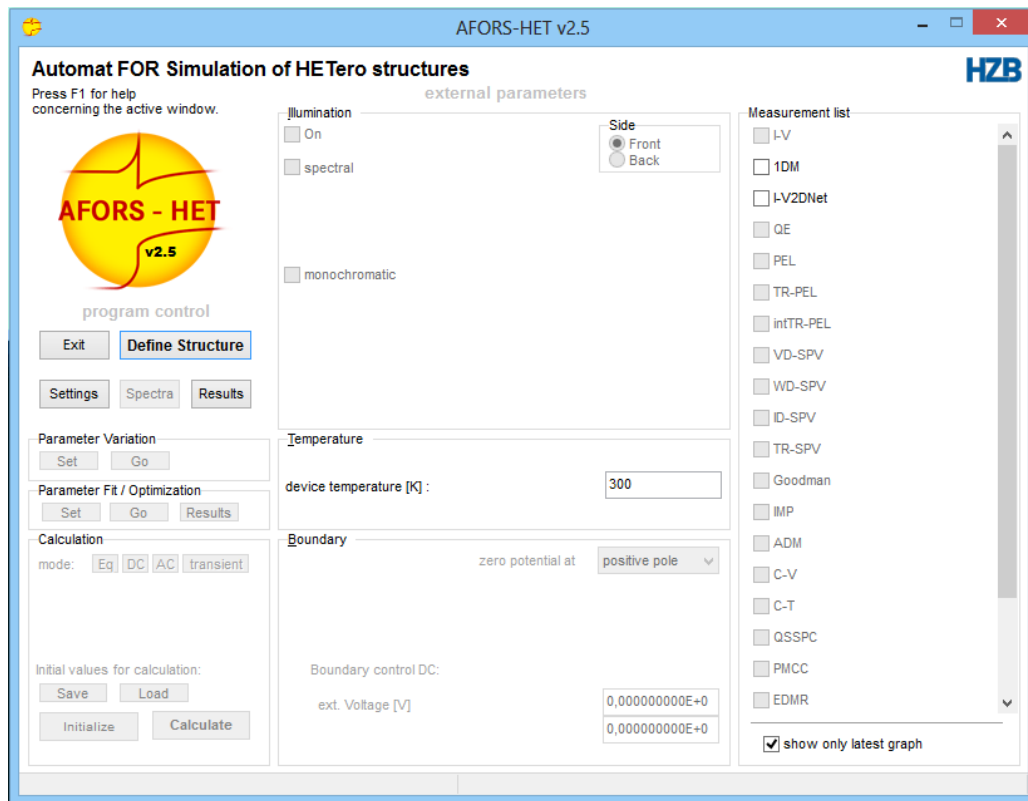
AFORS-HET (*Automat for simulation of heterostructures*) merupakan *software* pemodelan keluaran institut Hahn-Meitner-Institut Berlin. AFORS-HET memiliki fungsi matematis untuk mengetahui teknik perhitungan analog dan simulasi sel surya heterojunction. AFORS-HET sebagai simulasi komputer yang sangat umum untuk menganalisis dan mendesain sel surya, yang memungkinkan pengoperasian device dalam keadaan gelap atau dibawah cahaya iluminasi (Lisheng, 2011). AFORS-HET dapat digunakan untuk menganalisis sifat dan karakteristik sel surya heterojunction.

Program perangkat lunak ini telah digunakan dalam pengembangan dan desain beberapa sel surya. AFORS-HET mampu memecahkan persamaan difusi diferensial, parsial nonlinier dan terkopel dengan menggunakan beberapa parameter posisi material dan transpor material. Pada AFORS-HET, persamaan dalam perangkat diselesaikan menggunakan persamaan geometri. Selain itu, untuk struktur sel surya, model termasuk penyerapan optik dan spektrum cahaya dapat disimulasikan untuk mengetahui secara tepat karakteristik dari sel surya.

AFORS-HET mampu melakukan beberapa karakterisasi yang dapat disimulasikan, diantaranya *current voltage* (I-V), efisiensi kuantum internal dan

eksternal (QE), transient, panjang pulsa, panjang gelombang, *intensity and voltage dependent surface photovoltage* (TR-SPV, PD-SPV, WD-SPV, IDSPV, VD-SPV), *spectral resolved photo and electroluminescence* (PEL), *transient luminescence* (TRPEL, intTR-PEL), *impedance/admittance spectroscopy* (IMP, ADM), *capacitance voltage* (C-V), *capacitance temperature* (C-T) dan *capacitance-frequency* (C-f), *electrical detected magnetic resonance* (EDMR) dan *transient + quasi-steady-state photoconductance decay* (TR-PC, QSSPC) (Stangl, *et al.*, 2006).

