TUGAS AKHIR - SF 184801

SIMULASI SEL SURYA PEROVSKITE DENGAN PENAMBAHAN *DOUBLE LAYER CsI-PEROVSKITE*

IQBAL DONNY RACHMADHANA
NRP 01111740000057

Dosen Pembimbing
Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng.

Departemen Fisika
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2021

TUGAS AKHIR - SF 184801

SIMULASI SEL SURYA PEROVSKITE DENGAN PENAMBAHAN *DOUBLE LAYER CsI-PEROVSKITE*

IQBAL DONNY RACHMADHANA
NRP 01111740000057

Dosen Pembimbing
Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng.

Departemen Fisika
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2021

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

FINAL PROJECT - SF 184801

PEROVSKITE SOLAR CELL SIMULATION WITH THE ADDITION OF DOUBLE LAYER CsI-PEROVSKITE

IQBAL DONNY RACHMADHANA
NRP 01111740000057

Dosen Pembimbing
Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng.

Department of Physics
Faculty of Science and Data Analytics
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2021

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

SIMULASI SEL SURYA PEROVSKITE DENGAN PENAMBAHAN *DOUBLE LAYER CsI-PEROVSKITE*

LAPORAN TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Syarat dalam Memperoleh Gelar
Sarjana Sains pada:
Program Sarjana Departemen Fisika
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:
IQBAL DONNY RACHMADHANA
01111740000057

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir

Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng.
NIP. 19690904 199203 1 003

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS SAINS DAN ANALITIKA DATA
DEPARTEMEN FISIKA

SURABAYA,
JULI 2021

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

SIMULASI SEL SURYA PEROVSKITE DENGAN PENAMBAHAN *DOUBLE LAYER CsI-PEROVSKITE*

Nama : Iqbal Donny Rachmadhana
NRP : 01111740000057
Departemen : Fisika, FSAD ITS
Pembimbing : Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng.

Abstrak

Sel surya sangat banyak menarik perhatian peneliti untuk terus meningkatkan efisiensi dan stabilitas pada pembuatannya untuk dapat memasok kebutuhan energi yang semakin tinggi. Salah satu material yang dapat menghasilkan efisiensi dan stabilitas tinggi adalah material perovskite. Material perovskite merupakan material semikonduktor yang dapat menghasilkan efisiensi dan stabilitas yang tinggi dengan biaya fabrikasi yang relatif rendah. Metode penambahan double layer pada sel surya perovskite dilakukan untuk dapat meningkatkan efisiensi dan stabilitas yang dengan menggunakan penambahan lapisan CsI pada permukaan perovskite aktif sel surya perovskite. Penambahan double layer CsI optimum pada atas-bawah, atas dan bawah lapisan perovskite. Penambahan lapisan CsI pada perovskite aktif berpengaruh pada peningkatan ukuran grain pada struktur kristal lapisan perovskite yang mana hal ini memudahnya proses eksitasi muatan pada material perovskite. Sehingga dari penelitian tersebut dibuatkan simulasi tentang double layer CsI-Perovskite pada sel surya perovskite dengan menggunakan simulasi fotovoltaik dengan software General-purpose Photovoltaic Device Model (GPVDM). Simulasi yang dilakukan menghasilkan nilai Power Conversion Efficiency (PCE) tertinggi pada penambahan double layer CsI/Perovskite/CsI dengan nilai efisiensi sebesar 18,04% yang mana hasil simulasi ini mendekati hasil yang dapatkan pada proses fabrikasi double layer CsI - Perovskite sel surya.

Kata kunci: efisiensi, double layer, sel surya perovskite, semikonduktor, simulasi.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PEROVSKITE SOLAR CELL SIMULATION WITH THE ADDITION OF DOUBLE LAYER CsI-PEROVSKITE

Name : Iqbal Donny Rachmadhana
NRP : 01111740000057
Major : Physics, FSAD ITS
Advisor : Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng.

Abstract

Solar cells are very much attracting the attention of researchers to continue to improve efficiency and stability in their manufacture to be able to supply increasingly higher energy needs. One of the materials that can produce high efficiency and stability is perovskite material. Perovskite material is a semiconductor material that can produce high efficiency and stability with relatively low fabrication costs. The method of adding a double layer to perovskite solar cells is carried out to increase efficiency and stability by using the addition of a CsI layer on the perovskite surface of active perovskite solar cells. The value of the addition of the CsI double layer is optimum at the top - bottom, top and bottom of the perovskite layer. The addition of a CsI layer on the active perovskite has an effect on increasing the grain size of the crystal structure of the perovskite layer which makes it easier for the charge excitation process on the perovskite material. So from this research, a simulation of the CsI-Perovskite double layer on perovskite solar cells was made using photovoltaic simulation with General-purpose Photovoltaic Device Model (GPVDM) software. The simulations carried out resulted in the highest Power Conversion Efficiency (PCE) value in the addition of a CsI/Perovskite/CsI double layer with an efficiency value of 18.04% which is close to the results obtained in the double layer CsI - Perovskite solar cell fabrication process.

Keywords: efficiency, double layer, perovskite solar cell, semiconductor, simulation.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul:

SIMULASI SEL SURYA PEROVSKITE DENGAN PENAMBAHAN *DOUBLE LAYER CsI-PEROVSKITE*

sebagai salah satu persyaratan akademik dalam menyelesaikan program studi sarjana di Departemen Fisika Fakultas Sains dan Analitika Data Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Terselesaikannya Tugas Akhir ini juga tidak terlepas dari peran dan bimbingan, serta dukungan dari berbagai pihak, sehingga pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, yakni Bapak Rachman Hakim dan Ibu Tirna, serta saudara dan saudari penulis yakni Rabbani Zein Rachmadhinof dan Nur Firza Rachma Nabila yang senantiasa memberikan dukungan moral dan spiritual dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang senantiasa memberikan arahan, kritik, saran, serta dukungan dan kesabaran selama membimbing penulis.
3. Bapak Endarko M. Si., Ph.D. Selaku dosen wali penulis yang senantiasa memberikan arahan, nasehat dan dukungan kepada penulis selama penulis menempuh pendidikan sarjana di Departemen Fisika FSAD ITS.
4. Dr. Suyatno M.Si., Bapak Heru Sukamto, M.Si. dan Ibu Linda Silvia, M.Si. selaku penguji yang telah memberikan masukan dan saran selama sidang tugas akhir.
5. Bapak/Ibu dosen di yang selalu memberikan pengetahuan dan dukungan kepada mahasiswa, serta Bapak/Ibu dosen dan karyawan di Departemen Fisika FSAD ITS yang telah memberikan ilmu dan dan membantu penulis selama

menempuh pendidikan sarjana di Departemen Fisika FSAD ITS.

6. Teman-teman satu bimbingan Tugas Akhir, yakni Maria Stella Widya yang telah berjuang bersama dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
7. Mas, Mbak serta teman-teman Laboratorium Optoelektronika dan Elektromagnetika Terapan terkhusus kepada Mas Dittho, Mas Edwin dan Mba Cucu yang saling berbagi ilmu dan membantu penulis penyelesaian tugas akhir.
8. Teman dekat penulis Afandi, Amru, Arsy, Faisal, Thoriq, Radit, dan Windi yang selalu berbagi keresahan bersama juga seluruh teman-teman dekat penulis yang selalu memberikan dukungan dan semangat kepada penulis selama kuliah.
9. Claravia Adhyne selaku seseorang yang selalu mendengarkan keresahan dan selalu memberikan dukungan positif kepada penulis.
10. Teman-teman Fisika ITS, khususnya Deutron 2017 atas segala bantuan, dukungan dan semangat yang sangat berguna bagi penulis.
11. Semua pihak yang terlibat dan membantu penulis dalam penyelesaian Tugas Akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih banyak kekurangan. Oleh sebab itu, penulis mengharapkan kritik dan saran agar dapat digunakan sebagai perbaikan pada penelitian selanjutnya. Semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak yang terlibat.

