PEMODELAN SCAPS-1D FILM TIPIS ZnO/CdS/CdTe: PENGARUH KETEBALAN DAN FRAKSI STOIKIOMETRI LAPISAN ABSORBER TERHADAP UNJUK KERJA SEL SURYA

Skripsi

digunakan untuk memenuhi salah satu syarat

untuk memperoleh gelar Sarjana Sains

Program Studi Fisika

oleh

Deska Pilawa Permadis

4211415009

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

2019

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Skripsi yang berjudul "Pemodelan SCAPS-1D Film Tipis ZnO/CdS/CdTe: Pengaruh Ketebalan dan Fraksi Stoikiometri Lapisan Absorber terhadap Unjuk Kerja Sel Surya" telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang panitia ujian skripsi Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Penegtahuan Alam.

Hari : Selasa

Tanggal : 6 Agustus 2019

Semarang 5 Agustus 2019

Dosen Pembimbing

Drs. Ngurah Made D P, M.Si., Ph.D.
NIP. 196702171992310 02

PERNYATAAN

Dengan ini, saya

nama : Deska Pilawa Permadis

NIM : 4211415009

program studi : Fisika S1

menyatakan bahwa skripsi yang berjudul **Pemodelan SCAPS-1D Film Tipis ZnO/CdS/CdTe: Pengaruh Ketebalan dan Fraksi Stoikiometri Lapisan Absorber terhadap Unjuk Kerja Sel Surya** ini benar-benar karya saya sendiri bukan jiplakan dari karya orang lain atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika keilmuan yang berlaku baik sebagian atau seluruhnya. Pendapat atau temuan orang atau pihak lain yang terdapat dalam skripsi ini telah dikutip untuk dirujuk berdasarkan kode etik ilmiah. Atas pernyataan ini, saya secara pribadi siap menanggung resiko/sanksi hukum yang dijatuhkan apabila ditemukan adanya pelanggaran terhadap etika keilmuan dalam karya ini.

Semarang, 5 Agustus 2019

METERAI TEMPEL

E256BAFF949575510

6000

ENAM RIBU RUPIAH

Deska Pilawa Permadis

NIM. 4211415009

PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul

Pemodelan SCAPS-1D Film Tipis ZnO/CdS/CdTe:Pengaruh Ketebalan dan Fraksi Stoikiometri Lapisan Absorber terhadap Unjuk Kerja Sel Surya

disusun oleh

Deska Pilawa Permadis

4211415009

telah dipertahankan dalam Ujian Skripsi FMIPA UNNES pada hari Selasa tanggal 6 Agustus 2013

Panitia:

Ketua

Dr. Sugianto, M.Si.
NIP. 196102191993031001

Sekretaris

Dr. Suharto Linuwih, M.Si.
NIP. 196807141996031005

Penguji I

Dr. Sugianto, M.Si.
NIP. 196102191993031001

Penguji II

Dr. Putut Marwoto, M.S
NIP. 196308211988031004

Anggota Penguji/ Pembimbing

Drs. Ngurah Made D P, M.Si., Ph.D.
NIP. 196702171992310 02

MOTO DAN PERSEMBAHAN

Motto

- Nikmat tuhanmu manakah yang engkau dustakan (Ar-Rahman:13)
- Terus belajar, mencoba dan berusaha, lakukan apa yang bisa kamu lakukan. Sertakan Allah (SWT) dalam setiap tindakan (Deska Pilawa)
- Man Jadda Wa Jada

Persembahan

Skripsi ini saya sembahkan kepada kedua orang tua saya dan keluarga saya, teman-teman mahasiswa fisika, dan kamu

PRAKATA

Segala puji bagi Allah SWT tuhan semesta alam dan kesempurnaan hanya milik Allah semata serta sholawat dan salam tercurah pada Nabi agung Muhammad SAW. Hanya dengan kemurahan dan rahmat-Nya alhamdulillah penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "Pemodelan SCAPS-1D Film Tipis ZnO/CdS/CdTe: Pengaruh Ketebalan dan Fraksi Stoikiometri Lapisan Absorber Terhadap Unjuk Kerja Sel Surya".

Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam usaha penyelesaian skripsi ini. Dengan penuh ketulusan penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Fathur Rokhman, M.Hum, Rektor Universitas Negeri Semarang,
2. Dr. Sugianto, M.Si., Dekan Fakultas Matematikan dan Ilmu Pengetahuan Alam,
3. Dr. Suharto Linuwih, M.Si., Ketua Jurusan Fisika,
4. Dr. Mahardika Prasetya Aji, M.Si., Ketua Program Studi Fisika atas fasilitas yang disediakan bagi mahasiswa,
5. Drs. Ngurah Made Darma Putra, M.Si., Ph.D. selaku Pembimbing yang telah membimbing saya dengan penuh perhatian dan kesabaran, meluangkan waktu, dan memberikan masukan serta motivasi selama penyusunan skripsi,
6. Dr. Sugianto, M.Si. dan Dr. Putut Marwoto, M.S selaku penguji skripsi saya,
7. Semua dosen Jurusan Fisika FMIPA UNNES yang telah memberi bekal pengetahuan yang berharga,
8. Bapak, Ibu, dan keluarga yang telah memberikan dukungan dan motivasi serta memberikan kesempatan kepada penulis untuk menempuh jenjang perguruan tinggi,

9. Agus Andi Wibowo, S.Si., Rini Murtafiatin, S.Si., dan Priyandika Dwi Rizaldi, S.Si., sebagai senior yang telah membimbing dengan penuh kesabaran,
10. Mahasiswa Fisika angkatan 2015 yang telah memberikan motivasi dan mengukir cerita,
11. Berbagai pihak yang telah memberi bantuan untuk karya tulis ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Tiada kesepurnaan bagi manusia sebagai insan yang sangat membutuhkan akan ilmu dan pengetahuan. Oleh karena itu segala kritik dan masukan yang membangun penulis harapkan.

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

Semarang,

Penulis,

ABSTRAK

Deska Pilawa Permadis. (2019). Pemodelan SCAPS-1D Film Tipis ZnO/CdS/CdTe : Pengaruh Ketebalan dan Fraksi Stoikiometri Lapisan Absorber terhadap Unjuk Kerja Sel Surya. Skripsi, Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang. Pembimbing Drs. Ngurah Made Darma Putra, M.Si., Ph. D.

Kata Kunci: Sel surya ZnO/CdS/CdTe, Ketebalan CdTe, Fraksi stoikiometri CdTe, unjuk kerja sel surya

Indonesia terletak pada daerah khatulistiwa, sehingga wilayah Indonesia akan selalu disinar matahari selama 10 jam sampai dengan 12 jam dalam sehari, potensi energi panas matahari di Indonesia sekitar 4,8 kWh/m².hari. Oleh karena itu negara Indonesia memiliki potensi yang cukup besar dalam pemanfaatan energi alternatif berupa energi sel surya. Sel surya yang sedang di kembangkan saat ini salah satunya adalah sel surya CdS/CdTe. Pemodelan sel surya CdS/CdTe dilakukan untuk meminimalisir kerugian dalam proses pabrikasi sel surya. Unjuk kerja sel surya dapat ditingkatkan dengan mengoptimalkan ketebalan CdTe sebagai lapisan absorber. Sebagai lapisan absorber besarnya energi gap sangat berpengaruh dalam penyerapan lapisan, besarnya energi gap pada proses pabrikasi dapat di optimasi dengan mengoptimumkan fraksi stoikiometri lapisan CdTe. Pada penelitian ini, dilakukan pemodelan sel surya ZnO/CdS/CdTe dengan variasi ketebalan dan fraksi stokiometri menggunakan SCAPS-1D. Variasi ketebalan CdTe yang digunakkan yaitu 0,6 μm – 6,0 μm dan variasi fraksi stoikiometri yang digunakkan adalah 0,6 – 7,0. Data hasil pemodelan SCAPS-1D dikarakterisasi menggunakan karakteristik I-V untuk mengetahui nilai V_{oc}, J_{sc}, FF, dan efisiensinya. Nilai karakteristik I-V meningkat seiring bertambahnya ketebalan CdTe yaitu pada ketebalan 6,0 μm dengan nilai V_{oc}, J_{sc}, dan FF, berturut-turut 0,894 Volt; 31,990 mA/cm²; dan 84,720 %, dengan besar efisiensi 24,228 %. Pada variasi fraksi stoikimetri optimum pada fraksi stoikiometri 0,6 dengan energi gap 1,4855 eV dan nilai efisiensi sebesar 22,900 % untuk nilai V_{oc}, J_{sc}, dan FF secara berurutan sebesar 0,872 volt; 31,345 mA/cm²; 83,806 %.

ABSTRACT

Deska Pilawa Permadis. (2019). SCAPS-1D Modelling of Thin Film ZnO/CdS/CdTe : Effect of Thickness and Stoichiometry Faction Absorber Layer of Performance Solar Cell. Undergraduate Thesis. Departement of Physics, Faculty of Mathematics and Sciences. Universitas Negeri Semarang. Supervisior Drs. Ngurah Made Darma Putra, M.Si., Ph. D.

Keywords: Thin Film ZnO/CdS/CdTe, CdTe Thickness, CdTe Stoichiometry Faction, Performance Solar Cell

Indonesia location in equatorial area, so the territory of Indonesian will always be in sunlight for 10 hours to 12 hours in one day. The potential of solar thermal energy in Indonesia is around 4,8 kWh/m².day. Therefore Indonesia has large enough to use alternative energy in the form of energy solar cell. The solar cell are being developed currently one of them is CdS/CdTe solar cell. The CdS/CdTe solar cell medeling was done to minimizing losses in solar cell fabrication process. Solar cell performance can be improved by optimizing the CdTe thickness as an absorber layer. As the absorber layer of the energy gap is very influental in absorption layer, The amount of energy gaps in fabrication process can be optimized by optimizing stoichiometry fraction of CdTe layer. In this research, done modelling ZnO/CdS/CdTe solar ceell with thickness variation and stoichiometry fraction using SCAPS-1D. The thickness variation of CdTe used is 0,6 μm – 6 μm and stoichiometry fraction used is 0,6 – 7. The SCAPS-1D modelling data is characterised using the I-V characteristics to know the value of V_{oc}, J_{sc}, FF, and efficiency. The value of I-V characteristics increases with the thickness of CdTe is at thickness 6 μm with value V_{oc}, J_{sc}, and FF, consecutive 0,894 Volt; 31,990 mA/cm²; and 84,720 %, with efficiency of 24,228 %. In the optimum variation stoichiometry fraction of stoichiometry fraction 0,6 with energy gaps 1,4855 eV and efficiency value 22,900 % eV for value V_{oc}, J_{sc}, and FF in order of 0,872 volt; 31,345 mA/cm²; 83,806 %.

DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN JUDUL..... i
PERSETUJUAN PEMBIMBING..... ii
PERNYATAAN..... iii
PENGESAHAN..... iv
MOTO DAN PERSAMAAN..... v
PRAKATA..... vi
ABSTRAK..... viii
ABSTRACT..... ix
DAFTAR ISI..... x
DAFTAR TABEL..... xii
DAFTAR GAMBAR..... xiii
DAFTAR LAMPIRAN..... xv
BAB I PENDAHULUAN..... 1
1.1 Latar Belakang..... 1
1.2 Rumusan Masalah..... 4
1.3 Tujuan Penelitian..... 5
1.4 Manfaat Penelitian..... 5
1.5 Penegasan Istilah..... 5
1.6 Sistematika Penulisan..... 6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA..... 8
2.1 Sel Surya..... 8
2.2 Prinsip Kerja Sel Surya..... 9
2.3 Lapisan Sel Surya..... 9
2.4 Sel Surya Semikonduktor..... 11
2.4.1 Konsep Dasar Semikonduktor..... 11
2.4.2 Dinamika Pembawa Muatan dalam *P-n Junction*..... 13
2.4.3 Karakteristik I-V..... 14
2.4.4 *Quantum Efficiency* (QE)..... 15

2.4.5 Koefisien Absorbsi..... 16
2.5 Sel Surya Berbasis CdS/CdTe..... 18
2.5.1 *Cadmium Telluride* (CdTe)..... 18
2.5.2 *Cadmium Sulfide* (CdS)..... 20
2.5.3 *Transparent Conducting Oxide* (TCO)..... 21
2.6 Stoikiometri..... 23
2.7 *Solar Cell Capacitance Simulator* (SCAPS-1D)..... 24
2.8 Kerangka Berfikir..... 24
BAB III METODE PENELITIAN..... 26
3.1 Alur Penelitian..... 26
3.2 Prosedur Penelitian..... 27
3.2.1 Penentuan Parameter Sel Surya ZnO/CdS/CdTe..... 27
3.2.2 Pemodelan Sel Surya ZnO/CdS/CdTe..... 28
3.2.3 Analisis Data Keluaran..... 31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN..... 35
4.1 Variasi Ketebalan CdTe..... 35
4.1.1 Karakteristik I-V..... 35
4.1.2 Nilai Efisiensi Kuantum pada Variasi Ketebalan..... 43
4.2 Variasi Fraksi Stoikiometri..... 45
4.2.1 Karakteristik I-V pada Variasi Fraksi Stoikiometri..... 45
4.2.2 Karakteristik QE pada Variasi Fraksi Stoikiometri..... 50
4.2.3 Karakteristik Absorbsi pada Variasi Fraksi Stoikiometri..... 52
4.3 Ketebalan dan Fraksi Stoikiometri Optimum..... 53
BAB V PENUTUP..... 56
5.1 Simpulan..... 56
5.2 Saran..... 56
DAFTAR PUSTAKA..... 57
LAMPIRAN..... 64

DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 2.1 Karakteristik dan Sifat CdTe..... 20
Tabel 2.2 Karakteristik dan Sifat CdS..... 21
Tabel 3.1 Parameter Sel Surya ZnO/CdS/CdTe..... 27
Tabel 3.2 Data Penelitian: Pengaruh Ketebalan CdTe terhadap Unjuk Kerja Sel Surya ZnO/CdS/CdTe..... 32
Tabel 3.3 Data Penelitian: Pengaruh Fraksi CdTe terhadap Unjuk Kerja Sel Surya ZnO/CdS/CdTe..... 33
Tabel 4.1 Pengaruh Ketebalan CdTe terhadap Unjuk Kerja Sel Surya ZnO/CdS/CdTe..... 39
Tabel 4.2 Pengaruh Fraksi CdTe terhadap Unnjuk Kerja Sel Surya ZnO/CdS/CdTe..... 46

DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 2.1 Prinsip Kerja Sel Surya..... 9
Gambar 2.2 Struktur Dasar Sel Surya Berlapis Tipis (*Thin Film Solar Cell*)..... 10
Gambar 2.3 Lapisan Sel Surya..... 11
Gambar 2.4 Sambungan p-n yang Menunjukan Aliran Drif dan Diffusi Elektron-Hole..... 13
Gambar 2.5 Struktur Kubik CdTe..... 19
Gambar 2.6 Struktur Kristal CdS..... 21
Gambar 2.7 Struktutur Kristal ZnO: (a) *rocksalt*, (b) *zincblende*, (c) *wurtzite*..... 23
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian..... 26
Gambar 3.2 Susunan Sel Surya ZnO/CdS/CdTe..... 28
Gambar 3.3 Tampilan Awal SCAPS-1D Versi 3307..... 28
Gambar 3.4 Tampilan Set Problem pada SCAPS-1D Versi 3307..... 29
Gambar 3.5 Proses Input Data Parameter Sel Surya ZnO/CdS/CdTe..... 30
Gambar 3.6 Tampilan Hasil Karakteristik I-V..... 32
Gambar 3.7 Nilai Absorbsi Sel Surya ZnO/CdS/CdTe..... 34

Gambar 4.1 Grafik Hubungan Tegangan dengan Densitas Arus pada Variasi Ketebalan Sel Surya ZnO/CdS/CdTe..... 35
Gambar 4.2 Grafik Hubungan Ketebalan CdTe terhadap (a) tegangan *open circuit* (V_{oc}) (b) Arus *short circuit* (J_{sc})..... 40
Gambar 4.3 Grafik Hubungan Ketebalan dengan (a) Fill Faktor (FF) (b) Efisiensi..... 42
Gambar 4.4 Grafik Hubungan Panjang Gelombang dengan Nilai Efisiensi Kuantum..... 43
Gambar 4.5 Grafik Hubungan Tegangan dengan Densitas Arus pada Variasi Fraksi Stoikiometri Sel Surya ZnO/CdS/CdTe..... 45
Gambar 4.6 Grafik Hubungan Fraksi Stoikiometri Lapisan CdTe terhadap (a)Tegangan *open circuit* (V_{oc}) (b) Arus *short circuit* (J_{sc})..... 47
Gambar 4.7 Grafik Hubungan Fraksi Stoikiometri Lapisan CdTe terhadap (a) Fill Faktor (FF) (b) Efsiensi..... 49
Gambar 4.8 Grafik Hubungan Panjang Gelombang dengan Efisiensi Kuantum.. 50
Gambar 4.9 Grafik Hubungan Fraksi dengan Efisiensi Kuantum..... 51
Gambar 4.10 Grafik Hubungan Panjang Gelombang dengan Koefisien Absorbsi..... 52
Gambar 4.11 Grafik Hubungan Panjang Gelombang dengan Koefisien Absorbsi..... 53
Gambar 4.12 Grafik Perbandingan Hasil Simulasi dengan Hasil Eksperimen..... 54

DAFTAR LAMPIRAN

Halaman

Lampiran 1 Nilai Energi Gap pada Perbandingan CdTe..... 65

Lampiran 2 Nilai Energi Gap Fitting Data pada Perbandingan CdTe..... 67

Lampiran 3 Grafik Hubungan Energi Gap dengan Fraksi Stoikiometri..... 69

Lampiran 4 Grafik Hubungan Energi Gap Hasil Fitting data dengan Fraksi Stoikiometri..... 70

Lampiran 5 Tabel Parameter Solar Sel dari Referensi Jurnal Gloecker..... 71

Lampiran 6 Tabel Hasil Perhitungan Karakteristik I-V Secara Teori Pada Variasi Ketebalan..... 73

Lampiran 7 Tabel Hail Perbandingan Karakteristik I-V Secara Teori Pada Variasi Fraksi Stoikiometri..... 74

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kehidupan manusia sangat bergantung pada energi. Namun, krisis energi telah terjadi saat ini hampir di seluruh negara di dunia. Salah satunya yaitu negara Indonesia, efek krisis energi di Indonesia sangat dirasakan oleh masyarakat Indonesia. Memasuki abad ke-21, persediaan minyak dan gas bumi semakin menipis. Sementara kebutuhan akan energi semakin meningkat, terutama di negara-negara industri akan meningkat sampai 70% antara tahun 2000 sampai dengan tahun 2030. Suatu hal yang sangat memprihatinkan dan menghawatirkan mengingat minyak dan gas bumi yang selama ini kita andalkan suatu saat nanti akan habis, di Indonesia diperkirakan dalam waktu 18 tahun lagi akan habis. Status persediaan minyak dunia diperkirakan akan habis 23 tahun kedepan, gas akan habis 62 tahun kedepan, sedangkan batu bara 146 tahun kedepan tidak akan tersedia lagi (Hasan, 2012). Meningkatnya laju pertumbuhan penduduk dan perkembangan di segala bidang mengakibatkan meningkatnya krisis energi salah satunya energi listrik.

Energi listrik menjadi kebutuhan yang sangat penting bagi masyarakat, sebagai upaya untuk memenuhi kebutuhan energi listrik tersebut sekaligus penanggulangan kondisi krisis penyedia tenaga listrik di beberapa daerah, maka dapat memanfaatkan potensi alam untuk dijadikan energi listrik. Salah satu sumber energi listrik adalah energi matahari (Rusman, 2015). Matahari merupakan sumber energi listrik yang potensial bagi kebutuhan manusia, energi tersebut dapat diperoleh dari panas yang merambat sampai ke permukaan bumi, atau cahaya yang jatuh sampai ke permukaan bumi (Yuliananda & Sarya, 2015).

Di Indonesia cahaya matahari yang melimpah dan merata, dapat ditangkap di seluruh kepulauan di Indonesia hampir sepanjang tahun. Letak Indonesia yang berada pada daerah khatulistiwa mengakibatkan wilayah Indonesia akan selalu disinari matahari selama 10 sampai dengan 12 jam dalam sehari (Dzulfikar & Broto, 2016). Data Ditjen Dewan Energi Nasional Tahun 2016 menyebutkan

bahwa sumber daya energi surya di Indonesia dapat dikelompokkan berdasarkan wilayah yaitu kawasan barat dan timur Indonesia. Sumber daya energi surya di kawasan barat Indonesia (4,5 kWh/m².hari) dengan variasi bulanan sekitar 10% dan kawasan timur Indonesia (5,1 kWh/m².hari) dengan variasi bulanan sekitar 9% serta rata-rata Indonesia 4,8 kWh/m².hari dengan variasi bulanan sekitar 9%. Potensi energi panas matahari di Indonesia sekitar 4,8 kWh/m².hari atau setara dengan 112.000 GWp (Nugraha S., 2016). Oleh karena itu, negara Indonesia memiliki potensi yang cukup besar dalam pemanfaatan energi altertatif berupa energi surya yang dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik yang disebut sel surya. Teknologi ini merupakan teknologi konservatif yang dapat mengonversi energi matahari menjadi energi listrik.

Teknologi sel surya adalah sebuah devais elektronik yang menggunakan fenomena fotovoltaik untuk mengubah sinar matahari menjadi energi listrik (Fadliondi, Budiyanto, & Haris, 2018). Panel surya/*solar cell* ini dibangun pertama kali sekitar tahun 1883 oleh Charles Fritts, panel surya dibentuk dari sambungan antara lapisan selenium dengan lapisan emas yang sangat tipis. Tetapi efisiensi sel hanya sekitar 1%, hingga tahun 1950-an peneliti U.S. mengembangkan sarana untuk menghasilkan listrik *onboard* ruang kendaraan (Thakur, Dharmendra, Amit Arnav, & Abhishek datta, 2016). Tahun 1950-1960, teknologi desain dan efisiensi sel surya terus berlanjut dan diaplikasikan ke pesawat ruang angkasa (*photovoltaic energies*). Tahun 1970-an, dunia menggalakkan sumber energi alternatif yang "*renewable*" dan ramah lingkungan, maka PV (*photovoltaic*) mulai di aplikasikan ke "*low power warning system*" dan "*offshoere buoys*" tetapi produksi PV tidak banyak karena masih "*handmade*". Pada tahun 1980-an, perusahaan-perusahaan PV bergabung dengan instansi energi pemerintah agar dapat memproduksi sel PV dalam jumlah besar, sehingga harga per sel surya dapat lebih ditekan serendah mungkin (Mintorogo, 2000).