Tampilan awal AFORS-HET ditunjukkan pada Gambar 2.10



Gambar 2.10 Tampilan AFORS-HET

## 2.9 Kerangka Berfikir

Sel surya merupakan suatu devais yang mampu mengkonversi energi matahari menjadi listrik. Perubahan energi dicapai dengan absorpsi sinar matahari

oleh sel surya yang menyebabkan eksitasi elektron dari tingkat energi awal ke tingkat energi yang lebih tinggi. Sel surya heterojunction merupakan sel surya yang terdiri dari p-n junction yang terbuat dari material semikonduktor yang berbeda. Heterojunction sel surya terdiri dari *front contact*, *window layer*, semikonduktor tipe-n dan tipe-p sebagai p-n junction, serta *back contact*. Salah satu sel surya heterojunction adalah sel surya CdS/CdTe. Sel surya CdS/CdTe menggunakan ZnO sebagai *window layer*, hal ini dikarenakan ZnO memiliki energigap pada jangkauan *ultraviolet* yaitu 3,37 eV. Lapisan tipis CdS berfungsi sebagai semikonduktor tipe-n, dan lapisan tipis CdTe sebagai semikonduktor tipe-p

Preparasi sel surya diawali dengan melakukan pemodelan untuk sel surya yang akan dibentuk. Hal ini dilakukan untuk memaksimalkan efisiensi sel surya yang dibentuk. Pada penelitian ini, parameter yang diperhatikan adalah ketebalan CdS dan temperatur devais. Ketebalan CdS dapat mempengaruhi efisiensi dari sel surya, yaitu rekombinasi elektron yang menurun mengakibatkan keluaran arus rendah pula. Temperatur devais sebagai variasi diperhatikan untuk meningkatkan performa sel surya saat ditempatkan di lingkungan. Salah satu pemodelan matematis yang mampu mengetahui karakteristik sel surya adalah AFORS-HET. AFORS-HET sebagai simulasi komputer yang sangat umum untuk menganalisis dan mendesain sel surya, yang memungkinkan pengoperasian device dalam keadaan gelap atau dibawah cahaya iluminasi. Dalam penggunaannya, susunan sel surya yang diinginkan akan di input dalam AFORS-HET dengan parameter yang telah ditentukan. Selanjutnya melakukan varisai terhadap parameter yang ingin diubah. Melakukan perhitungan secara otomatis menggunakan AFORS-HET.

## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Simpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan bahwa :

- 1) Ketebalan CdS mempengaruhi performansi sel surya. Semakin tinggi ketebalan CdS, maka akan menurunkan nilai  $J_{sc}$  dan  $V_{oc}$ , yang selanjutnya akan menurunkan nilai keluaran daya maksimum. Keluaran daya yang semakin kecil seiring meningkatnya ketebalan CdS, memberikan informasi bahwa efisiensi sel surya ZnO/CdS/CdTe semakin menurun seiring meningkatnya ketebalan CdS. Efisiensi terbesar pada ketebalan CdS 50 - 100 nm sebesar 32 %. Nilai efisiensi menurun secara eksponensial hingga mulai mengalami saturasi pada ketebalan CdS 8  $\mu\text{m}$  – 10  $\mu\text{m}$  dengan nilai efisiensi berkisar pada 7 %. Sedangkan nilai FF cenderung tidak eksponensial. Hal ini disebabkan karena perubahan nilai  $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$  dan  $P_{max}$  memiliki interval yang berbeda. Pada ketebalan CdS 50 nm – 2  $\mu\text{m}$ , nilai FF cenderung sama, yaitu berkisar 87,3 % dan mulai menurun pada ketebalan 3 – 6  $\mu\text{m}$ . Nilai FF mulai meningkat pada ketebalan CdS 7 – 10  $\mu\text{m}$  yaitu 87,3 %
- 2) Temperatur devais mempengaruhi performansi sel surya. Semakin tinggi temperatur devais, performansi sel surya ZnO/CdS/CdTe semakin menurun. Sel surya dengan ketebalan CdS 1  $\mu\text{m}$  memiliki nilai  $V_{oc}$  terbesar ada pada temperatur 270 K yaitu sebesar 1,0359 volt dan tegangan keluaran terendah ada pada temperatur devais 310 K yaitu sebesar 0,9798 volt. Didapatkan nilai FF tertinggi pada temperatur devais 270 K yaitu 88,8 % dengan nilai efisiensi

tetinggi yaitu 33,6 %. Sedangkan nilai FF terendah pada temperatur devais 310 K yaitu 86,8 % dengan efisiensi yang terendah pula sebesar 31 %.