Surabaya, 02 Juli 2021

Penulis
Iqbal D. Rachmadhana

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN v
Abstrak vii
Abstract ix
KATA PENGANTAR xi
DAFTAR ISI xiii
DAFTAR GAMBAR xvi
DAFTAR TABEL xx
BAB I 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 4
1.3 Tujuan 4
1.4 Batasan Masalah 4
1.5 Manfaat Penelitian 5
1.6 Sistematika Penulisan 5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 7
2.1 Sel Surya 7
2.2 Semikonduktor pada Sel Surya 8
2.3 Sistem Kerja Sel Surya 13
2.4 Parameter Utama dalam Sel Surya 15
2.4.1 Tegangan hubung terbuka *(open-circuit voltage)* 15
2.4.2 Arus hubung pendek *(short-circuit current)* 16
2.4.3 Faktor pengisian *(fill factor)* 16

2.4.4 Konversi efisiensi daya *(Power Conversion Efficiency PCE)* 17
2.5 Sel Surya Perovskite 17
2.6 Material Perovskite 19
2.7 Material *Caesium Iodide (CsI)* 22
2.8 Simulasi dengan perangkat lunak *General – Purpose Photovoltaic Device Model (GPVDM)* 22
BAB III METODOLOGI 27
3.1 Diagram Alir Penelitian 27
3.2 Studi Literatur 28
3.3 Penentuan Lapisan 28
3.3.1 Penentuan Susunan Ketebalan Optimal pada Sel Surya Perovskite 29
3.3.2 Penentuan *Double-Layers* Perovskite 30
3.4 Penentuan Parameter 31
3.5 Pengambilan Data 32
3.5 Analisis Data 33
BAB IV ANALISI DATA DAN PEMBAHASAN 34
4.1 Simulasi Sel Surya Perovskite 34
4.1.1 Desain Susunan Lapisan Sel Surya Perovskite 34
4.1.2 Pengaruh Ketebalan pada Lapisan Sel Surya Perovskite 36
4.1.3 Hasil Simulasi Elektrik pada Sel Surya Perovskite 37
4.1.4 Hasil Simulasi Optik pada Sel Surya Perovskite 42
4.2 Simulasi *Double Layer* CsI – Perovskite pada Sel Surya Perovskite 46

4.2.1 Desain Susunan *Double Layer* Lapisan Sel Surya Perovskite 47
4.2.2 Pengaruh Penambahan *Double Layer* Perovskite – CsI pada Lapisan Sel Surya Perovskite 48
4.3 Perbandingan Hasil Simulasi GPVDM dengan Hasil Fabrikasi pada Sel Surya Perovskite 53
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 58
5.1 Kesimpulan 58
5.2 Saran 58
DAFTAR PUSTAKA 60
LAMPIRAN 64
BIODATA PENULIS 67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Energi band pada material konduktor, isolator dan semikonduktor (Ossila, 2021) 9
Gambar 2. 2 Operasi data terjadinya aliran listrik pada perangkat sel surya (Ossila, 2021).....10
Gambar 2. 3 Operasi data terjadinya aliran listrik pada perangkat sel surya (Ossila, 2021).....11
Gambar 2. 4 Hubungan antara nilai normalisasi iradiasi spectral dan fluks foton terhadapat Panjang gelmbang (Ossila, 2021). 12
Gambar 2. 5 Proses eksitasi dan pemisahan muatan pada sel surya (Wã, n.d.) 13
Gambar 2. 6 Rangkaian dan prinsip kerja dari perangkat sel surya (Villalva et al., 2009) 14
Gambar 2. 7 Karakteristik output perangkat sel surya (I-V) (Lun et al., 2013) 15
Gambar 2. 8 Konfigurasi susunan lapisan sel surya (Snaith, 2013) 17
Gambar 2. 9 Skema transportasi muatan pada lapisan sel surya perovskite (Hu et al., 2014).....18
Gambar 2. 10 Struktur Geometri Perovskite (Snaith, 2013) 20
Gambar 2. 11 Peta struktur material perovskite ABX3 (Li et al., 2004) 21
Gambar 2. 12 Jendela tampilan software GPVDM 22
Gambar 2. 13 Proses generation rate dan recombination rate dari pasangan electron-hole (a) kondisi pada suhu ruang (b) kondisi di bawah penyinaran foton (Sze and Lee, 2012). 24
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.....27
Gambar 3. 2 Tampilan user interface software General-purpose Photovoltaic Device Model (GPVDM) 28
Gambar 3. 3 Susunan lapisan sel surya perovskite pada simulasi GPVDM (a) sel surya perovskite tanpa CsI (b) sel surya perovskite CsI/Perovskite/CsI (c) sel surya

perovskite CsI/Perovskite (d) sel surya perovskite Perovskite/CsI 29
Gambar 4. 1 Tampilan skema sel surya perovskite dengan menggunakan *software* GPVDM 35
Gambar 4. 2 Tampilan ukuran susunan lapisan sel surya perovskite dengan menggunakan *software* GPVDM 35
Gambar 4. 3 Grafik Karakteristik I-V dari Sel Surya Perovskite pada 300 K 38
Gambar 4. 4 Grafik Karakteristik J -V dari Sel Surya Perovskite pada 300 K 38
Gambar 4. 5 Grafik variasi densitas muatan total dari Sel Surya Perovskite pada 300 K 41
Gambar 4. 6 Grafik densitas muatan berlebih dalam kesetimbangan dari Sel Surya Perovskite pada 300 K..... 41
Gambar 4.7 Spektrum Intensitas Cahaya yang Masuk pada Lapisan Sel Surya Perovskite 43
Gambar 4. 8 Spektrum Foton yang diserap pada Lapisan Sel Surya Perovskite dengan penambahan *double layer CsI* diatas dan bawah lapisan perovskite 44
Gambar 4. 9 Spektrum Tingkat Energi dari Sel Surya Perovskite Distribusi Densitas Foton pada penambahan double layer CsI diatas dan bawah lapisan perovskite 45
Gambar 4. 10 Generation Rate Pergerakan Pembawa Muatan pada Lapisan Ketebalan Material Perovskite pada penambahan double layer CsI diatas dan bawah lapisan perovskite 46
Gambar 4.11 Tampilan ukuran susunan lapisan sel surya perovskite double layer dengan menggunakan software GPVDM 47
Gambar 4. 12 Grafik pengaruh penambahan *double layer CsI* pada simulasi dengan *software* GPVDM 51
Gambar 4. 13 Diagram indikasi perubahan struktur kristal pada permukaan perovskite aktif dengan penambahan lapisan CsI (Wang et al., 2021)..... 52

Gambar 4. 14 Grafik perbandingan hasil PCE double layer sel surya perovskite yang dilakukan dengan Simulasi GPVDM dan fabrikasi 55

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Parameter ketebalan simulasi sel surya perovskite.....30
Tabel 3. 2 Parameter umum simulasi sel surya perovskite.....31
Tabel 3. 3 Parameter elektrik simulasi sel surya perovskite.....32
Tabel 4. 1 Parameter elektrik hasil simulasi pengaruh ketebalan perovskite.....36
Tabel 4. 2 Parameter elektrik hasil simulasi double layer CsI di atas pada lapisan perovskite. 48
Tabel 4. 3 Parameter elektrik hasil simulasi double layer CsI di bawah pada lapisan perovskite.....49
Tabel 4. 4 Parameter elektrik hasil simulasi double layer CsI di atas dan bawah pada lapisan perovskite.....49
Tabel 4. 5 Hasil Parameter Fotovoltaik pada Simulasi Double Layer CsI Sel Surya Perovskite 54
Tabel 4. 6 Hasil Parameter Fotovoltaik pada Fabrikasi Double Layer CsI Sel Surya Perovskite 54

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Semakin berkembangnya zaman, tingkat kebutuhan energi semakin tinggi dan tiap negara terus berinovasi agar kebutuhan energi dapat tercukupi. Hingga saat ini tiap negara masih sangat gencar dalam pembangunan pembangkit sumber energi baru terbarukan (EBT). Menurut Badan Energi Internasional (IEA) saat ini sumber energi baru terbarukan menyumbang 26% dari listrik dunia tercatat pada tahun 2020 dan diperkirakan dapat mencapai 30% pada tahun 2024 (Mardatila Ani, 2020).

Dalam investigasi yang dilakukan oleh *World Energy Resources* populasi penduduk dunia akan mencapai 8.1 triliun pada tahun 2020, dan kebutuhan energi dunia diperkirakan mencapai 17208 Mtoe pada tahun 2020 lalu (World Energy, 2016). Sedangkan pembangkit energi konvensional seperti minyak, gas dan batubara diperkirakan akan habis masing-masing setelah 35 tahun, 37 tahun dan 107 tahun yang akan datang (Shafiee and Topal, 2009).

Sejak dimulai pada tahun 2018 Indonesia mengejar pengembangan pembangkit yang berfokus pada energi baru terbarukan (EBT). Berdasarkan data yang telah terverifikasi hingga pada Juni 2020 lalu, pembangkit EBT menyumbang energi sebesar 14,69% atau 10.467 Mega Watt (MW) dari total kapasitas terpasang. (Pribadi Agung, 2020)

Salah satu EBT adalah pemanfaatan energi panas matahari (energi surya) sebagai alternatif untuk mengatasi kebutuhan energi yang sangat tinggi. Energi panas matahari memiliki jumlah yang tidak terbatas dan dalam pemanfaatannya tidak menimbulkan polusi yang dapat merusak lingkungan. Sinar matahari yang dikonversi menjadi listrik dengan menggunakan teknologi sel surya atau disebut fotovoltaik dan saat ini di Indonesia dikenal dengan sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) (ESDM, 2012).