Fotovoltaik merupakan teknologi yang dapat mengonversi langsung cahaya matahari menjadi sebuah energi listrik. Sistem fotovoltaik ini beroperasi tanpa mengemisikan polutan ke lingkungan. Selain itu, sel fotovoltaik memiliki *lifetime* lebih dari 30 tahun, devais fotovoltaik (sel surya) biasanya terbuat dari bahan

semikonduktor, sehingga dapat dikatakan bahwa fotovoltaik merupakan teknologi semikonduktor yang ramah lingkungan (*green technology*) dan menjanjikan (Xiang, Huang, Kan, Wei, & Gong, 2013).

Semikonduktor tipe paduan II-VI banyak diminati oleh ahli teknologi dan bidang keilmuan karena celah pita (*band gap*) yang dimiliki material semikonduktor tersebut menunjukan sifat-sifat fisik yang baik. *Direct band gap* dari material semikonduktor ini mencakup spektral panjang gelombang dari ultravioet sampai infra merah. Material yang memiliki celah *band gap* lebar mempunyai kandungan berupa kalkogen Zn dan Cd seperti ZnTe, ZnS, dan CdTe. Contoh material semikonduktor golongan II-VI yang sering digunakan dalam teknologi sel surya antara lain CdS, CdTe dan ZnO. Material ZnO berperan sebagai lapisan *transparent conducting oxide* (TCO) pada sel surya dengan energi gap 3,37 eV. Pada aplikasinya sebagai TCO, ZnO memiliki keunggulan utama, yaitu kandungan material yang tidak beracun (Fatiatun, 2015). Material CdS dengan struktur heksagonal memiliki keunggulan sebagai *window layer* pada sel surya karena memiliki energi gap 2,4 eV dan kestabilannya pada suhu ruang.

Material CdTe biasanya digunakan sebagai lapisan absorber pada sel surya karena termasuk material dengan *direct band gap* relatif kecil yaitu 1,5 eV, (Syamsul, Hadi, Putut Marwoto, dan Ngurah Made DP., 2013) CdTe mempunyai energi gap yang ideal sebesar 1,45 eV pada suhu ruang (Khan et al., 2018). Ketika energi foton pada matahari lebih besar dari celah pita energi (band gap), maka energi tersebut akan diserap dan menghasilkan pasangan elektron-hole pada daerah deplesi atau *space charge region* oleh sebab itu, energi gap pada suatu material sangat mempengaruhi efisiensi dari sel surya (Benigno I., 2017), sehingga CdTe memiliki kemampuan yang baik untuk menyerap spektrum panjang gelombang yang cukup besar. Berdasarkan deskripsi diatas, maka perlu adanya penelitian lebih lanjut menegenai besarnya energi gap pada lapisan absorber.

Swanson (2013) menyebutkan bahwa ketebalan optimum film tipis CdS berkisar 100-200 nm, sedangkan ketebalan optimum CdTe berkisar 1 μm. Plotnikov menyebutkan bahwa CdTe dengan ketebalan 500 nm memiliki

performasi yang baik dan Paudel et al. (2012) menyebutkan bahwa CdTe dengan ketebalan 2,1 μm memiliki performasi yang baik. Berdasarkan deskripsi di atas, diperlukan penelitian lebih lanjut terkait performasi optimum sel surya ZnO/CdS/CdTe dengan variasi ketebalan film tipis CdTe (Murtafiatin R., 2018).

Hasil efisiensi sel surya meningkat 1,5 % selama 17 tahun terakhir ini. Pada penelitian sebelumnya efisiensi sel surya mencapai 16,5%. Dengan semakin berkembangnya teknologi baru-baru ini efisiensi meningkat menjadi 20,4% (Khosroabadi, 2014), pada tahun 2016 efisiensi sel surya CdTe mencapai 22,1% (Stechmann *et al*., 2016).

Produksi sel surya memerlukan biaya tidak murah dan waktu yang cukup lama, sehingga perlu adanya langkah yang lebih efisien dalam pembuatan sel surya. Metode yang biasa digunakan dalam penelitian sel surya adalah metode eksperimen dan metode simulasi (pemodelan). Metode simulasi (pemodelan) digunakan pada penelitian tahap awal. Hal ini dikarenakan penelitian tahap awal bertujuan untuk mencari parameter optimum penelitian seperti bahan, ketebalan lapisan, doping, enetgi gap, dan lain sebagainya. SCAPS-1D merupakan salah satu s*oftware* pemodelan yang memiliki berbagaimacam karakteristik dibandingkan *software* lain. Selain itu SCAPS-1D dirancang untuk pemodelan yang didalam nya berisi komponen yang lebih lengkap dibandingkan *software* lainnya.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang dikaji berdasarkan latar belakang di atas adalah sebagai berikut:

1) Bagaimana pengaruh ketebalan lapisan absorber CdTe terhadap unjuk kerja sel surya ZnO/CdS/CdTe menggunakan pemodelan SCAPS-1D?
2) Bagaiamana pengaruh fraksi stoikiometri lapisan absorber CdTe terhadap unjuk kerja sel surya ZnO/CdS/CdTe menggunakan pemodelan SCAPS-1D?
3) Berapa ketebalan dan fraksi optimum lapisan absorber CdTe yang dapat diaplikasikan sebagai sel surya ZnO/CdS/CdTe berdasarkan pemodelan SCAPS-1D?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang di atas tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1) Mengetahui pengaruh ketebalan lapisan absorber CdTe terhadap unjuk kerja sel surya ZnO/CdS/CdTe menggunakan pemodelan SCAPS-1D.
2) Mengetahui pengaruh fraksi stoikiometri lapisan absorber CdTe terhadap unjuk kerja sel surya ZnO/CdS/CdTe menggunakan pemodelan SCAPS-1D.
3) Berapa ketebalan dan fraksi stoikiometri optimum lapisan absorbsi CdTe yang dapat diaplikasikan sebagai sel surya ZnO/CdS/CdTe berdasarkan pemodelan SCAPS-1D.

1.4 Manfaat Penelitian

Dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat untuk memberi informasi tentang pengaruh ketebalan CdTe dan fraksi CdTe sebagai lapisan absorber terhadap performansi sel surya ZnO/CdS/CdTe menggunakan pemodelan SCAPS-1D. Selain itu hasil dari penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan pada proses pemodelan dan penelitian maupun pembuatan sel surya film tipis ZnO/CdS/CdTe.

1.5 Penegasan Istilah

Pada pemodelan sel surya ZnO/CdS/CdTe menggunakan SCAPS-1D ini dilakukan untuk menentukan parameter ketebalan CdTe dan fraksi CdTe sebagai lapisan absorber yang optimum guna pembuatan sel surya ZnO/CdS/CdTe secara empiris. Sel surya ZnO/CdS/CdTe merupakan salah satu sel surya *heterojunction* dengan ZnO sebagai TCO (*transparent conducting oxide*), CdS sebagai *widow layer* (smikonduktor tipe n) dan CdTe sebagai lapisan absorber (semikonduktor tipe p). Ketebalan CdTe divariasikan dari ketebalan 0,6 μm hingga 6,0 μm. Selain itu, fraksi stoikiometri CdTe juga divariasikan dari 0.6–7,0 untuk mengetahui penyerapan yang baik dari sel surya ZnO/CdS/CdTe. Performansi sel surya dapat diketahui melalui pengukuran karakteristik I-V untuk mengetahui sifat

kelistrikannya dan pengukuran absorbsi untuk mengetahui besarnya panjang gelombang optimal yang dapat diserapa oleh sel surya ZnO/CdS/CdTe. Performansi optimum sel surya adalah sel surya dengan efisiensi yang tinggi dan performansi absorber yang baik ialah material yang memiliki nilai koefisien absorbsi yang besar.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan skripsi ini secara garis besar terbagi menjadi tiga bagian yaitu bagian pendahuluan, bagian isi, dan bagian akhir skripsi.

1. Bagian pendahuluan terdiri dari halaman judul, persetujuan bimbingan, halaman pengesahan kelulusan, pernyataan bebas plagiat, motto dan persembahan, kata pengantar, daftar isi, daftar tabel, daftar gambar, daftar lampiran.
2. Bagian isi skripsi terdiri dari 5 bab, yaitu:
   a. Bab 1 Pendahuluan

      Pada bab ini berisi latar belakang, tujuan penelitian, manfaat penelitian, penegasan istilah, dan sistematika penulisan.
   b. Bab II Landasan Teori

      Pada bab ini mencakup teori-teori untuk mendukung penelitian, landasan teori yang digunakan sebagai landasan berfikir untuk melakukan penelitian dan digunakan sebagai pegangan untuk melakukan penelitian.
   c. Bab III Metode Penelitian

      Bab ini berisi metode penelitian yang akan dilakukan, yang berupa alur penelitian, dan karakterisasi.
   d. Bab IV Hasil Penelitian dan Pembahasan

      Bab ini berisi hasil penelitian yanag telah dilakukan dan pembahasan hasil penelitian sesuai dengan tujuan penelitian.
   e. Bab V Penutup

      Pada bab ini berisi simpulan dan saran dari peneliti. Simpulan merupakan rangkuman dari hasil penelitian dan pembahasan.

3. Bagian akhir skripsi terdapat daftar pustaka dan lampiran
   a. Daftar pustaka berisis tentang daftar buku dan literatur yang berkaitan dengan penelitian dan
   b. Lampiran berisi kelengkapan-kelengkapan skripsi dan perhitungan analisis data.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sel Surya

Sel surya adalah sel fotovoltaik yang merupakan perangkat listrik untuk mengubah energi dari cahaya matahari langsung menjadi energi listrik oleh efek fotolistrik. Sel surya berfungsi menangkap energi foton yang terdapat pada sinar matahari. Energi surya sangat efektif digunakan di negara-negara yang memiliki iklim tropis, karena memiliki pancaran sinar matahari yang lebih tinggi seperti negara Indonesia (Martawati, 2018). Di Indonesia saat siang hari yang cerah radiasi sinar matahari mampu mencapai 1000 watt/m². Apabila sebuah piranti semikonduktor seluas satu meter persegi memiliki efisiensi 10%, maka piranti semikonduktor ini mampu memberikan daya listrik sebesar 100 watt. Piranti ini berupa modul sel surya yang secara komersial memiliki efisiensi berkisar antara 5% hingga 15% bergantung pada material semikonduktor penyusunnya. Efisiensi didefinisikan sebagai perbandingan antara tenaga listrik yang dihasilkan oleh piranti sel surya dengan jumlah energi cahaya yang diterima dari pancaran sinar matahari (Yuliananda & Sarya, 2015). Sel surya yang baik memiliki effisiensi yang tinggi, yaitu dengan tegangan sircuit terbuka (V_{oc}) yang tinggi, arus hubung singkat (J_{sc}) yang besar, dan fill fakor (FF) yang lebih baik (Guo, Sun, & Wu, 2019).