## 5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat dilakukan untuk penelitian selanjutnya adalah :

- 1) Melakukan penelitian dengan menggunakan parameter yang sesuai dengan pemodelan yang selanjutnya dibandingkan untuk mengetahui perbandingan dari hasil simulasi dan penelitian.
- 2) Mempelajari dan melakukan uji lain terhadap parameter simulasi.
- 3) Melakukan simulasi dengan penambahan variasi yaitu ketebalan pada lapisan *window layer* dan *absorber*.



## DAFTAR PUSTAKA

- Adityawan, Eki. (2010). Studi Katakarakteristik Pencatuan Solar Cell terhadap Kapasitas Sistem Penyimpanan Energi Baterai. *Skripsi*. Depok: Universitas Indonesia.
- Afrian, N., Sutikno, dan Ngurah Made Dharma Putra. (2015). Karakterisasi Prototipe Sel Surya Organik Berbahan Dasar Ekstrak Bawang Merah yang Difabrikasi dengan Metode Spincoating. *Unnes Physics Journal*, 4(1), hlm. 17-25.
- Ariswan. (2013). *Semikonduktor, Handout Kuliah*. Yogyakarta: FMIPA UNY.
- Aryani, N. P. (2011). Pengaruh Doping Cu terhadap Struktur dan Sifat Optik Film Tipis CdTe yang Ditumbuhkan dengan Metode DC Magnetron Sputtering. *Skripsi*. Semarang: FMIPA Unnes.
- Astuti, S. Y. (2011). Struktur dan Sifat Listrik Film Tipis CdTe:Cu yang Ditumbuhkan dengan Metode DC Magnetron Sputtering. *Skripsi*. Semarang: FMIPA Unnes.
- Barman, R., S.K. Singh, dan D. Kaur. (2015). Structural Phase Transition and Enhanced Ferroelectricity in Bi(Fe<sub>1-x</sub>Mnx)O<sub>3</sub> Thin Films Deposited by Pulsed Laser Deposition. *Thin Solid Films*, 594, hlm. 80.
- Becerril, M., O. Zelaya-Angel, A.C. Medina-Torres, and J.R. Aguilar-Hernandez,. (2009). Crystallization from Amorphous Structure to Hexagonal Quantum Dots Induced by an Electron Beam on CdTe Thin Films. *J. Cryst. Growth*, 311(5), hlm. 1245 - 1249.
- Benghanem, M.S., dan Saleh N.A. (2008). Modeling of Photovoltaic Module and Experimental Determination of Serial Resistance. *JTUSCI*, 2, hlm. 94-105.

- Bernstein, A. dan Rusnano. (2008). *Magnetron sputtering technology*. Dipetik februari 05, 2018, dari Visual Science: <https://www.visual-science.com/projects/magnetron-sputtering/technical-illustration/>
- Caraman, I., Vatavu, S., Rasu, G., dan Gaşin, P. (2006). The Luminescence of CdS and CdTe Thin Films, Components of Photovoltaic Cells. *Chalcogenide Lett*, 3, hlm. 1-7.
- Chikate, B.V., dan Y.A. Sadawarte. (2015). The Factors Affecting the Performance of Solar Cell. *International Journal of Computer Applications*, (0975-8887), hlm. 1-5.
- Diallo, D., Alain K.E., Amsata N., Mouhamadou M. S., dan Moustapha D. (2017). The Influence of the Thickness of the Cds Emitter Layer on the Performance of a CIGS Solar Cell with Acceptor Defects. *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)*, 4(1), hlm. 1- 4 .
- Durri S., dan Heri Sutanto. (2015). Karakterisasi Sifat Optik Lapisan Tipis ZnO doping Al yang diDeposisi di atas Kaca dengan Metode Sol-Gel Teknik Spray-Coating. *Jurnal Fisika Indonesia*, 19(55), hlm. 38-40.
- Erni, T. (2007). Deposisi Lapisan Tipis Alumunium (Al) pada substrat Kaca dengan Teknik Evaporasi dan Karakterisasi Optiknya. *Skripsi*. Yogyakarta: Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Sanata Dharma .
- Fardi, H. dan Fatima B. (2013). Characterization and Modeling of CdS/CdTe Heterojunction Thin-Film Solar Cell for High Efficiency Performance. *International Journal of Photoenergy*, 2013, hlm. 1-6.
- Fardi, H., dan Fatima Buny. (2013). Characterization and Modeling of CdS/CdTe Heterojunction Thin-Film Solar Cell for High Efficiency Performance. *Hindawi*, 2013, hlm. 1-6.