Pertama kali pembuatan teknologi sel surya sebenarnya sudah cukup lama ada didunia. Pertama kalinya sel surya di fabrikasi dilakukan pada tahun 1954 dengan memanfaatkan *single silicon crystal* yang dilakukan di Laboratorium Bell. Pencapaian efisiensi konversi energi sel surya pertama ini mencapai 6% (Chapin, 1954). Mulai saat itulah perkembangan teknologi sel surya semakin berkembang hingga saat ini. Sel surya dapat difabrikasi dengan berbagai macam cara, salah satunya dengan menentukan material yang dapat menghasilkan nilai efisiensi konversi energi yang tinggi. Salah satu material yang saat ini sedang ramai diperbincangkan dalam fabrikasi sel surya yang menghasilkan nilai efisiensi yang tinggi yaitu material *Perovskite* yang merupakan salah satu material yang dapat menghasilkan energi yang cukup tinggi hingga mencapai tingkat efisiensi sel suryanya mencapai 25% (Wang et al., 2020).

Material *Perovskite* ini mulai menarik perhatian sebagian material untuk memfabrikasi sel surya dimulai ketika pada tahun 2012, *Nature* menerbitkan sebuah artikel tentang sel surya dengan material *perovskite* yang tingkat efisiensi energinya mencapai lebih dari 10%. Sejak saat itulah mulai banyak menarik perhatian pemanfaatan material *perovskite* dalam fabrikasi sel surya karena mencapai kinerja yang tinggi dan biaya fabrikasi yang rendah sehingga berpotensi besar untuk dikomersialkan (Snaith, 2013). Secara umum struktur sel surya *perovskite* terdari lima lapisan, masing-masing lapisan tersebut adalah lapisan logam katoda, lapisan *hole transporting material (HTM)*, lapisan *perovskite*, lapisan *electron transporting material (ETM)*, dan lapisan anoda (FTO/ITO).

Prinsip kerja pada masing-masing lapisan sel surya yaitu lapisan *perovskite* pada struktur sel surya digunakan sebagai penyerap cahaya pada perangkat tempat terjadinya eksitasi foton. Selanjutnya *electron* dan *hole* yang dihasilkan dalam proses eksitasi tersebut akan dipisahkan dan ditransfer masing-masing pada lapisan *ETM* dan lapisan *HTM* . Karena material *perovskite* memiliki karakteristik ambipolar atau pergerakan *electron* dan *hole*

yang berlawanan arah menghasilkan mobilitas yang tinggi baik *electron* maupun *hole.* Fungsi dari lapisan *ETM* adalah untuk dapat mengekstrak dan mentransfer *electron* dan memblokir *hole*. Sedangkan fungsi dari lapisan *HTM* digunakan untuk sebaliknya yaitu mentransfer *hole* dan memblokir *electron.* Hal ini menjelaskan bahwa mobilitas *electron* akan tinggi pada lapisan *ETM* dan mobilitas *hole* akan tinggi pada lapisan *HTM.* Sehingga dalam lapisan-lapisan sel surya diperlukan *band offsets* yang tinggi antara lapisan *ETM / Perovskite / HTM* agar dapat menghasilkan nilai efisiensi yang tinggi. Agar perangkat sel surya dapat menghasilkan nilai efisiensi yang tinggi terdapat beberapa hal yang perlu dimengerti antara proses yang menguntungkan dan merugikan dalam suatu konversi energi yang berupa eksitasi foton, transportasi *electron* dari lapisan *perovskite* ke lapisan *ETM* dan transportasi *hole* dari lapisan *perovskite* ke lapisan *HTM* (Marchioro et al., 2014).

Sehingga dari proses tersebut pengaruh dari masing-masing lapisan sangatlah dipertimbangkan agar dapat mencapai tingkat efisiensi yang tinggi. Lapisan-lapisan pada sel surya tersebut perlu dilakukan peninjauan yang lebih dalam lagi sehingga dapat diketahui bagaimana membuat lapisan-lapisan sel surya agar dapat menghasilkan tingkat efisiensi dan stabilitas yang tinggi dengan meninjau pada ketebalan lapisan dan material *perovskite* itu sendiri. Sehingga dalam kasus sel surya dengan material *perovskite* ini akan dilakukan simulasi dan perumusan lapisan sel surya *perovskite* agar dapat menghasilkan nilai efisiensi dan stabilitas yang paling tinggi dengan menggunakan variasi pada ketebalan lapisan *perovskite* dan penambahan *double-layer* pada lapisan material *perovskite.* Merujuk dari penelitian Kumar Mishra dkk yang melakukan penelitian tentang analisis elektrik-optik dari sel surya perovskite dengan menggunakan simulasi fotovoltaik *GPVDM*. Serta masih terdapat beberapa hal menarik yang belum dibahas dari jurnal tersebut yang akan disampaikan pada Tugas Akhir ini oleh penulis. Simulasi yang digunakan dalam tugas akhir ini dalam menganalisis dan merumuskan nilai efisiensi lapisan sel

surya yaitu dengan menggunakan *software* simulasi *General-purpose Photovoltaic Device Model (GPVDM).* (Kumar Mishra and Shukla, 2020)

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan diselesaikan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana susunan lapisan sel surya perovskite agar dapat menghasilkan nilai efisiensi dan stabilitas yang tinggi?
2. Bagaimana pengaruh yang disebabkan dari penambahan *double-layer* pada susunan dari lapisan sel surya?
3. Bagaimana perbandingan antara hasil simulasi dan fabrikasi?

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan susunan lapisan sel surya perovskite yang dapat menghasilkan nilai efisiensi dan stabilitas tertinggi.
2. Membandingkan pengaruh dari pemberian *double-layer* pada susunan lapisan sel surya perovskite.
3. Menentukan ketelitian hasil data simulasi dengan fabrikasi.

1.4 Batasan Masalah

Berdasarkan pada rumusan masalah yang ada, maka penelitian ini dibatasi pada:

1. Penelitian ini berfokus pada simulasi sel surya perovskite planar untuk mencapai efisiensi dan stabilitas tinggi.
2. Pembuatan model simulasi sel surya perovskite ini menggunakan *software General-Purpose Photovoltaic Device Model (GPVDM)*.

Model simulasi dilakukan dengan menggunakan luasan lapisan sel surya sebesar 0.09 cm^2, intensitas cahaya 100 mW/cm^2 (AM 1.5), pengukuran tegangan dilakukan pada rentang (-0.2) eV sampai 1.2 eV, dan kelembapan lingkungan 300 K.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah memberikan rujukan penelitian dalam aspek fabrikasi pada sel surya perovskite, memberikan pengetahuan penentuan susunan lapisan sel surya daya yang dihasilkan memiliki nilai efisiensi dan stabilitas yang tinggi. Selain itu, agar dapat membantu penentuan fabrikasi sel surya dengan material perovskite dan susunan lapisan agar mampu mencapai efisiensi yang lebih tinggi sebagai penunjang pembangunan Energi Baru Terbarukan (EBT).

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan proposal tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

BAB I : **Pendahuluan**

Bab Pendahuluan ini berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II : **Tinjauan Pustaka**

Bab tinjauan pustaka berisi tentang. tentang beberapa materi penunjang untuk melakukan penelitian ini, seperti materi tentang sel surya, prinsip sel surya, semikonduktor, perovskite dan materi yang mendasari tentang simulasi yang digunakan.

BAB III : **Metodologi**

Bab Metodologi berisi tentang metode yang digunakan dalam penelitian ini.

BAB IV : **Analisa dan Pembahasan**

Bab Pembahasan ini berisi inti dari penulisan laporan tugas akhir tentang simulasi sel surya perovskite yang dilakukan.

BAB V : **Kesimpulan dan Saran**

Bab Penutup ini berisi kesimpulan umum dari hasil analisa dan disertai saran yang berlaku bagi penelitian selanjutnya.