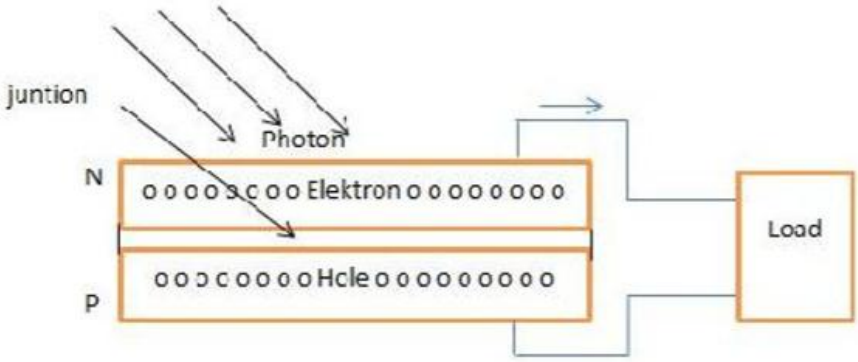
Sel surya dapat dibedakan menjadi 3 generasi, pertama yaitu generasi sel surya berbasis silikon, generasi kedua yaitu sel surya film tipis dan generasi ketiga adalah sel surya berbasis foto-elektrokimia (Fistiani, Maya Dwi, Fahru Nurosyid dan Risa Suryana, 2017). Generasi pertama sel surya berbasis silikon dibagi menjadi dua kelompok, yaitu silikon monokristalin dan silikon polikristalin, silikon monokristalin mempunyai efisiensi sebesar 25,6% dan efisiensi silikon polikristalin sebesaar 20,4% (Mc Meekin *et al*., 2016; Green *et al*., 2010). Generasi sel surya film tipis dapat dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu sel surya silikon amorf, sel surya *cadmium telluride* (CdTe)/ *copper indium gallium*

selenide (CIGS) dan sel surya organik. Teknologi PV berbasis *cadmium telluride* (CdTe) memiliki efisiensi

untuk sel surya sebesar 22,1% (Kartopu et al., 2018) sedangkan CIGS memiliki efisiensi sebesar 22,6% (Sim et al., 2019).

2.2 Prinsip Kerja Sel Surya

Proses dasar dalam sel surya adalah proses fotovoltaik. Efek fotovoltaik adalah proses yang menghasilkan tegangan atau arus listrik dalam bahan fisik yang dirancang khusus ketika terkena sinar matahari, yaitu proses konversi sinar matahari menjadi energi listrik. Pada sel surya terdapat dua sambungan antara dua lapisan tipis yang terbuat dari bahan semikonduktor tipe-p dan semikonduktor tipe-n. Pada saat foton mengenai sel surya, foton tersebut akan diberikan ke elektron untuk melepaskan diri dari semikonduktor tipe-n. Terlepasnya elektron ini meninggalkan hole pada daerah yang disebut fotogenerasi elektron-hole. Pada sambungan p-n terbentuk medan listrik E, elektron hasil fotogenerasi tertarik ke arah semikonduktor tipe-n begitu juga dengan hole yang tertarik ke arah semikonduktor tipe-p. Jika kedua semikonduktor tersebut dihubungkan dengan sebuah kabel dan diberi beban seperti pada Gambar 2.1 akan menghasilkan arus listrik dan mengalir ke kabel tersebut (Dan & Syukri, 2010).

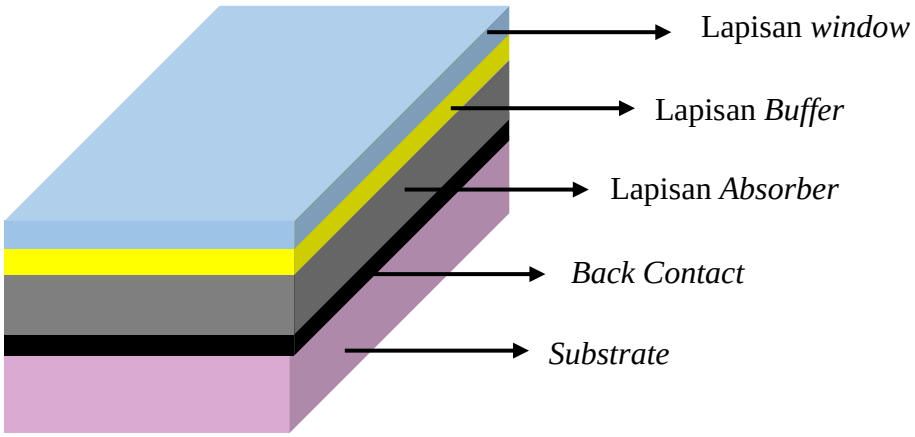


Gambar 2.1 Prinsip Kerja Sel Surya

2.3 Lapisan Sel Surya

Secara umum struktur sel surya dengan lapisan tipis atau sering disebut *thin film solar cell* terdiri atas lima lapisan penyususn dasar yaitu *support substrate, bottom electrode, p-type semiconductor* (absorber), *transparent conductive oxide,*

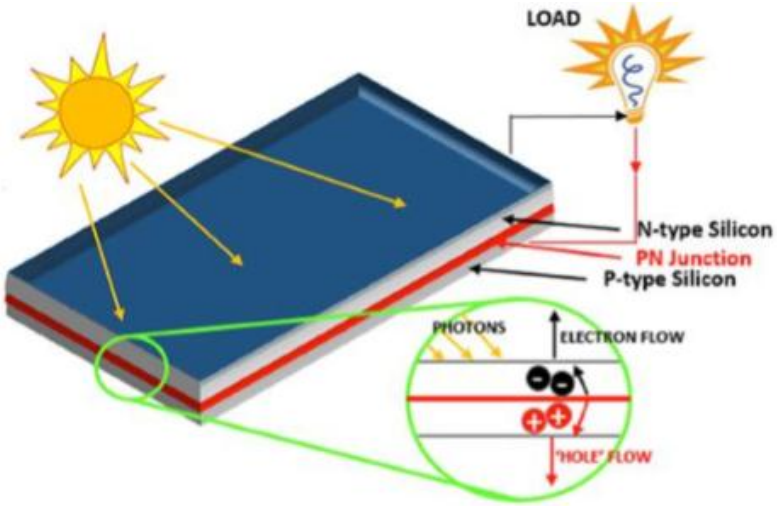
dan *top electrode* sebagai *window layer*. Struktur dasar sel surya berlapis tipis (*thin film soar cell*) dapat di lihat pada Gambar 2.2 (Buwarda, 2019).



Gambar 2.2 Struktur Dasar Sel Surya Berlapis Tipis (*Thin Film Soar Cell*)

Lapisan *buffer* berfungsi sebagai lapisan penyangga, memiliki struktur celah pita energi yang cukup tinggi maka akan memberikan spektrum cahaya yang luas yang mengalir ke koleksi foton yang lebih tinggi. Selain itu akan mengurangi kemungkinan pembentukan *bende lockal* antara lapisan TCO dan CdTe. Ini akan mengurangi komplikasi resistensi shunt (Sarkar et al., 2018). Lapisan absorbsi berfungsi sebagai lapisan yang digunakan untuk menyerap cahaya dari sinar matahari. Lapisan ini biasanya terdiri dari material semikonduktor.

Bahan-bahan yang dirancang untuk sel surya khusus memiliki sifat photovoltaik. Sel surya terdiri dari beberapa lapisan semikonduktor. Terdapat dua jenis semikonduktor yaitu semikonduktor tipe-p dan semikonduktor tipe-n yang digabungkan bersamaan untuk menghasilkan sambungan p-n (*heterojunction p-n*) seperti Gambar 2.3 (Vlatko Cingoski, 2017).



Gambar 2.3 Lapisan Sel Surya

2.4 Sel Surya Semikonduktor

2.2.1 Konsep Dasar Semikonduktor

Semikonduktor merupakan bahan dengan konduktivitas listrik yang berada antara isolator dan konduktor. Sifat kelistrikan konduktor maupun isolator tidak mudah berubah oleh pengaruh temperatur, cahaya, atau medan magnet tetapi pada semikonduktor sifat-sifat tersebut sangat penting. Semikonduktor memiliki besar energi gap kurang dari 6 eV (Oktaviani & Astuti, 2014). Tahanan jenis semikonduktor sekitar 10^{-3} m sampai dengan 10^{+3} m. Atom-atom bahan semikonduktor membentuk kristal dengan struktur tetrahedral, dengan ikatan kovalen. Bahan semikonduktor yang banyak dipakai dalam elektronika adalah silikon (Si) dan germanium (Ge). Pada temperatur 0K mempunyai lebar pita terlarang (energi gap) 0,785 eV, sedang untuk Ge 1,21 eV. Baik Si maupun Ge mempunyai elektron valensi 4, Ada dua jenis bahan semikonduktor yaitu semikonduktor intrinsik (murni) dan semikonduktor ekstrinsik (tidak murni).

Semikonduktor ektrinsik mempunyai 2 tipe yaitu tipe-p dan tipe-n. Semikonduktor elementar terdiri atas unsur-unsur yang terdapat dalam sistem periodik pada golongan IV A seperti Silikon (Si), Germanium (Ge), dan Karbon (C). Semikonduktor gabungan terdiri dari logam unsur pada

sistem periodik golongan IIB dan IIIA (yang mempunyai valensi 2 dan 3) dengan non logam golongan VA dan VIA (valensi 5 dan 6), sehingga membentuk ikatan yang stabil (valensi 8). Semikonduktor gabungan III dan V misalnya GaAs dan InP misalnya GaAs dan InP sedangkan, gabungan II dan VI misalnya CdTe dan ZnS (Sujarwata, Putut Marwoto, & Ngurah Made D P., 2014).

Semikonduktor intrinsik merupakan semikonduktor murni tanpa pengotor atau kandungan pengotornya dapat diabaikan. Semikonduktor intrinsik memiliki jumlah pembawa muatan yang seimbang antara elektron dan hole. Konsentrasi pembawa muatan dapat berubah dengan adanya dopan atau biasa disebut pengotor. Semikonduktor dapat dibedakan menjadi semikonduktor tipe-n dan tipe-p. Konsentrasi pembawa muatan dpat ditentukan melalui persamaan 2.2.

$$n, p = \int_{E_{C,V}}^{\infty} N_{C,V(E)F(E)dE} \qquad (2.2)$$

Pada kondisi ekuilibirum, konsentrasi pembawa muatan dapat dituliskan sebagaimana persamaan 2.3 dan persamaan 2.4

$$n = N_C \, exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \qquad (2.3)$$

$$p = N_v \, exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \qquad (2.4)$$

dengan

$$N_C = 2\left(\frac{2\pi m_e - kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \qquad (2.5)$$

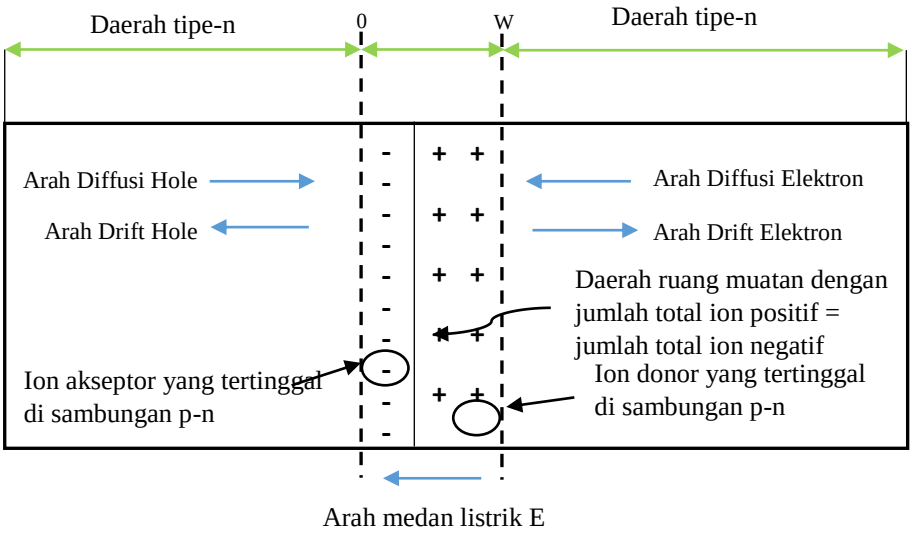
dan

$$N_C = 2\left(\frac{2\pi m_h - kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \qquad (2.6)$$

m_e dan m_h merupakan massa efektif elektron dan hole dan h merupakan konstanta Planck (Murtafiatin, 2018).