- Filipponi, L., dan Duncan Sutherland. (2012). *NANOTECHNOLOGIES: Principles, Applications, Implications and Hands-on Activities*. Luxembourg: European Union,.
- Firmaningsih, R. (2014). Pengaruh Fraksi Mol Aluminium Oxide ( $Al_2O_3$ ) terhadap Sifat Listrik dan Sifat Optik Film Tipis Zinc Oxide (ZnO) dengan Metode DC Magnetron Sputtering. *Skripsi*. Semarang: Universitas Negeri Semarang.
- Ghosh, B., Bhuktre Swapril, Priyesh Surana, dan M.W. Akram. (2013). Current Voltage Characteristics Modeling of Polycrystalline CdTe-CdS Solar Cells for Different Grain Sizes of CdTe. *Int. J. Nanoelectronics and Materials*, 6, hlm. 37-44.
- Golgovici, F. dan Visan T. (2012). Electrodeposition behaviour of Cadmium Telluride from chlorine chloride – urea ionic liquids. *Chalcogenide Lett*, 9(4), hlm. 165-174.
- Goyal, A. dan P. R. Soni. (2016). Effect of Wafer Thickness on Characteristics of Hetero- junction Silicon Solar. *Optoelectronics and Advanced Materials*, 10(1112), hlm. 855 - 857.
- Graddage N., Ta-Ya Chu, Heping Ding, Christophe Py, Afshin Dadvand, Ye Tao. (2016). Inkjet Printed Thin and Uniform Dielectrics for Capacitors and Organic Thin Film Transistors Enabled by the Coffee Ring Effect. *Elsevier Organic Electronics*, 29, hlm. 114-119.
- Greentumble Editorial Team. (2018, Agustus 2). *Effect of Temperature on PV Panel Efficiency*. Diambil kembali dari Greentumble: <https://greentumble.com/effect-of-temperature-on-solar-panel-efficiency/>
- Hadi, S. (2013). Deposisi dan Karakterisasi Film Tipis CdS/CdTe:Cu yang Ditumbuhkan dengan Metode DC Magnetron Sputtering. *Skripsi*. Semarang: FMIPA UNNES.

- Heri, J. (2012). Pengujian Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Solar Cell Kapasitas 50Wp. *Engineering*, 4(1), hlm. 47-55.
- Honsberg, C. dan Stuart B. (2018, Agustus 02). *Solar Cell Efficiency*. Diambil kembali dari PV Education: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/solar-cell-efficiency>
- Hsiao, K. (2010). Electron-reflector strategy for cdte thin-film solar cells. *Ph.D. dissertation*. Colorado: Colorado State University.
- Isabella, Olindo., Jager Klaus, Smets, Arno, Swaaij, Rene van Swaaij, dan Miro Zeman. (2016). *Solar Energy : Fundamentals, Technology and Systems*. England: UIT Cambridge.
- Islam, M.A., Q. Huda, M.S. Hossain, M.M. Aliyu, M.R. Karim, K. Sopian, and N. Amin. (2013). High Quality 1  $\mu\text{m}$  Thick CdTe Absorber Layers Grown by Magnetron Sputtering for Solar Cell Application. *Curr. Appl. Phys*, 13(2), hlm. 115-121.
- Jojo. (2018, September 8). *Circuits Today*. Diambil kembali dari Understanding the p-n Junction: <http://www.circuitstoday.com/understanding-the-pn-junction>
- Kholiq, I. (2015). Pemanfaatan Energi Alternatif sebagai Energi Terbarukan untuk Mendukung Substitusi BBM. *Jurnal IPTEK*, 19(2), hlm. 75-91.
- Kosyachenko, L. (2010). Efficiency of Thin-film CdS/CdTe Solar Cells. *Solar Energy*, R. D. Rugescu, Ed., hlm. 105–130.
- Kumarasinghe, P.K.K., Amila Dissanayake, B.M.K. Pemasiri, dan B.S. Dassanayake. (2017). Effect of Post Deposition Heat Treatment on Microstructure Parameters, Optical Constants and Composition of Thermally Evaporated CdTe Thin Films. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 58, hlm. 51-60.