LAMPIRAN :Lampiran berisi beberapa gambar penunjang penelitian.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

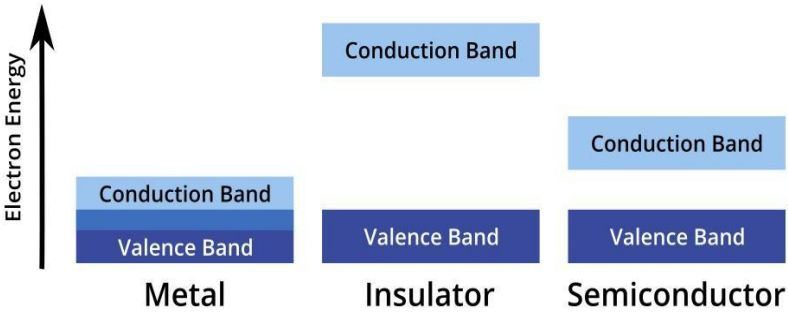
2.1 Sel Surya

Berdasarkan data yang telah terverifikasi hingga pada bulan Juni 2020 lalu, pemerintah Indonesia mulai terfokus pada pengembangan pembangkit pada Energi Baru Terbarukan (EBT) yang bermula dari tahun 2018 dan telah tercatat pemanfaatan EBT menyumbang energi sebesar 14,69% atau 10.467 Mega Watt (MW) dari total pembangkit yang telah terpasang (Pribadi Agung, 2020). Salah satu pemanfaatan EBT adalah pemanfaatan energi panas matahari (energi surya) sebagai alternatif untuk mengatasi kebutuhan energi dan sebagai solusi pengurangan pemanasan global pada bumi dengan sedikit demi sedikit mengurangi kebutuhan bahan bakar energi fosil. Karena energi panas matahari memiliki jumlah yang tidak terbatas serta dalam pemanfaatannya tidak menimbulkan polusi yang dapat merusak lingkungan. Energi panas matahari yang dikonversikan menjadi energi listrik dengan menggunakan teknologi sel surya atau dapat disebut fotovoltaik yang di Indonesia dikenal dengan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) (ESDM, 2012). Sel surya merupakan perangkat yang dapat mengkonversi energi panas matahari menjadi energi listrik. Penelitian tentang sel surya, difabrikasi pertama kali pada tahun 1954 mencapai tingkat efisiensi energinya 6% dengan menggunakan bahan Silikon (Si) Kristal Tunggal yang dilakukan di Laboratorium Bell New Jersey U.S (Chapin, 1954). Selanjutnya teknologi sel surya dengan menggunakan bahan Silikon (Si) ini mulai ramai dan mulai dikomersialkan pada tahun 1955 dengan efisiensi hanya 2% saja. Tingkat efisiennya masih sangat rendah karena biaya fabrikasi perangkat sel surya saat itu sangatkan tinggi, maka di saat itu masih sangat sedikit orang-orang menggunakan pengaplikasi sel surya ini dirumahnya, tetapi secara bertahap pengaplikasian teknologi sel surya ini terus meningkat pesat tepatnya setelah tahun 1973 (Janaloka, 2021). Tingkat efisiensinya cukup tinggi dengan biaya fabrikasi yang lebih murah dari

sebelumnya yang mencapai tingkat efisiensinya 10%. Fabrikasi sel surya ini dibuat oleh *Institute of Energy Conversion of Delaware* pada tahun 1980 yang saat itu disebut dengan lapisan tipis sel surya (Bragagnolo et al., 1980). Penelitian dan fabrikasi sel surya terus berkembang hingga saat ini agar dapat mencapai tingkat efisiensi energi yang optimal dan menghasilkan energi yang tinggi serta dengan biaya produksi yang kecil.

2.2 Semikonduktor pada Sel Surya

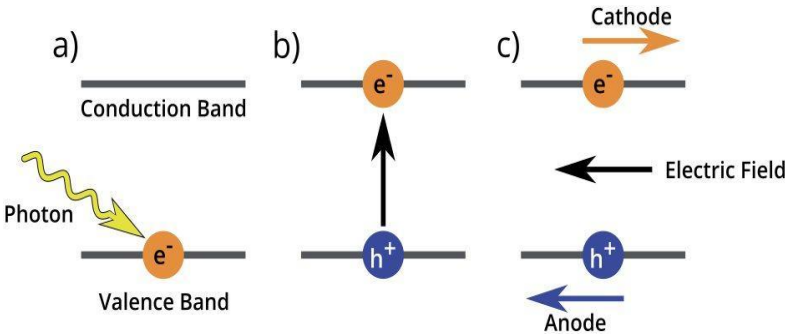
Sel surya merupakan perangkat yang dapat mengkonversi cahaya menjadi listrik melalui efek fotovoltaik. Fenomena tersebut dapat disebut juga sebagai sel fotovoltaik, dan hal tersebut yang membedakan dengan perangkat panas matahari. efek fotovoltaik adalah suatu proses yang terjadi pada beberapa material semikonduktor, seperti silikon. Pada tingkat paling dasar, semikonduktor menyerap foton, menarik *electron* yang kemudian dapat dieksitasi menjadi sebuah sirkuit listrik dengan pembuatan dan penerapan medan listrik (Ossila, 2021). Komponen utama dari sel surya adalah semikonduktor, karena semikonduktor merupakan bagian yang dapat mengkonversi cahaya menjadi listrik. Semikonduktor dapat melakukan konversi tersebut karena struktur tingkat energi elektronnya. Tingkat energi *electron* dapat dikategorikan menjadi dua pita, yaitu pita valensi dan pita konduksi. Pita valensi memuat tingkat energi yang ditempati oleh *electron* lebih besar, sedangkan pita konduksi memuat tingkat energi yang ditempati oleh *electron* lebih rendah. Perbedaan atau celah energi diantara bagian atas pita valensi dan bagian bawah pita konduksi ini disebut sebagai *band-gap* (E_g). Pita valensi dan pita konduksi ini yang dapat menjelaskan perbedaan energi *electron* pada bahan konduktor, isolator dan semikonduktor. Secara jelas hubungan pita konduksi dan pita valensi dapat dilihat seperti pada Gambar 2.2. Pada Gambar 2.2 dapat dilihat pada material konduktor pita konduksi dan valensi terhubung tanpa ada celah (tanpa *band gap*) sehingga *electron* dapat bergerak dengan bebas.



Gambar 2. 1 Energi band pada material konduktor, isolator dan semikonduktor (Ossila, 2021)

Sedangkan pada bahan isolator dan semikonduktor dapat dilihat bahwa terdapat celah diantara pita konduksi dan pita valensi,namun perbedaannya dapat kita lihat untuk isolator jarak antar pitanya sangat jauh sehingga butuh energi yang banyak agar *electron* dapat menyeberang sehingga hal inilah yang menghambat material isolator untuk dapat mengalirkan listrik. Sedangkan pada material semikonduktor celah antara pita konduksi dan pita valensi relatif kecil, sehingga memungkinkan *electron* akan berpindah dari pita valensi ke pita konduksi dengan energi jumlah energi yang kecil (Ossila, 2021).

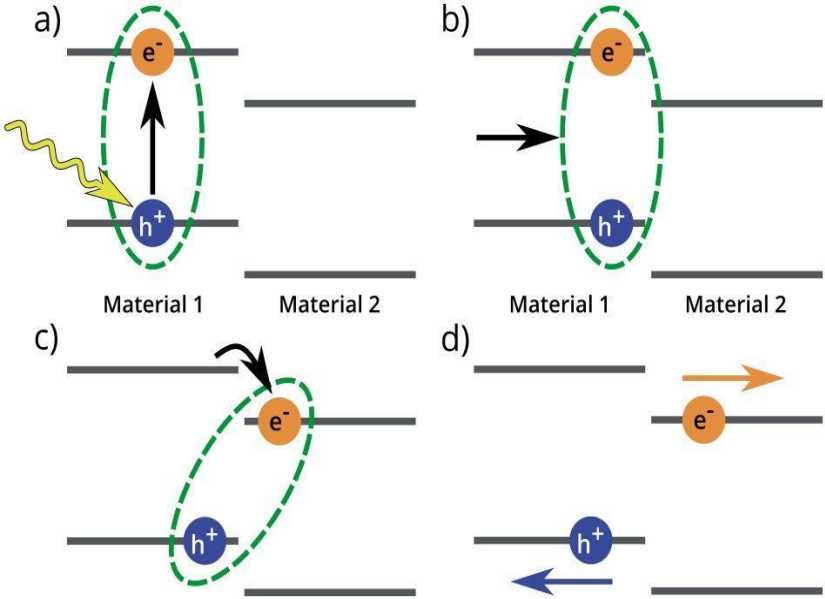
Celah pita *(band gap)* yang kecil pada bahan semikonduktor digunakan untuk menghasilkan listrik dengan menggunakan cahaya. Jika foton mengenai bahan semikonduktor dengan energi (E_y) yang lebih besar dari celah pita, maka akan terserap dan hal ini memungkinkan untuk electron dapat ditransfer dari pita valensi ke pita konduksi. Hal ini dikenal sebagai proses eksitasi, dengan *electron* yang berpindah dari pita valensi ke pita konduksi sehingga pada pita valensi mengalami kekosongan *electron.* Karena hal inilah pada pita valensi dapat dikenal sebagai *hole* karena minim dari *electron* dan *electron* yang lebih dominan yang berada pada pita konduksi. Karena muatan yang berlawanan antara *electron* dan *hole* sehingga serikat secara Coulomb, pada keadaan ini disebut sebagai “eksiton”.