2.2.2 Dinamika Pembawa Muatan dalam P-n Junction

P-n junction atau sambungan p-n merupakan sambungan smikonduktor yang terbentuk dalam satu kisi kristal semikonduktor yang memiliki konduksi listrik tipe-p dan tipe-n di dua daerah yang berdekatan. Pembawa muatan mayoritas pada semikonduktor tipe-n adalah elektron dan pembawa muatan mayoritas pada semikonduktor tipe-p adalah hole. Dalam semikonduktor tipe-p pembawa muatan bukan hanya hole tetapi juga sejumlah kecil elektron. Demikian juga untuk semikonduktor tipe-n, pembawa minoritasnya adalah hole. Pada suatu keadaan tidak dapat dibedakan antara konsentrasi pembawa mayotritasnya dengan pembawa minoritasnya, maka semikonduktor ini disebut semikonduktor intrinsik.



Gambar 2.4 Sambungan p-n yang Menunjukan Aliran Drif dan Diffusi Elektron-Hole

Gambar 2.4 merupakan sambungan p-n yang terbentuk saat dua semikonduktor tipe-p dan tipe-n disatukan menunjukkan aliran drif dan diffusi elektron-hole. Ketika bahan tersebut disatukan, elektron pada pada semikonduktor tipe-n akan berpindah ke semikonduktor tipe-p dan hole pada semikonduktor tipe-p berpindah ke semikonduktor tipe-n, sehingga terbentuklah gerakan termal secara acak, hole dan elektron mulai terdifusi ke sisi yang berlawanan menyebabkan terbentuknya *space charge region* pada sambungan mengakibatkan adanya medan listrik E. Hole dari

semikonduktor tipe-p bergerak searah dengan medan listrik dan elektron bergerak berlawanan medan listrik atau biasa disebut juga kecepatan *drift*.

Drift merupakan salah satu komponen dari aliran arus karena adanya medan listrik, yang dijelaskan dengan persamaan

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \tag{2.7}$$

J adalah rapat arus dalam A/cm², σ dalam satuan $\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$, dan E dalam satuan V/cm. Diffusi adalah proses gerakan termal suatu partikel secara acak yang menyebabkan partikel tersebut terdistribusi secara beragam. Partikel ini akan cenderung bergerak dari daerah dengan konsentrasi yang lebih besar ke konsentrasi yang lebih kecil (Roger & Hamayoon, 2017).

2.2.3 Karakteristik I-V

Karakteristik I-V pada sel surya merupakan salah satu karakterisasi yang umum digunakan dalam pengukuran performansi sel surya. Parameter dasar yang diperoleh dari karakteristik I-V antara lain arus *short circuit* (J_{sc}), tegangan *open circuit* (V_{oc}), *fill factor* (FF), dan efisiensi (η). Arus *short circuit* (J_{sc}) adalah arus yang diukur ketika tegangan dari sel surya bernilai nol dan sel surya dalam keadaan *short* ini terjadi ketika sejumlah *carrier* yang terkumpul pada wilayah *p-n junction* bergerak ke rangkaian luar, sehingga dapat dikatakan bahwa *arus short circuit*. Tegangan *open circuit* (V_{oc}) merupakan tegangan yang diukur pada saat rangkaian sel surya dalam keadaan terbuka, sehingga tidak ada arus yang mengalir ke rangkaian luar dan arus bernilai nol. V_{oc} adalah tegangan maksimal yang dapat dibangkitkan sel surya (Shodiq, 2017). *Fill factor* (FF) ialah besaran tak berdimensi yang menyatakan perbandingan antara daya maksimum yang dihasilkan sel surya terhadap perkalian V_{oc} dan J_{sc}. Effisiensi yaitu perbandingan daya keluaran sel surya terhadap daya masukkannya.

Persamaan berikut ini menunjukan nilai persamaan I-V karakteristik:

$$V_{oc} = V \text{ pada } J = 0\ (V) \tag{2.8}$$

$$J_{sc} = J \text{ pada } V = 0\ (mA\ cm^{-2}) \tag{2.9}$$

$$P_{max} = \max(J \times V)(\ W\ cm^{-2}) \quad (2.10)$$

$$FF = 100 \times \frac{P_{max}}{V_{oc} \times J_{sc}}\ (\%) \quad (2.11)$$

$$\eta = 100 \times \frac{P_{max}}{P_{in}}\ (\%) \quad (2.12)$$

dengan

$$P_{in} = 100\ mW\ cm^{-2} \quad (2.13)$$

Pada penelitian di lapangan daya input pada sel surya dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$P_{in} = I_r \text{ x A} \quad (2.14)$$

keterangan :

P_{in} = daya nput akibat radiasi matahari (Watt)

I_r = intensitas radiasi matahari (Watt/m^2)

A = luas area permukaan *phtovoltaic module* (m^2) (Julisman Andi, Ira Devi Sara, 2017) radiasi matahari yang mengenai sel PV di ukur menggunakan alat *pyranometer*, alat ini memiliki satuan mV oleh karena itu, harus dikonversikan menjadi satuan Watt/m^2 persamaan yang digunakan adalah:

$$I_r = \frac{I_r\ (\text{mV})}{21{,}13} \text{x1000 (Watt/m}^2) \quad (2.15)$$

(Letsoin, 2012)

2.2.4 Quantum Efficiency (QE)

Sinar matahari tersusun oleh foton-foton dengan berbagai panjang gelombang yang akan mengenai *absorber* pada sel surya. Hanya foton dengan nilai energi tertentu yang bereksitasi. Jika energi pada foton mengenai lapisan bermuatan negatif dalam sel surya dimana frekuensinya lebih besar daripada frekuensi ambang lapisan bermuatan negatif, maka elektron akan bereksitasi menuju lapisan bermuatan positif dibawahnya. Hal tersebut yang dapat menimbulkan aliran listrik. Energi yang dimiliki foton disebut juga sebagai energi *bandgap*. Bahan semikonduktor memiliki kemampuan untuk menyerap energi cahaya pada elektron dan hole-nya dan mengkonversikan menjadi arus listrik. Bahan semikonduktor dipilih

berdasarkan bagaimana bahan tersebut dapat menyerap spektrum matahari (Wardani, 2016).

Efisiensi kuantum (QE) mengindikasikan jumlah arus yang dihasilkan sel surya ketika disinari berbagai panjang gelombang foton datang (Murtafiatin, 2018). Efisiensi kuantum juga didefinisikan sebagai jumlah elektron yang terkumpul dari fenomena foton pada sel surya sesuai dengan persamaan

$$Q_e(E) = \frac{1}{q}\frac{dJ_{sc}\,(E)}{d\Phi\,(E)} \tag{2.16}$$

dengan $d\Phi$ adalah fluks foton yang memiliki satuan $\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ dalam energi (foton) dJ_{sc}(E) medan magnet yang mengarah ke rapat arus pendek (Abou-ras & Kirchartz, 2011). Efisiensi kuantum pada simulasi pemodelan menggunakan persamaan gelombang

$$QE(\lambda, d) = \left[el_0(\lambda) \times QE(\lambda)(1 - e^{(-\alpha(\lambda)d)}\right)[1 + R \times e^{(-\alpha(\lambda)d)}] \tag{2.17}$$

dengan e adalah muatan, $l_0(\lambda)$ adalah fluks foton, $\alpha(\lambda)$ adalah koefisien absorbsi CdTe, dan R adalah reflektansi (Paudel, 2012).

2.2.5 Koefisien Absorbsi

Koefisien absorbsi (α) merupakan fraksi yang diserap dalam satuan jarak yang dilewati serta merupakan karakteristik suatu lapisan tipis dalam panjang gelombang tertentu. Absorbsi foton bergantung pada bahan semikonduktor yang digunakan dan panjang gelombang cahaya yang datang mengenai bahan tersebut. Absorbsi pada suatu bahan semikonduktor mengakibatkan elektron tereksitasi dari pita valensi menuju pita konduksi. Proses transisi elektron dari pita konduksi menuju pita valensi ini ada dua macam yaitu transisi langsung dan transisi tidak langsung (Puspitaningrum, 2017).

Koefisien absorbsi pada semikonduktor dengan pita energi langsung sebagai fungsi energi yang dinyatatakan:

$$\alpha hf = A(hf - E_g)^{\frac{1}{2}} \tag{2.18}$$

ketangan:

A = konstanta

α = koefisien absorbsi (cm^{-1})

hf = energi (eV)

E_g = energi celah pita pada material (eV)

kristal semikonduktor yang dikenai foton monokromatik dengan energi mulai dari yang kecil sampai yang besar, sehingga terjadi penyerapan foton oleh kristal. Apabila foton monokromatik yang datang pada kristal semikonduktor masih diteruskan oleh kristal menunjukkan belum terjadi penyerapan foton oleh kristal.

Pada teknik penyerapan langsung, nilai energi foton yang menyebabkan terjadinya penyerapan foton oleh kristal adalah sama dengan nilai energi celah dari kristal semikonduktor itu. Pada saat mulai terjadinya penyerapan foton oleh kristal menunjukkan bahwa elektron–elektron pada pita valensi mulai memperoleh energi yang cukup untuk melompati celah energi (Eg), sehingga pada saat ini timbul hole (lubang) di pita valensi dan elektron di pita konduksi. Tepat pada saat mulai terjadi penyerapan, energi foton yang diserap kristal (elektron) adalah sama dengan nilai celah energi dari kristal semikonduktor tersebut.

Pada semikonduktor dengan celah pita energi tidak langsung, level terendah pita konduksi tidak berada pada momentum yang sama dengan level teratas pita valensi. Elektron mengabsorbsi foton sekaligus fonon, proses ini memenuhi hukum kekekalan energi. Selain energi foton (partikel dalam gelombang elektromagnetik) terdapat juga fonon (partikel dalam gelombang elastis) yang dipancarkan maupun diserap. Proses transisi yang terjadi tidak hanya melibatkan foton, tetapi juga terdapat fonon. Fonon mempunyai momentum yang sangat tinggi, meskipun energinya rendah jika dibandingkan dengan foton. Foton muncul karena adanya interaksi antar kisi dalam kristal. Apabila energi foton yang diberikan lebih kecil dari energi celah pita material, maka akan terjadi absorbsi fonon. Tetapi jika energi foton yang diberikan lebih besar dari energi celah pita material, maka akan terjadi emisi fonon.