- Lee, J.S., Y.K. Jun, dan H.B. Im. (1987). Effects of CdS Film Thickness on the Photovoltaic Properties of Sintered CdS/CdTe Solar Cells. *Solid State Science and Technology*, 134(1), hlm. 248-251.
- Liewhiran, C., dan Sukon Phanichphant. (2007). Improvement of Flame-made ZnO Nanoparticulate Thick Film Morphology for Ethanol Sensing. *Sensors*, 7(5), hlm. 650-675.
- Lisheng, W., Chen Fengxiang dan Ai Yu. (2011). Simulation of High Efficiency Heterojunction Solar Cells with AFORS-HET. *Journal of Physics: Conference Series*, 276, hlm. 1-9.
- Makhnunah, K. (2011). Heterojunction CdTe/CdS yang Ditumbuhkan dengan Metode DC Magnetron Sputtering. *Skripsi*. Semarang: FMIPA Unnes.
- Manurung, P. (2011). Difraktogram Sinar-x dan Mikrostruktur Timah Dioksida dengan Penambahan Fe. *Jurnal Ilmu Dasar*, 12(1), hlm. 91 - 96.
- Marwoto, P., N.M. Darmaputra, Sugianto, Z. Othaman, E. Wibowo, dan S.Y. Astuti. (2012). Peningkatan Kualitas Film Tipis CdTe sebagai Absorber Sel Surya dengan menggunakan Doping Tembaga (Cu). *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, 8, hlm. 215-221.
- Mattevi, C., Hokwon Kim, dan Manish Chhowalla. (2011). A Review of Chemical Vapor Deposition of Graphene on Copper. *Journal of Materials Chemistry*, 21, hlm. 3324-3334.
- McCandless, B.E. dan Birkmire, R.W. (1991). Analysis of Post Deposition Processing for CdTe/CdS Thin Film Solar Cells. *Solar Cells*, 31(6), hlm. 527-535.
- Muhammad, R. F. (2016). Studi Pengaruh Suhu Substrat terhadap Sifat Listrik dan Sifat Optik Bahan Semikonduktor Lapisan Tipis Tin Sulfide (SnS) Hasil Preparasi dengan Teknik Vakum Evaporasi. *Skripsi*. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.

- Notton, G., Cristofari, C., Mattei, M. dan Poggi, P. (2005). Modelling of A Double-glass Photovoltaic Module Using Finite Differences. *Appl. Therm*, 25, hlm. 2854–2877.
- Petti L., Niko Munzenrieder, Christian Vogt, Hendrik Faber, Lars Buthe, Giuseppe Cantarella, Francesca Bottachi, Thomas D. anthopoulos, dan Gerhard Troster. (2016). Metal Oxide Semiconductor Thin-film Transistors for Flexible Electronics. *Applied Physics Reviews*, 3, hlm. 1-53.
- Puspitaningrum, T. (2017). Penentuan Band Gap dan Konduktivitas Bahan Semikonduktor Lapisan Tipis Sn(S<sub>0,8</sub>Te<sub>0,2</sub>) dan Sn(S<sub>0,6</sub>Te<sub>0,4</sub>) Hasil Preparasi dengan Teknik Evaporasi Termal. *Skripsi*. Yogyakarta: FMIPA UNY.
- Raditya, G. (2018, Agustus 2). *5 Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Solar Panel*. Diambil kembali dari Janaloka: <https://janaloka.com/5-faktor-yang-mempengaruhi-kinerja-solar-panel>
- Raditya, Galih. (2015, Oktober 12). *5 Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Solar Panel*. Diambil kembali dari Janaloka: <https://janaloka.com/5-faktor-yang-mempengaruhi-kinerja-solar-panel/>
- Razykov, T.M., Ferekides, C.S., Morel, D., Stefanakos, E., Ullal, H.S., dan Upadhyaya, H.M. (2011). Solar Photovoltaic Electricity: Current Status and Future Prospects. *Solar Energy*, 85(8), hlm. 1580–1608.
- Romeo, N., Bosio, A., Tedeschi, R., Romeo, A., dan Canevari, V. (1999). A Highly Efficient and Stable CdTe/CdS Thin Film Solar Cell. *Solar Energy Mater*, 58, hlm. 209–218.
- Sathya M., A. Claude, P. Govindasamy dan K. Sudha. (2012). Growth of Pure and Doped ZnO Thin Films for Solar Cell Applications. *Pelagia Research Library*, 3(5), hlm. 2591-2598.