Gambar 2. 2 Operasi data terjadinya aliran listrik pada perangkat sel surya (Ossila, 2021)

minim dari *electron* dan *electron* yang lebih dominan yang berada pada pita konduksi. Karena muatan yang berlawanan antara *electron* dan *hole* sehingga serikat secara Coulomb, pada keadaan ini disebut sebagai "eksiton". Eksiton ini harus dipisah (atau dikenal juga dengan disosiasi) sebelum pembawa muatan dapat dikumpulkan dan digunakan. Energi yang dibutuhkan untuk melakukan hal tersebut bergantung pada konstanta dielektrik (ε_r) dari suatu material. Hal ini menjelaskan tingkat penyaringan diantara muatan pada material semikonduktor dan mempengaruhi energi ikat eksiton (Ossila, 2021).

Pada Gambar 2.3 Menjelaskan alur proses terjadinya aliran listrik pada bahan material semikonduktor. Kondisi (a) menjelaskan terdapat suatu foton diserap oleh semikonduktor (b) menjelaskan suatu *electron* berpindah dari pita valensi ke pita konduksi dengan meninggalkan *hole* (c) menjelaskan *electron* dan *hole* diangkut menuju elektroda untuk dikumpulkan. Suatu material dengan konstanta dielektrik (ε_r) yang tinggi dengan energi ikat eksiton yang rendah dapat memungkinkan disosiasi terjadi secara termal. Eksiton pada material dengan (ε_r) yang rendah memiliki energi ikat yang tinggi, mencegah disosiasi termal. Sehingga hal ini membutuhkan metode disosiasi yang berbeda. Metode umum yang digunakan adalah mendapatkan eksiton pada permukaan diantara material dengan tingkat energi



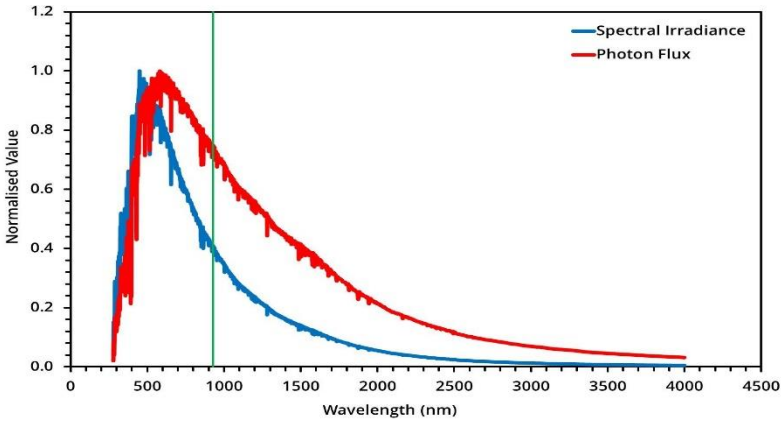
Gambar 2. 3 Operasi data terjadinya aliran listrik pada perangkat sel surya (Ossila, 2021)

offset lebih besar dari energi ikat eksiton. Hal ini memungkinkan *electron* atau *hole* untuk berpindah ke material lain dan memisahkan eksiton. Setelah eksiton dipindahkan, muatan bebas berdifusi ke elektroda untuk dikumpulkan. Hal ini dibantu oleh medan listrik bawaan dan terapan. Medan listrik bawaan dari perangkat muncul dari tingkat energi relatif yang menyusun sel pada material tersebut. Namun, medan listrik bawaan bergantung pada jenis semikonduktor yang digunakan. Operasi tersebut dapat digambarkan seperti yang terlihat pada Gambar 2.4.

Pada Gambar 2.4 menjelaskan alur proses terjadinya aliran listrik pada bahan dengan konstanta dielektrik yang rendah. Pada kondisi (a) menjelaskan foton diserap oleh material 1 dan menghasilkan eksiton (pasangan *electron* dan *hole*) (b) eksiton berdifusi ke permukaan material 2 yang memiliki tingkat energi *offset* (c) *electron* berpindah dari permukaan material 1

kepermukaan material 2 dan eksiton terpecah dan kondisi (d) muatan *electron* dan *hole* diangkut untuk menuju ke elektroda.

Ukuran celah pita pada material sel surya menjadi salah satu parameter yang penting, karena hal inilah yang dapat menghasilkan energi pada sel surya. Jika $E_y > E_g$, maka foton akan



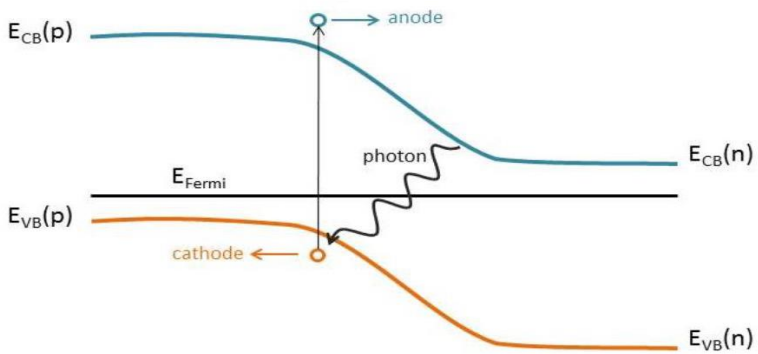
Gambar 2. 4 Hubungan antara nilai normalisasi iradiasi spectral dan fluks foton terhadapat Panjang gelmbang (Ossila, 2021).

diserap, dan energi apapun yang melebihi E_g, akan digunakan untuk mentransfer *electron* ke tingkat energi pita konduksi minimum. Selanjutnya elektron akan berkurang hingga pita konduksi minimum, yang mengakibatkan hilangnya energi yang berlebih. Tetapi, jika $E_y < E_g$ energi foton tidak akan terserap, sehingga energi akan terbuang. Dengan mempertimbangkan spektrum cahaya matahari, jika nilai E_g terlalu besar akan mengakibatkan sejumlah besar foton tidak terserap. Di sisi lain, jika E_g terlalu kecil akan mengakibatkan sejumlah besar foton akan diserap, tetapi energi akan cepat hilang karena relaksasi *electron* ke pita konduksi minimum. Dari diketahuinya pengaruh hal tersebut dari suatu perangkat fotovoltaik ditentukan standar E_g optimal pada suatu material yang akan digunakan. Shockley dan

Queisser telah menentukan efisiensi maksimum pada tahun 1961 yang dengan energi celah pita sebesar 1,34 eV dengan Panjang gelombang ~ 930 nm. Pada Gambar 2.5 memperlihatkan bahwa garis hijau menunjukkan Panjang gelombang yang sesuai dengan energi celah pita optimal dengan Panjang gelombangnya adalah (~ 930 nm). Data tersebut didapatkan oleh Laboratorium Energi Terbarukan Nasional, Golden, CO. (Ossila, 2021)

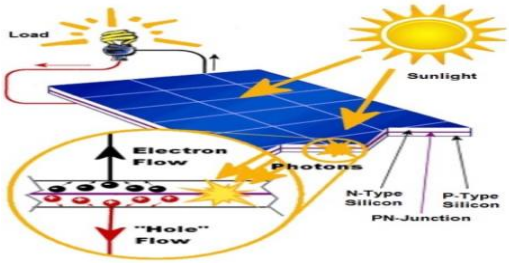
2.3 Sistem Kerja Sel Surya

Suatu perangkat sel surya terbuat dari material semikonduktor yang dapat menghasilkan energi listrik dari cahaya matahari dengan menggunakan efek *Photovoltaic*. Sebelum sel surya dapat menghasilkan energi listrik terdapat beberapa proses yang harus dilalui. Proses dimulai ketika suatu sel surya disinari oleh cahaya matahari, Sebagian dari foton dengan energi yang lebih besar yang berada pada celah pita *(band gap)* akan diserap oleh semikonduktor. Penyerapan foton terjadi ketika energi eksitasinya mencukupi ($E > E_{gap}$) agar terjadi transfer *electron* dan *hole ;* dengan *electron* yang berada pada pita konduksi dan *hole* yang berada pada pita valensi bergerak dengan arah yang berbeda, dapat digambarkan pada Gambar 6. (Wã, n.d.).



Gambar 2. 5 Proses eksitasi dan pemisahan muatan pada sel surya (Wã, n.d.)