Secara matematis

$$E_g \pm \hbar\Omega = \hbar\omega \quad (2.19)$$

Koefisien absorbsi pada semikonduktor dengan celah pita tidak langsung sebagai fungsi energi dinyatakan:

$$\alpha hf = A(hf - E_g)^2 \quad (2.20)$$

Dengan:

A = konstanta

α = koefisien absorbsi (cm^{-1})

hf= energi (eV)

E_g= energi celah pita pada material (eV)

2.5 Sel Surya Berbasis CdS/CdTe

2.2.1 Cadmium Telluride (CdTe)

Cadmium Telluride (CdTe) adalah senyawa biner semikonduktor golongan II-VI yang digunakan sebagai bahan fotovoltaik film tipis (Tariq & Anis-ur-rehman, 2014). CdTe mempunyai energi gap yang ideal sebesar 1,45 eV pada suhu ruang (Khan et al., 2018), dan memiliki koefisien absorbsi 5x10^5 cm^{-1} pada daerah cahaya tampak (Sharafat et al., 2019), dengan ketebalan lapisan beberapa mikrometer dapat menyerap ~90% foton yang berarti bahwa CdTe merupakan *absorber* yang ideal untuk sel surya film tipis (Zia, Saleemi, & Nassem, 2016) untuk mencapai penyerapan spektrum matahari yang hampir penuh pada ketebalan dibawah 800 nm (Kulkarni, Rondiya, Pawbake, Waykar, & Jadhavar, 2017). Atom *cadmium* adalah tipe II: kation yang memiliki dua elektron valensi pada orbital s: [Cd] = [Kr] $4d^{10}$ $5s^2$. Atom *telluride* adalah tipe VI: anion yang memiliki enam elektron valensi pada orbital s dan p; [Te] = [Kr] $4d^{10}$ $5s^2$ $5p^4$. CdTe memiliki dua tipe struktur yaitu:

1. Struktur kubik tipe *sphalerite*

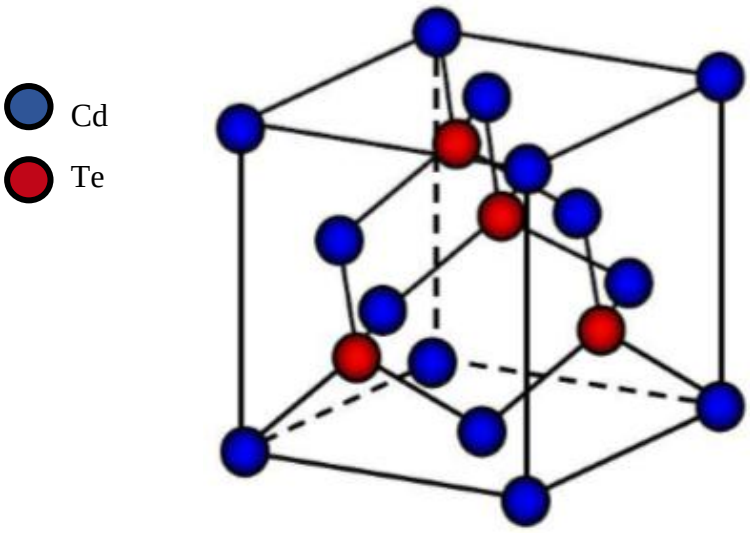
   Struktur *sphalerit* (dari tipe seng seng) yang tersebar luas adalah tipe *sphalerit* yang memiliki kestabilan paling tinggi pada tekanan atmosfer dan terdiri dari FCC (*face cubic center*) yang relatif saling berhadapan

satu sama lain, seperempat lainnya merupakan diagonal kubus. Sel dasar terdiri dari empat molekul CdTe, posisi atom di tentukan oleh koordinat berikut:

Cd $0\ 0\ 0, 0\ \frac{1}{2}\ \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\ 0\ \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\ \frac{1}{2}\ 0$

Te $\frac{1}{4}\ \frac{1}{4}\ \frac{1}{4}, \frac{1}{4}\ \frac{3}{4}\ \frac{3}{4}, \frac{3}{4}\ \frac{1}{4}\ \frac{3}{4}, \frac{3}{4}\ \frac{3}{4}\ \frac{1}{4}$

Gambar 2.5 menunjukkan struktur kubik CdTe.



Gambar 2.5 Struktur Kubik CdTe

2. Struktur heksagonal *Wurtzite*

CdTe dapat membentuk kristal yang memiliki struktur heksagonal *wurtzite*, dimana dua kristal Cd dan Te *subnetworks* heksagonal. Struktur ini telah diamati dalam film tipis CdTe yang diperoleh dengan beberapa teknik (Des & Exactes, 2016).

Film tipis CdTe mengandung aceptor level E_v +0,15 eV dan donor level E_c -0,48 eV. Sifat fisik, khususnya resisitivitas bergantung pada aktivitas tingkat level saat ini. Donor level E_c -0,48 domain untuk film tipis yang kaya Cd dan sampel memiliki tipe konduktivitas. Aceptor level E_v +0,15 ev mendominasi untuk film Te dan sampel memiliki konduktivitas tipe-p (Razykov, Amin, & Alghoul, 2016). Karakteristik dan sifat CdTe dapat dilihat pada Tabel 2.1.

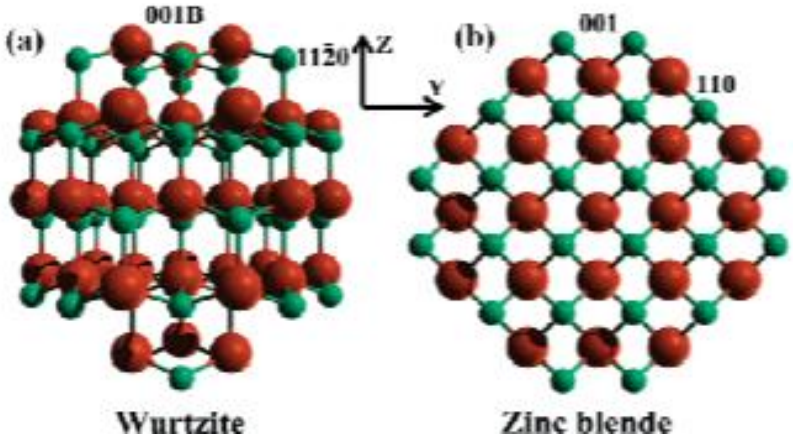
Tabel 2.1 Karakteristik dan Sifat CdTe

Karakteristik dan Sifat CdTe	
Sifat fisik dan kenampakan	Padatan (serbuk, kristal)
Berat molekular	240,01 g/mol
Titik lebur	1092°C
Berat jenis	5,85 g/cm^{3}
Kelarutan	Kelarutan sangat rendah di dalan ai
Struktur kristal	Heksagonal, kubik
Konstanta kekisi	a = 6,482 Å (kubik)
	a = 4,550 Å ; c= 7,451 Å (heksagonal)
Indeks bias	2,67
Band gap	1,45 Ev

2.2.2 Cadmium Sulfide (CdS)

Cadmium Sulfide (CdS) adalah semikonduktor golongan II-VI. CdS ada di alam dalam bentuk mineral *greenoltite*. Senyawa ini banyak digunakan dalam pigmen cat karena dapat memberikan warna kuning cerah sampai merah marun, dengan resistensi yang kuat dan tahan terhadap alkali. Selain itu CdS juga digunakan sebagai komposisi sel surya (Devamani, Kiruthika, Mahadevi, & Sagithapriya, 2017). Sel surya CdS/CdTe dengan ketebalan 100 nm *Cadmium Sulfide* (CdS) dapat menyerap 36% foton dengan energi gap yang tinggi 2,2 eV (Sharafat et al., 2019). CdS memiliki dua struktur utama , yaitu *wurtzite* dan *zinc blende structure* dalam struktur *wurtzite* dan *zinc blende structure* atom Cd dan S terkoordinasi secara tetrahedral, untuk *wurtzite* sistem kirstal berbentuk heksagonal dan *zinc*

blende structure berbentuk kubik. Struktur utama CdS dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Struktur Kristal CdS

Karakteristik dan sifat CdS dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Karakteristik dan Sifat CdS

Karakteristik dan Sifat CdS	
Sifat fisik dan kenampakan	Padatan (serbuk, kristal)
Berat molekular	144,46 g/mol
Warna	Kuning atau coklat
Titik lebur	1750°C
Berat jenis	4,82 g/cm^{3}
Kelarutan	Tidak larut dalam air panas dan air dingin
Struktur kristal	Heksagonal, kubik
Konstanta kekisi	a = 4,160 Å
	c = 6,756 Å
Indeks bias	2,53
Band gap	2,42 eV

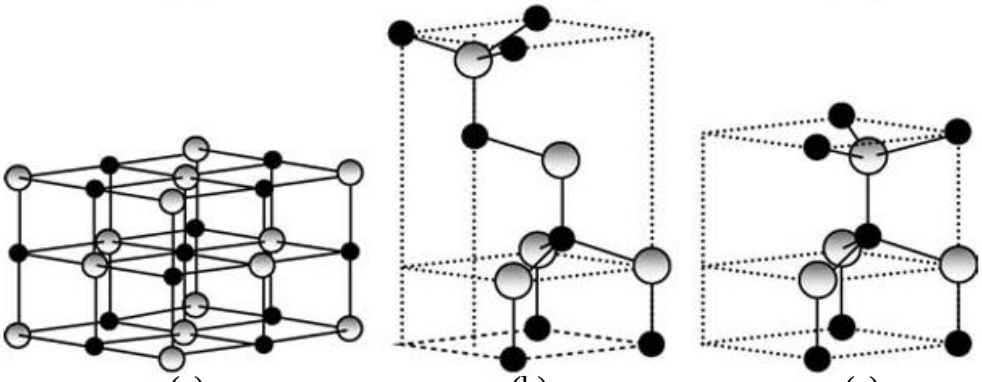
2.2.3 Transparent Conducting Oxide (TCO)

Transparent Conducting Oxide (TCO) atau oksida konduktif transparan adalah semikonduktor yang memiliki lebar celah pita energi

antara 2,4 eV sampai dengan 4,5 eV. Karakteristik yang menonjol dari material ini adalah resistivitas listrik yang rendah dan transparan pada panjang gelombang visibel. Aplikasi oksida konduktif transparant telah berkembang sangat cepat. Material ini telah digunakan untuk membuat piranti optoelektronik seperti: TV, LCD, TV Plasma, *organic electroluminescence* (EL) seperti *touch screen* monitor pada *authomatic tellermachine* (ATM). Selain itu diaplikasikan juga untuk elektroda pada solar sel. Material TCO yang sudah banyak digunakan ialah ITO (*Indium Tin Oxide*).

Pada saat ini para ilmuwan melakukan penelitian dengan material-material TCO yang meliputi *Stanum Oxide* (SnO_2) berbasis *Titanium Oxide* (TiO_2), *Magnesium Hydroxide* ($Mg(OH)_2$) dan material berbasis *Zinc Oxide* (ZnO). *Zinc Oxide* (ZnO) merupakan oksida konduktif transparan yang banyak diteliti sebagai pengganti ITO. Kelebihan dari ZnO adalah terbentuk dari unsur-unsur yang melimpah. Kandungan seng dalam kerak bumi 1000 kali lebih melimpah daripada *indium*. Kelebihan ZnO yang lain adalah biaya murah, tidak beracun, memiliki stabilitas yang tinggi dalam plasma hidrogen dan siklus panas, serta tahan terhadap radiasi (Sinaga, 2009).