- Shoewu, O., Anuforonini, dan Duduyemi. (2016). Simulation of The Performance of CdTe/CdS/ZnO Multi-junction Thin Film Solar Cell. *Review of Information Engineering and Applications*, 3(1), hlm. 1-10.
- Sites, J. dan J. Pan. (2007). Strategies to increase CdTe solar-cell voltage. *Thin Solid Films*, 515(15), hlm. 6099–6102.
- Skoplaki, E. dan Palyvos J.A. (2009). On the Temperature Dependence of Photovoltaic Module Electrical Performance: A Review of Efficiency/Power Correlations. *Solar Energy*, 83, hlm. 614-624.
- Song, T. (2017). Design Strategies for High-Efficiency CdTe Solar Cells. *Dissertation*. Colorado: Colorado State University.
- Stangl, R., M.Kriegel dan M. Schmidt. (2006). AFORS-HET, VERSION 2.2, A NUMERICAL COMPUTER PROGRAM FOR SIMULATION OF HETEROJUNCTION SOLAR CELLS AND MEASUREMENTS. *Hahn-Meitner-Institut Berlin*.
- Sugianto. (2009). *Buku Ajar Fisika Zat Padat*. Semarang: UNNES.
- Touskova, J., D. Kindl, dan J. Tousek. (1994). Photovoltaic Cells on CdS/CdTe Heterojunctions. *phys. stat. sol.*, 142, hlm. 539-549.
- Tunggadewi, D.A., dan Fitria H. (2015). Pembuatan Sel Surya Film Tipis dengan DC Magnetron Sputtering. *Jurnal Ilmiah GIGA*, 18(1), hlm. 38-42.
- Umar, L., Yanuar, dan Rahmondia N. Setiadi. (2015). Pemodelan Kurva I(V) Normal Light dan Dark Current Modul PV. *Repository University of Riau*, 1-6.
- Wesoff, E. (2018, Agustus 2). *First Solar Hits Record 22,1 % Conversion Efficiency for CdTe Solar Cell*. Diambil kembali dari Greentech Media: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/First-Solar-Hits-Record-22-1-Conversion-Efficiency-For-CdTe-Solar-Cell#gs.OJ4kUTQ>

- Wibowo, E. (2008). Struktur Mikro dan Sifat Optik Film Tipis CdTe Sebagai Bahan Pembuat Sel Surya Yang Ditumbuhkan Dengan Metode DC Magnetron Sputtering. *Skripsi*. Semarang: FMIPA Unnes.
- Wirjoadi, Bambang Siswanto dan Sudjatmoko. (2009). Analisis Sifat Mikro Lapisan Tipis TIN pada Substrat Al Hasil Plasma Sputtering. *Prosiding PPI - PDIPTN*, 1, hlm. 1-7.
- Wolpert, D., dan Paul Ampadu. (2011). *Managing Temperatur Effects in Nanoscale Adaptive Systems*. Springer.
- Wu, Jingjin., Ferryanto Ang, Cezhou Zhao, dan Jeremy S Smith. (2013). Electrical Properties of N-type CdS and P-type CdTe Thin Film in CdS/CdTe Solar Cells. *20th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA)*, 385-389.
- Ye, X., C. Zheng, dan L. Ma. X. Huang. (2015). Microemulsion-assisted Hydrothermal Preparation and Infrared Radiation Property of Ti2O Nanomaterials with Tunable Morphologies and Crystal Form. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 31, hlm. 295.
- Zhao, Q.X., L.L. Yang, M. Willander, B.E. Sernelius, dan P.O. Holtz. (2008). Surface Recombination in ZnO Nanorods Grown by Chemical Bath Deposition. *Journal of Applied Physics*, 104, hlm. 1-6.