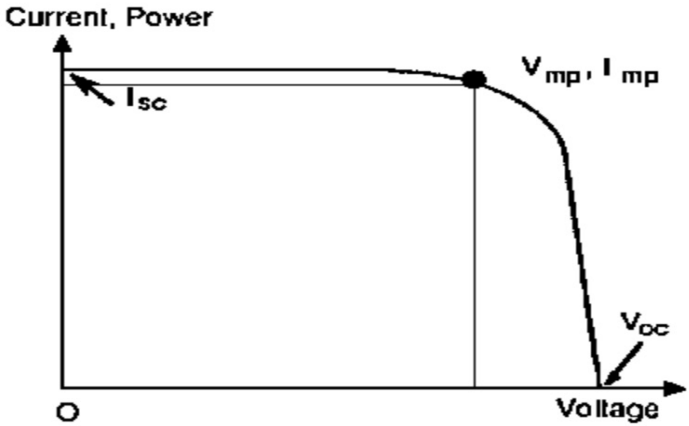
Suatu *carriers* (pembawa muatan), yang dihasilkan yang berada di persimpangan P-N *(P-N junction)*, akan mencapai daerah muatan tanpa memerlukan rekombinasi. Hal tersebut terjadi karena adanya efek medan listrik internal, *hole* akan berdifusi ke dalam daerah tipe-P sedangkan *electron* akan mengalir ke dalam daerah tipe-N. Akibatnya pada daerah tipe-P akan memiliki *hole* yang lebih banyak sedangkan pada daerah tipe-N akan menyimpan *electron* yang lebih banyak. Sehingga perbedaan kedua daerah dengan tipe-P yang memiliki muatan *hole (+)* yang lebih banyak dan tipe-N yang memiliki muatan *electron (-)* yang lebih banyak akan membentuk medan elektrostatis yang berada di dekat persimpangan P-N, yang memiliki arah yang berlawanan dengan suatu energi potensial. Medan elektrostatis tidak hanya bisa diimbangi oleh efek energi potensial penghalang, tetapi juga dapat menjadikan daerah tipe-P memiliki muatan positif (+) dan daerah tipe-N memiliki muatan negatif (-). Sehingga hal inilah yang dapat menghasilkan energi listrik yang berada diantara dua daerah tersebut atau sering dikenal sebagai persimpangan P-N *(P-N junction)*. Berikut adalah gambaran dari rangkaian alat sel surya yang terdapat pada Gambar 6. (Villalva et al., 2009).



Gambar 2. 6 Rangkaian dan prinsip kerja dari perangkat sel surya (Villalva et al., 2009)

2.4 Parameter Utama dalam Sel Surya

Sebelum menggunakan sel surya kita harus mengetahui beberapa parameter-parameter utama dari sel surya. Parameter kinerja sel surya terutama akan mengacu pada karakteristik keluaran dari perangkat sel surya adalah arus dan tegangannya (I-V) termasuk arus hubung pendek *(short-circuit current)* dan tegangan hubung terbuka *(open-circuit voltage)*, faktor pengisian dan konversi efisiensi daya yang dihasilkan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 (Lun et al., 2013)



Gambar 2. 7 Karakteristik output perangkat sel surya (I-V) (Lun et al., 2013)

2.4.1 Tegangan hubung terbuka *(open-circuit voltage)*

Tegangan hubung terbuka adalah tegangan keluaran maksimum dari perangkat sel surya. Tegangan hubung terbuka terjadi ketika nilai arus keluarannya sama dengan nol, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 tepatnya pada titik V_{oc}. Tegangan hubung terbuka dinyatakan dengan persamaan berikut ini :

$$V_{oc} = \frac{K_B T}{q} ln[\frac{I}{I_0} + 1] \quad (2.1)$$

Dimana, K_B adalah konstanta Boltzmann, T adalah temperatur, q adalah elemen muatan, I adalah densitas arus cahaya yang dihasilkan dan I_0 adalah densitas arus jenuh.

2.4.2 Arus hubung pendek *(short-circuit current)*

Arus hubung singkat terjadi ketika nilai tegangan bernilai sama dengan nol. Hal ini terjadi karena perangkat sel surya disinari oleh sumber cahaya di bawah standar, saat keluaran masuk pada keadaan korsleting. Arus akan berada pada keluaran maksimum yang disebut dengan arus hubung singkat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 tepatnya pada titik $I_{sc.}$ Arus hubung pendek dinyatakan dengan persamaan berikut ini :

$$I_{sc} = I - I_0 \, (e^{\frac{qV}{K_B T}} - 1) \quad (2.2)$$

2.4.3 Faktor pengisian *(fill factor)*

Faktor pengisian merupakan rasio daya keluaran maksimum ke tegangan hubung terbuka dan arus hubung pendek. Faktor pengisian berhubungan dengan nilai keluaran daya maksimum. Semakin tinggi faktor pengisiannya maka akan menghasilkan daya keluaran yang lebih besar lagi. Nilai dari faktor pengisian bergantung pada rangkaian resistansi dan tegangan. Faktor pengisian pada perangkat sel surya dinyatakan dengan persamaan berikut ini :

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.3)$$

Dimana, Pm adalah daya keluaran maksimum, V_{oc} adalah tegangan hubung terbuka dan I_{sc} adalah arus hubung pendek.

2.4.4 Konversi efisiensi daya *(Power Conversion Efficiency PCE)*

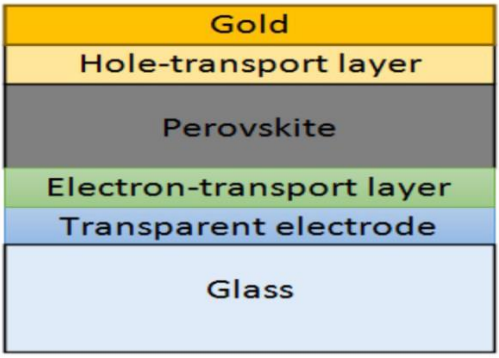
Konversi efisiensi daya (PCE) merupakan parameter penting dalam mengetahui kinerja dari perangkat sel surya. PCE didefinisikan sebagai rasio daya keluaran maksimum terhadap daya cahaya yang datang pada perangkat sel surya. Nilai dari PCE akan dinyatakan dengan persamaan berikut ini :

$$\eta = \frac{I_{sc}.FF.V_{oc}}{P_{in}} \tag{2.4}$$

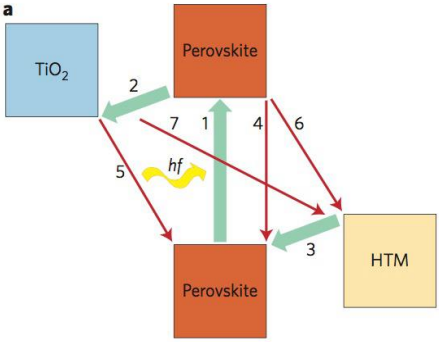
Dimana, η adalah nilai efisiensi daya yang dihasilkan oleh perangkat sel surya yang ditentukan oleh I_{sc}, V_{oc} dan P_{in} dengan P_{in} adalah daya penyinaran cahaya matahari pada perangkat sel surya.

2.5 Sel Surya Perovskite

Pada tahun 2012, pertama kalinya *Nature* mempublikasikan artikel tentang sel surya dengan menggunakan material Perovskite dengan efisiensi mencapai 10%. Sejak saat itulah perovskite sebagai bahan pembuatan sel surya mulai menarik perhatian karena dapat menghasilkan tingkat efisiensi yang tinggi dengan biaya fabrikasi yang murah dan berpotensi besar dikomersialkan (Snaith, 2013).



Gambar 2. 8 Konfigurasi susunan lapisan sel surya (Snaith, 2013)



Gambar 2. 9 Skema transportasi muatan pada lapisan sel surya perovskite (Hu et al., 2014)

Secara umum struktur dari sel surya perovskite terdapat 5 lapisan, yang pertama adalah lapisan katoda, material transportasi *hole (HTM : Hole Transporting Material)*, lapisan perovskite, material transportasi *electron (ETM : Electron Transporting Material)*, dan lapisan anoda (FTO/ITO). Struktur lapisan sel surya perovskite dapat digambarkan seperti yang tercantum pada Gambar 2.9.

Lapisan perovskite digunakan untuk dapat menyerap cahaya, ketika terjadinya eksitasi foton. *Electron* dan *hole* yang dihasilkan akan dipisahkan masing-masing ditransferkan ke *ETM* untuk *electron* dan ditransferkan ke *HTM* untuk *hole*. Sesuai dengan karakteristik ambipolar, material perovskite memiliki mobilitas *electron* dan *hole* yang tinggi. Fungsi dari lapisan *ETM* yaitu untuk mengekstrak dan mentransfer *electron* sedangkan *hole*-nya akan diblokir. Hal ini berbanding terbalik dengan lapisan *HTM* yaitu untuk mengekstrak dan mentransfer *hole* sedangkan *hole*-nya akan diblokir. Kedua hal tersebutlah yang menjelaskan bahwa terjadi mobilitas yang tinggi *electron* pada lapisan *ETM* dan mobilitas yang tinggi *hole* pada lapisan *HTM* serta *band offsets* yang sesuai yang berada

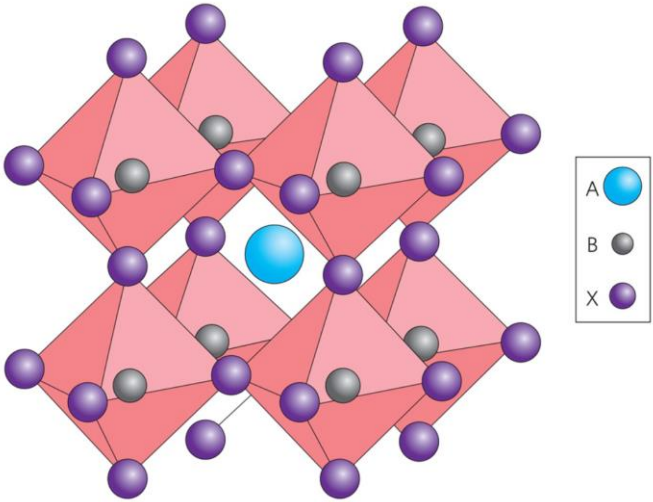
diantara lapisan *ETM/Perovskite/HTM* yang menjadi faktor terpenting dalam tingginya nilai efisiensi dari suatu sel surya (Hu et al., 2014).