ZnO merupakan material semikondukor logam tipe-n golongan II-VI. ZnO memiliki energi gap 3,37 eV merupakan senyawa semikonduktor yang cocok pada rentan panjang gelombang pendek untuk aplikasi optoelektronik. Besarnya eksitasi energi ikat (60 MeV) pada kristal ZnO dapat menghasilkan emisi elektron yang efisien pada suhu kamar dan efisien pada rentan panjang gelombang ultraviolet (<400 nm). Eksitasi ZnO dapat dilakukan dalam rentan panjang gelombang cahaya tampak (400-800 nm) dan dapat dibuat sangat konduktif dengan adanya penambahan material doping. ZnO juga merupakan material semikonduktor yang dapat dimanfaatkan sebagai material feromagnetik di atas suhu ruang.



(a) (b) (c)

Gambar 2.7 Struktur Kristal ZnO: (a) *rocksalt*, (b) *zincblende*, (c) *wurtzite*

Struktur kristal ZnO terdiri dari tiga bentuk yaitu: *rocksalt*, *zinc blende*, dan *wurtzite*. Struktur *rocksalt* terbentuk pada kondisi dengan tekanan tinggi sedangkan, struktur ZnO *zinc blende* terbentuk pada substrat kubik, dan struktur *wurtzite* terbentuk pada kondisi tekanan normal dan fase termodinamika yang stabil (Sutanto & Wibowo, 2015).

2.6 Stoikiometri

Stoikiometri adalah dasar perhitungan kimia yang menyatakan relasi kuantitatif rumus rumus kimiawi suatu senyawa. Stoikiometri berasal dari dua suku kata bahasa Yunani yaitu "*toicheion*" yang berarti "unsur" dan "*metron*" yang berarti "pengukuran". Stoikiometri adalah suatu pokok bahasan dalam kimia untuk menentukan kuantitas setiap zat dalam suatu reaksi kimia (Kimia Dasar, 2015).

Rumus Empiris dan Rumus Molekuler

Rumus empiris merupakan rasio bilangan bulat paling sederhana dari jumlah mol dari masing-masing unsur dalam suatu senyawa. Rumus molekuler merupakan jumlah mol sebenarnya dari masing-masing unsur dalam 1 mol senyawa. Contohnya non-stoikiometri *cadmium telluride* memiliki rumus molekuler Cd_6Te_6 yang merupakan 6 kali rumus empirisnya $CdTe$

Rumus molekular = n × rumus empiris , n=1,2,3 dst.

Stoikiometri pada *cluster* CdTe menunjukan perbandingan atom antara Cd dan Te adalah 1, non-stoikiometri *cluster* CdTe menunjukkan pembentukan *cluster* Cd_mTe_n (m < n) (Bhattacharya & Kshirsagar, 2011).

2.7 Solar cell Capacitance Simulator (SCAPS-1D)

Perangkat lunak simulasi SCAPS-1D adalah program simulasi dalam 1 dimensi (SCAPS-1D) (Shoewu, Anuforonini, 2016). SCAPS-1D merupakan simulasi sel surya yang dikembangkan di departemen Elektronika dan Sistem Informasi (ELIS) Universitas Gent, Belgia yang disusun khusus untuk sel surya CIGS dan CdTe, namun saat ini telah digunakan untuk beberapa material lain (Ouédraogo, Zougmoré, & Ndjaka, 2013). Software ini disusun dalam beberapa jendela agar pengguna dapat mengatur parameter atau hasil yang ditampilkan. Program dibuka dengan '*action panel*', sehingga pengguna dapat mengatur suhu, tegangan, frekuensi, dan cahaya (iluminasi) serta perhitungan yang dilakukan (I-V, C-V, C-f, Q($\boldsymbol{\lambda}$)) (Burgelman, Nollet, & Degrave, 2000).

SCAPS-1D ini umumnya dikembangkan untuk perangkat film tipis polikristalin dan terutama digunakan untuk sel surya CdTe dan CIGS. Dibandingkan dengan perangkat lunak pemodelan yang lainya, SCAPS-1D memiliki jumlah terbesar pengukuran listrik AC dan DC yang dapat disimulasikan termasuk tegangan sirkuit terbuka (Voc), kepadatan arus hubung singkat (Jsc), Faktor isisi (FF%), efisiensi kuantum (QE%), spektroskopi tegangan kapasitansii C(V), Spektrokopi frekuensi kapsitansi C(f), presentase efisiensi, profil pembangkitkan dan rekombinasi, respons spektral, struktur pita energi hetero, distribusi medan listrik, kepadatan pembawa saat ini, dll. Semua pengukuran dapat dihitung dan diperoleh dalam keadaan gelap dan kondisi terang dan juga pada suhu dan pencahayaan yang berbeda. Hingga tujuh lapisan dapat ditambahkan ke struktur sel di jendela pengaturan SCAPS-1D (Khoshsirat & Md Yunus, 2013). Perangkat lunak ini merupakan program simulasi yang sangat tinggi untuk perhitungan dan pengukuran sel surya polikristalin dan film tipis (Khoshsirat, Md Yunus, Hamidon, Shafie, & Amin, 2015).

2.8 Kerangka Berfikir

Sel surya fotovoltaik merupakan devais yang mampu mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik. Sel surya menggunakan prinsip semikonduktor p-n *junction*. Semikonduktor p-n *junction* yang sering diaplikasikan sebagai sel surya adalah CdS/CdTe. CdS berperan sebagai semikonduktor tipe-n dan CdTe berperan sebagai semikonduktor tipe p dan ZnO berperan sebagai TCO. Sel surya terdiri dari beberapa lapisan utama, seperti TCO, absorber, dan *ohmic contact*. ZnO sering digunakan sebagai lapisan TCO karena termasuk material yang ramah lingkungan, ZnO juga berperan sebagai lapisan window layer sedangkan, CdTe berperan sebagai lapisan absorber, mudah dikarakterisasi untuk berbagai aplikasi industri dan harganya murah. Selain berperan sebagai semikonduktor p-n *junction*.

SCAPS-1D merupakan salah satu software yang biasa digunakan untuk pemodelan sel surya dan dirancang khusus untuk CIGS dan CdTe. Selain itu, SCAPS-1D menawarkan berbagai karakteristik pengukuran, salah staunya karakteristik I-V, effisiensi kuantum, dan koefisien absorbsi. Karakteristik I-V memberikan informasi berupa nilai tegangan dan densitas arus. Nilai lain yang dapat diketahui dari karakteristik I-V antara lain tegangan *open circuit* (Voc), arus *short circuit* (Jsc), *fill factor* (FF), dan efisiensi (η). Pengukuran koefisien absorbsi memberikan informasi tentang besarnya nilai koefisien absorbsi dan energi fonon yang ditampilkan dalam bentuk grafik hubungan panjang gelombang dengan absorbsi serta energi fonon dengan nilai koefisiensi absorbsi.

BAB V
PENUTUP

5.1 Simpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan terhadap pengaruh ketebalan dan fraksi stoikiometri menggunakan SCAPS-1D, dapat di tarik kesimpulan sebagai berikut:

1) Variasi ketebalan pada lapisan absorber CdTe dapat mempengaruhi unjuk kerja sel surya ZnO/CdS/CdTe. Semakin bertambahnya ketebalan CdTe maka, semakin meningkat pula efisiensi sel surya ZnO/CdS/CdTe. Pada ketebalan 0,6 μm nilai efisiensi 14,466% dan pada ketebalan 6 μm efisiensi sel surya mencapai 24,228%.
2) Pengaruh fraksi stoikiometri terhadap sel surya ZnO/CdS/CdTe yaitu semakin kecil nilai energi gap semakin meningkat unjuk kerja sel surya ZnO/CdS/CdTe, pada variasi yang di gunakan pada fraksi stoikiometri 0,6 dengan energi gap 1,4855 eV dan nilai efisiensi sebesar 22,900 % dan pada fraksi stoikiometri 7 dengan energi gap 1,8055 eV dengan efisiensi 15,871 %.
3) Semakin kecil ketebalan CdTe unjuk kerja dari sel surya pun semakin kecil, pada ketebalan 6 μm efisiensi sel surya mencapai 24,228%. Semakin kecil nilai energi gap semakin meningkat unjuk kerja sel surya ZnO/CdS/CdTe Pada fraksi stoikiometri 0,6 dengan energi gap 1,4855 eV dengan nilai efisiensi sebesar 22,900 %.

5.2 Saran

Pemodelan sel surya ZnO/CdS/CdTe dengan variasi ketebalan dan fraksi stoikiometri lapisan absorber CdTe menggunakan SCAPS-1D belum di lakukan secara keseluruhan karena hanya memperhatikan sifar kelistrikan dan sifat otpiknya, oleh karena itu perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait temperatur device dan *lifetime*-nya untuk memperoleh parameter optimal sel surya ZnO/CdS/CdTe.

DAFTAR PUSTAKA

Abou-Ras, Daniel, Thomas Kirchartz, & Uwe Rau. (2011). *Advanced Characterization Techniques for Thin Film Solar Cells*. Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Benigno I. (2017). *Pengaruh Optiimasi Celah Pita Energi dan Ketebalan Lapisan tipe-i pada efisiensi Sel Surya Silikon Amorf Sambungan p-i-n*. Tesis. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh November.

Bhattacharya , Somesh Kr., & Anjali Kshirsagar. (2008). First Principle Study of Free and Surface Terminated CdTe Nanoparticles. *The European Physical Journal D*, 364: 355–364.

Bhattacharya , Somesh Kr., & Anjali Kshirsagar. (2011). Defect Studies in Small CdTe Clusters. *The European Physical Journal D*, 61: 355–364.

Burgelman, M., P. Nollet, & S. Degrave. (2000). Modelling Polycrystalline Semiconductor Solar Cells. *Thin Solid Films*, 361: 527–532.

Buwarda, Sukriyah. (2019). AZTS dengan Metode Sol-Gel Sebagai Lapisan Buffer Bebas Cadmium pada Sel Surya CZTS AZTS. *Jurnal Keteknikan dan Sains (JUTEKS) – LPPM UNHAS*, 1(3): 80–86.

Cingoski, Vlatko, & B. Petrevska. (2017). Flexible Textile Photovoltaics: Application of New Generation in Tourism. *Journal of Applied Economics and Business*, *5*(4): 1–18.

Devamani, R.Hepzi Pramia, R.Kiruthika, P.Mahadevi, dan S.Sagithapriya. (2017). Synthesis and Characterization of Cadmium Sulfide Nanoparticles, *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, *4*(1): 181–185.

Dharmadasa I.M.. (2012). *Advances in Thin-Film Solar Cells*. Francis: CRC Press Taylor & Francis Group. International Standard Book Number-13: 978-9-81436-412-6.

Dzulfikar, Dafi, dan Wisnu Broto. (2016). Optimalisasi Pemanfaatan Energi Listrik Tenaga Surya Skala Rumah Tangga. *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal)*, V, 73–76.

Fadliodi, Budiyanto, & Haris Isyanto. (2018). Simulasi Karakteristik Listrik dari Sel Surya yang Terhubung Secara Pararlel dan Pengujiannya Secara Eksperimen. *Jurnal UMJ – Seminar Nasional Sains dan Teknoogi*. 1-6. e-ISSN : 2460 – 8416.

Fardi, Hamid, & Fatima Buny. (2013). Characterization and Modeling of CdS/CdTe Heterojunction Thin-Film Solar Cell for High Efficiency Performance. *International Journal of Photoenergy*, Volume 2013: 1-6.