Proses utama pada transfer muatan yang berada pada sel surya perovskite dapat dijelaskan sesuai pada Gambar 10. Panah hijau pada gambar tersebut merepresentasikan proses yang diinginkan untuk proses konversi energi termasuk eksitasi foton yang terjadi, transportasi *electron* dari lapisan perovskite ke lapisan *ETM*, dan transportasi *hole* dari lapisan perovskite ke lapisan *HTM*. Sedangkan panah merah merupakan proses yang dihindari karena akan terjadi hilangnya energi pada lapisan perovskite melibatkan rekombinasi pembawa muatan, dan terjadi arus balik *electron* dari lapisan *ETM* dan arus balik *hole* dari lapisan *HTM* menuju ke lapisan perovskite (Marchioro et al., 2014).

2.6 Material Perovskite

Material perovskite merupakan material yang memiliki struktur kristal yang sama dengan kalsium titanat ($CaTiO_3$) atau untuk struktur kristalnya dapat dituliskan sebagian ABX_3. Seperti pada Gambar 11. dimana struktur kristal A merupakan ammonium *organic*, seperti CH_3-NH^+_3, B adalah kation metal, seperti (Pb^{2+}), dan X adalah anion halide (seperti Cl, Br, I). Pada struktur kristal, ion A dikelilingi oleh 8 struktur 3-D dari sudut bagi unit *octahedral* BX_6. (Wang et al., 1998) seperti yang digambarkan pada Gambar 10. Kemungkinan struktur *crystallographic* dari material perovskite dapat diprediksi dari proses analisis faktor toleransi *t* dan faktor *octahedral u*. Persamaan *t* dapat dituliskan sebagai berikut :

$$t = \frac{(r_A - r_X)}{(\sqrt{2}\,[r_B + r_A])} \tag{2.5}$$

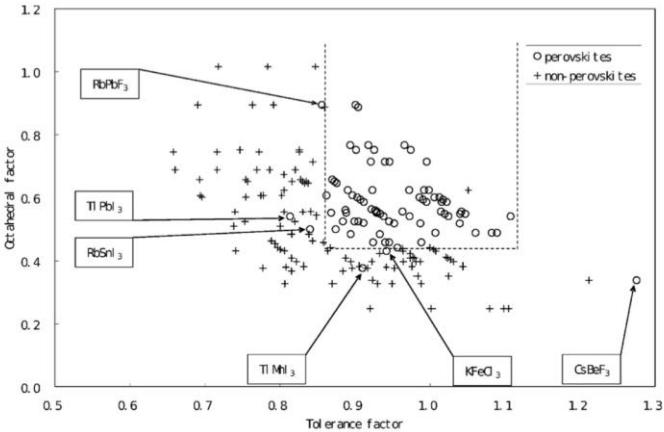


Gambar 2. 10 Struktur Geometri Perovskite (Snaith, 2013)

Dimana, r_A, r_B dan r_x adalah radiasi ion dari A, B dan X. Dalam laporan menunjukkan faktor toleransi dari kebanyakan material perovskite dalam skala 0.75 sampai 1 (Li et al., 2004). Namun, hal tersebut belum cukup untuk menyimpulkan kemungkinan struktur *crystallographic* dari material perovskite dengan hanya mempertimbanagkan faktor toleransi. Karena itu, faktor *octahedral u* digunakan sebagai indikator tambahan untuk memprediksi formasi dari struktur material perovskite. Persamaan *u* dapat dituliskan sebagai berikut :

$$u = \frac{r_B}{r_X} \tag{6}$$

Pada umumnya, struktur perovskite ABX_3 dapat dibentuk dalam kondisi $0.813 < t < 1.107$ dan $0.442 < u < 0.895$ (Li et al., 2004, p. 0). Peta struktur material perovskite ABX_3 dengan mempertimbangakn *t* dan *u* dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2. 11 Peta struktur material perovskite ABX3 (Li et al., 2004)

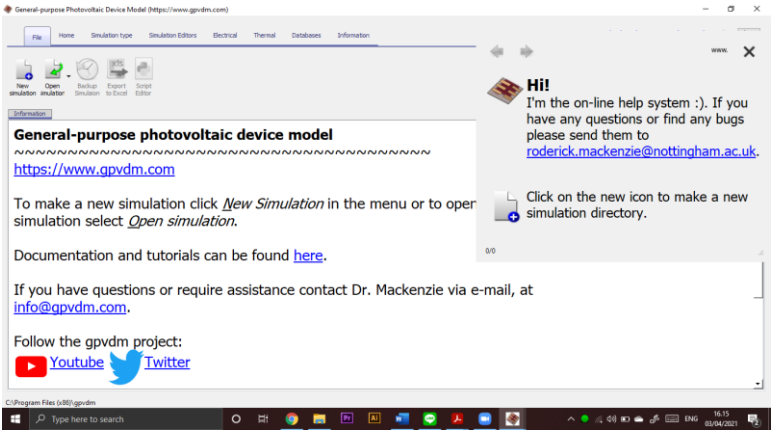
Dibandingkan dengan material yang lain, material perovskite memiliki keunikan karakteristiknya tersendiri seperti energi band gapnya (diantara 1.55eV), umur *carrier* (pembawa) dan panjang difusi yang lebih lama, dan koefisien kepunahan tinggi (Wei, n.d.). Sesuai dengan karakteristik yang diinginkan, material perovskite diterapkan secara luas sebagai penyerap cahaya pada perangkat sel surya (Berhe et al., 2016). Namun, material perovskite juga memiliki beberapa Batasan termasuk stabilitas yang rendah di bawah kelembaban dan lingkungan dengan radiasi ultraviolet, yang hal tersebut dengan mudah menurunkan kinerja perangkat sel surya, dan efek dari permasalahan *toxicity* material yang digunakan, karena dari *toxicity* ion Pb^{2+} di kedua lingkungan dan ditakutkan terkena tubuh manusia selama dalam proses fabrikasi berlangsung (Service, 2014).

2.7 Material *Caesium Iodide (CsI)*

Pada tahun 2017 Zhao dan rekan melakukan riset tentang penambahan material CsI pada sel surya perovskite untuk dapat mencapai efisiensi dan stabilitas yang tinggi. Pada peninjauan penambahan sel surya perovskite berbasis $CH_3NH_3PbI_3$ yang telah dilakukan didapatkan hasil efisiensi dan stabilitas sel surya perovskite dapat ditingkatkan. Hal tersebut bisa didapatkan karena dengan penambahan material CsI pada struktur kristal perovskite dapat meminimalisir pembentukan cacat *(defects formation)* sela – sela grain pada struktur kristal perovskite. Material CsI terinterkalasi masuk ke sela-sela grain material perovskite tanpa merubah struktur dasar kristal perovskite itu sendiri (Zhou et al., 2017).

2.8 Simulasi dengan perangkat lunak *General – purpose Photovoltaic Device Model (GPVDM)*

General-purpose Photovoltaic Device Model (GPVDM) adalah suatu pemodelan *drift-diffusion base / shockey-read-hall* yang mana hal ini merupakan pensimulasian untuk simulasi opto-elektrik dan fotovoltaik. *Software* GPVDM ini menggunakan pendekatan *finite difference* (beda hingga) untuk menyelesaikan



Gambar 2. 12 Jendela tampilan *software* GPVDM

persamaan *drift-diffusion* (pergeseran-difusi) dari *electron* dan *hole* dalam posisi ruang untuk menjelaskan pergerakan muatan dalam sel surya. Setiap titik berhubungan dalam posisi ruang, persamaan *carrier* (pembawa) pengumpulan dan pelepasan diselesaikan dengan energi ruang. Tampilan pada *software* GPVDM dapat dilihat seperti yang terlihat pada Gambar 2.13. (Kumar Mishra and Shukla, 2020).