Fatiatun. 2015. *Pengaruh Suhu Deposisi terhadap Sifat Fisis Seng Oksida Doping Galium Oksida dengan Metode DC Magnetron Sputtering*. Skripsi. Semarang: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang.

Fistiani, Maya Dwi, Fahru Nurosyid dan Risa Suryana. 2017. Pengaruh Komposisi Campuran Antosianin-Klorofil sebagai Fotosensitizer terhadap Efisiensi Dye Sensitized Solar Cell. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*. Vol. 12, No. 1: 19-22.

Gloeckler, M., A. L. Fahrenbruch, and J. R. Sites. (2003). Numerical Modeling of CIGS and CdTe Solar Cells: Setting The Baseline. *Proceddings of The 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 491–494.

Guo, Hongliang, Qiang Sun, & Yiyong Wu. (2019). Simulation of solar cells by delocalized recombination model and its applications. *Solar Energy*, 181: 83–87.

Hadi, Syamsul, Putut Marwoto, & Ngurah Made D.P. (2013). Deposisi dan Karakterisasi Film Tipis CdSCdTe:Cu yang Ditumbuhkan dengan Metode DC Magnetron Sputtering. *Unnes Physics Journal*, *2*(1): 44–50.

Hasan, Hasnawiya. (2012). Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya. *Jurnal Riset dan Teknologi Kelautan*, 10 (2): 169–180.

Julisman, Andi, Ira Devi Sara, & Ramadhan Hardi Sinegar. (2017). Prototipe Pemanfaatan Panel Surya Sebagai Sumber Energi Pada Sistem Otomasi

Stadion Bola. *Karya Ilmiah Teknik Elektro*, *2*(1): 35–42.

Kartopu, G., D. Turkay, C. Ozcan, W. Hadibrata, P. Aurang, S.Yerci, H.E. Unalan, V. Barrioz, Y. Qu, L. Bowen, A.K Gurlek, P. Malello, R. Turan, & S.J.C. Irvine. (2018). Photovoltaic Performance of CdS/CdTe Junctions on ZnO Nanorod Arrays. *Solar Energy Materials and Solar Cells Journal*, 176: 100–108.

Khan, N. A., K.S. Rahman, K.A. Aris, A.M. Ali, H. Misran, M. Akhtaruzzaman, S.K. Tiong, & N. Amin. (2018). Effect of Laser Annealing on Thermally Evaporated CdTe Thin Films for Photovoltaic Absorber Application. *Solar Energy*, 173: 1051–1057.

Khoshsirat, Nima, & Nurul Amziah Md Yunus. (2013). Numerical Simulation of CIGS Thin Film Solar Cells Using SCAPS-1D. *IEEE Conference on Sustainable Utilization abd Development in Engineering and Tyechnology*, 63–67.

Khoshsirat, Nima, Nurul Amziah Md Yunus, Mohdi Nizar Hamidon, Suhaidi Shafie, & Nowshad Amin. (2015). Analysis of Absorber Layer Properties Effect on CIGS Solar Cell Performance using SCAPS. *Optik Journal*, *126*(7–8): 681–686.

Khosroabadi, S., S.H. Keshmiri, & S. Marjani. (2014). Design of a High Efficiency CdS/CdTe Solar Cell with Optimized Step Doping, Film Thickness, and Carrier Lifetime of The Absorption Layer. *Journal Europ. Opt. Soc. Rap*, 14052: 1–6.

Kulkarni, R., S. Rondiya, A. Pawbake, R. Waykar, &. A. Jadhavar. (2017). Structural and Optical Properties of CdTe Thin Films Deposited using RF Magnetron Sputtering. *Energy Procedia*, 110: 188–195.

Letsoin, F. H. S. & Y. (2012). Analisa Dan Estimasi Radiasi Konstan Energi Matahari Melalui Variasi Sudut Panel Fotovoltaik SHS 50 WP. *Jurnal Ilmiah Mustek Anim Ha*, 1(1).

Martawati, M. (2018). Intensitas Cahaya Terhadap Daya Dari Panel Surya. *Jurnal ELTEK*, 16: 125–136.

Marwoto, Putut, Sujarwata, & Ngurah Made D.P (2014). *Karakterisasi Film Tipis: Teori dan Analisis Hasil Deposisi Film Tipis*. Semarang: Universitas Negeri Semarang.

Mc Meekin, David P, Golnaz Sadoughi, Waqaas Rachman, Giles E Eperon, Michael Saliba, Maximillian T Hörantner, Amir Haghighirad, Nobuya Sakai, Lars Korte, Bernd Rech, michael B Johnston, Laura M Herz, dan Henryj Snaith. 2016. A Mixed-Cation Lead Mixed-Halide Perovskite Absorber For Tandem Solar Cell. *Research Reports*, Vol. 351: 151-156

Messenger, Roger, & Amir Abtahi. (2017). *Fourth Edition Photovoltaic Systems Engineering*. Francis: CRC Press, Taylor & Francis Group. International Standard Book Number-13: 978-1-4987-7277-8

Mintorogo, D. S. (2000). Strategi Aplikasi Sel Surya (Photovoltaic Cells) Pada Perumahan Dan Bangunan Komersial. *Jurnal Teknik Arsitektur*, 28(2): 129–141.

Mohamed A. (2014). Influence of The Optical and Recombination Losses on The Eficiency of CdS/CdTe Solar Cell at Ultrathin Absorber Layer. *J. Phys*, 92: 1350-1355.

Murtafiatin, R. (2018). *Pemodelan Sel Surya Film Tipif ZnO/CdS/CdTe menggunakan AFORS-HET: Pengaruh Ketebalan CdTe dan Temperatur Tehadap Performansi Sel Surya*. Skripsi. Semarang: Universitas Negeri Semarang.

Nugraha, S. (2016). *Indonesia Energi Outlook 2016*. Jakarta : DEN (Sekretariat Jendral Dewan Energi Nasional). ISSN 2527-3000.

Oktaviani, Yolanda, & Astuti. (2014). Sintesis Lapisan Tipis Semikonduktor dengan Bahan Dasar Tembaga (Cu) Menggunakan Chemical Bath Deposition. *Jurnal Fisika Unand*, 3(1): 53–58.

Ouédraogo, S., F. Zougmoré, & J.M. Ndjaka. (2013). Numerical Analysis of Copper-Indium-Gallium-Diselenide Based Solar Cells by SCAPS-1D. *International Journal of Photoenergy*, volume 2013: 1-9.

Paudel, N. R., K.A. Wieland, A.D. & Compaan. (2012). Ultrathin CdS/CdTe

Solar Cells by Sputtering. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 105: 109–112.

Peköz, R. & Sakir Erkoc. (2009). A Density Functional Theory Study on The Structures and Energetics of Cd_mTe_n Clusters (m+n≤6). *Computatipnal materials Science*. 45: 912–920.

Puspitaningrum, T. 2017. *Penentuan Band Gap dan Konduktivitas Bahan Semikoduktor Lapisan Tipis Sn($S_{0,8}Te_{0,2}$) Hasil Preparasi dengan Teknik Evaporasi Termal*. Skripsi. Yogyakarta: FMIPA UNY.

Razykov, T. M., N. Amin, M. Alghoul, & B. Ergashev. (2016). Effect of the Composition on Physical Properties of CdTe Absorber Layer Fabricated by Chemical Molecular Beam Deposition. *Journal of Applied Physics*, 49.1: 35–39.

Rusman. (2015). Pengaruh Variasi Beban Terhadap Efisiensi Solar Cell. *Turbo*, 4(2): 84.

Sarkar, K., S. Mitra, M. Das, C. Mitra, A. Choudhury, & S. Roy. (2018). Optimization of The Window Layer in CdTe Solar Cell. *Optronix* , 1–3.

Sharafat, M., K. Sajedur, M. Rezaul, M. Omer, M. Ahmad, M. Ali, & Misran, H. (2019). Impact of CdTe Thin Film Thickness in $Zn_xCd_{i-x}S$/ CdTe Solar Cell by RF Sputtering. *Solar Energy*, 180: 559–566.

Shodiq, J. (2017). *Simulasi Performanasi Photovoltaics Berbahan Nanokristalin Sno$_2$*. Skripsi. Malang: Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

Shoewu, Anuforonini, & Duduyemi. (2016). Simulation Of The Performance Of CdTe/CdS/ZnO Multi-Junction Thin Film Solar Cell. *Review of Information Engineering and Applications*, *3*(1), 1–10.

Sim, J. K., Dae-Young Um, Jong-Woong Kim, Jin-Soo Kim, Kwang-Un Jeong, & Cheul-Ro Lee. (2019). Improvement in The Performance of CIGS Solar Cells by Introducing GaN Nanowires on The Absorber Layer. *Journal of Alloys and Compounds*, 779: 643-647.

Sinaga, P. (2009). Pengaruh Temperatur Annealing Terhadap Struktur Mikro, Sifat Listrik Dan Sifat Optik Dari Film Tipis Oksida Konduktif Transparan

Zno:Al Yang Dibuat Dengan Teknik Screen Screen Printing. *Jurnal Pengajaran MIPA*, 14(2): 51–59.

Stechmann, G., Stefan Z., Peter K., Dierk R., Christina G., Lukas K., Julian P., Stephan B., & Ayodhya N.T. (2016). Solar Energy Materials & Solar Cells 3-Dimensional Microstructural Characterization of CdTe Absorber Layers from CdTe / CdS Thin Film Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 151: 66–80.

Suriadi, & Mahdi Syukri. (2010). Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terpadu Menggunakan Software PVSYST Pada Komplek Perumahan di Banda Aceh. *Jurnal Rekayasa Elektrika*, 94(2): 77-80.

Sutanto, H., & Singgih Wibowo. (2015). *Semikonduktor Fotokatalis Seng Oksida dan Titania (Sintesis, Deposisi, dan Aplikasi).* Semarang: Telescope. ISBN : 978-602-735-620-7.

Swanson, Drew E, Russel M Geisthardt, J Tyler McGoffin, John D Williams, dan James R Sites. (2013). Improved CdTe Solar-Cell Performance by Plasma Cleaning The TCO Layer. *IEE Journal of Photovoltaics*. Vol. 3, No. 2: 838-842.

Tariq, G. H., & M. Anis-urrehman. (2014). Annealing Effects on Physical Properties of Doped CdTe Thin Films for Photovoltaic Applications. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 1–7.

Thakur, Dharmendra, Amit A., Abhishek D., & E.V.V. Ramanamurthy. (2016). A Review on Immersion System to Increase The Efficiency of Solar Panels. *Internationan Journal Of Advanced Research*, 4: 312-325.

Wardani, A. K. (2016). *Analisis Perilaku Difusi dan Rapat Arus Sel Surya Multijunction Smikonduktor Golongan III-V terhadap keteebalan Susunan Sel*. Tesis. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya.

Xiang, H. J., B. Huang, E. Kan, S-Huai Wei, & X. G. Gong. (2013). Towards Direct-Gap Silicon Phases by the Inverse Band Structure Design Approach. *Phisical Reviiew Letters*, 118702: 13–16.

Yuliananda, S., & Sarya, G. (2015). Pengaruh perubahan intensitas matahari terhadap daya keluaran panel surya. *Jurnal Pengabdian LPPM Untag*

Surabaya, 01(02): 193–202.

Zia, R., Saleemi, F., & Nassem, S. (2016). Optik Optical properties of thermally evaporated CdTe thin films by varying substrate temperature. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 127(4): 1972–1974.