Software GPVDM ini juga digunakan untuk menyelesaikan persamaan *optic* dengan menggunakan *ray tracing* atau metode transfer matriks. Pemodelan dengan GPVDM merupakan suatu *software* simulasi pemodelan sel surya perovskite berbasis penyelesaian persamaan Poisson (1), persamaan pembawa kontinuitas (2,3), dan persamaan *drift-diffusion* bipolar (4,5) pada 1-dimensi dan domain waktu. Berikut adalah berturut-turut persamaan yang digunakan :

$$\frac{d}{dx}\,\varepsilon_0\varepsilon_r\frac{d\phi}{dx} = q(n-p) \tag{1}$$

Persamaan tersebut merupakan persamaan Poisson yang digunakan agar dapat memperoleh tegangan. Berada diantara anoda muka transparan ($x = 0$) dan bagian belakang katoda ($x = d$), dimana ε_0 adalah permitivitas ruang bebas, dan ε_r adalah permitivitas dari material perovskite yang digunakan dan q adalah muatan *electron.* Lalu n dan p masing-masing mendeskripsikan *electron* bebas dan populasi *hole*. Sedangkan untuk dapat memperoleh fluks arus dalam perangkat dengan persamaan kontinuitas, untuk *electron* :

$$\frac{\partial J_n}{\partial x} = q\,(R_n - G + \frac{\partial n}{\partial t}) \tag{2}$$

dan *hole,*

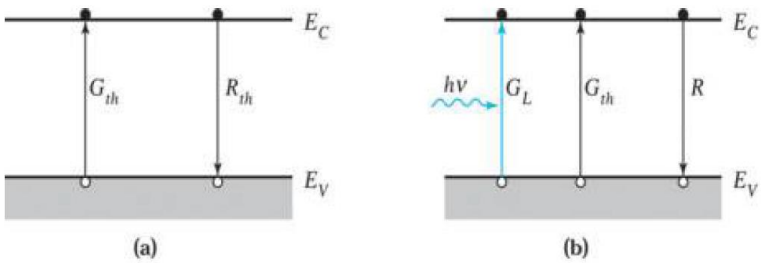
$$\frac{\partial J_p}{\partial x} = -q\,(R_p - G + \frac{\partial p}{\partial t}) \tag{3}$$

Dapat diselesaikan dimana J_n adalah densitas arus fluks *electron*, J_p adalah densitas fluks *hole*, $R_{e.h}$ adalah nilai rekombinasi dan G adalah nilai pembawa muatan bebas. Sedangkan pada persamaan *drift-diffusion* bipolar untuk *electron* dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$J_n = q\mu_c n \frac{\partial E_c}{\partial x} + qD_n \frac{\partial n}{\partial x} \tag{4}$$

dan untuk *hole*

$$J_p = -q\mu_h n \frac{\partial E_v}{\partial x} + qD_p \frac{\partial p}{\partial x} \tag{5}$$



Gambar 2. 13 Proses *generation rate* dan *recombination rate* dari pasangan *electron-hole* (a) kondisi pada suhu ruang (b) kondisi di bawah penyinaran foton (Sze and Lee, 2012).

Untuk operator pembawa muatan bebas, diasumsikan dengan statistic Maxwell-Boltzmann. E_c dan E_v mendefinisikan mobilitas tepi pembawa muatan bebas, dan dapat didefinisikan E_c = - χ – φ dan $E_v = E_v - E_g$, dimana χ adalah selisih antara mobilitas tepi Lumo dengan tingkat ruang hampa dan E_g adalah selisih antara mobilitas tepi Homo dan Lumo (MacKenzie et al., 2012).

Persamaan – persamaan tersebut yang menyusun bagaimana simulasi GPVDM dapat berjalan. Alur dari penyelesaian persamaan tersebut yang pertama adalah simulasi akan menyelesaikan persamaan Poisson seperti yang terdapat pada

persamaan (1). Pada persamaan Poisson tersebut dilakukan pengulangan hingga dapat mencapai kondisi akuratnya. Selanjutnya hasil yang didapatkan pada persamaan Poisson disubtitusikan pada persamaan kontinuitas *electron* dan *hole* seperti yang tertera pada persamaan (2) dan (3). Ketika nilai *electron* dan *hole* sudah didapatkan dari persamaan kontinuitas pada kondisi akurat, hasil yang didapatkan dimasukan untuk mencari nilai densitas muatan *electron* dan *hole* seperti yang tertera pada persamaan (4) dan (5). Setelah didapatkan nilai densitas muatan *electron* dan *hole* maka selanjutnya dihitunglah arus yang didapatkan dari pensimulasian sel surya perovskite pada *software GPVDM* hingga didapatkan nilai efisiensi sel surya perovskite.

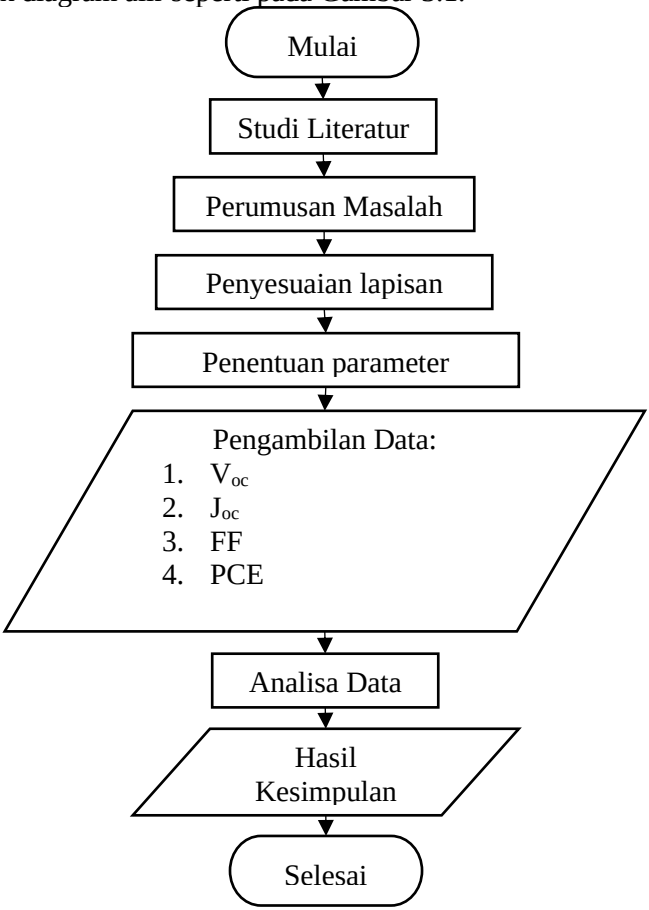
Software GPVDM berjalan berdasarkan prinsip *recombination* dan *generation* yang mana dua hal merupakan faktor yang sangat penting dalam sel surya. Mempertimbangkan celah pita pada material semikonduktor dalam kesetimbangan termal. Energi panas maupun energi foton dapat memungkinkan suatu *electron* yang berada pada pita valensi akan mengalami transisi menuju pita konduksi dan meninggalkan *hole* pada pita valensi. Proses ini disebut sebagai proses pembangkitan atau *generation rate* pada perangkat sel surya dan direpresentasikan sebagai G_{th} (pasangan *electron-hole* yang dihasilkan per cm^3/s) seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.14. Sedangkan ketika sebuah *electron* melakukan transisi yang sebaliknya yaitu dari pita konduksi menuju ke pita valensi, pasangan *electron* dan *hole* akan dimusnahkan. Proses yang berkebalikan ini lah yang disebut sebagai *recombination rate* dan direpresentasikan sebagai R_{th}.(Sze and Lee, 2012).

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III
METODOLOGI

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini melalui beberapa tahapan untuk memperoleh hasil yang baik. Tahapan-tahapan tersebut ditunjukkan dalam bentuk diagram alir seperti pada Gambar 3.1.



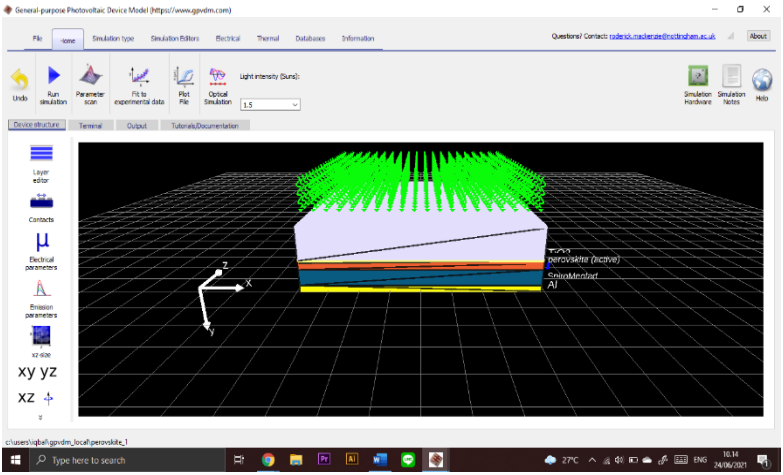
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Studi Literatur

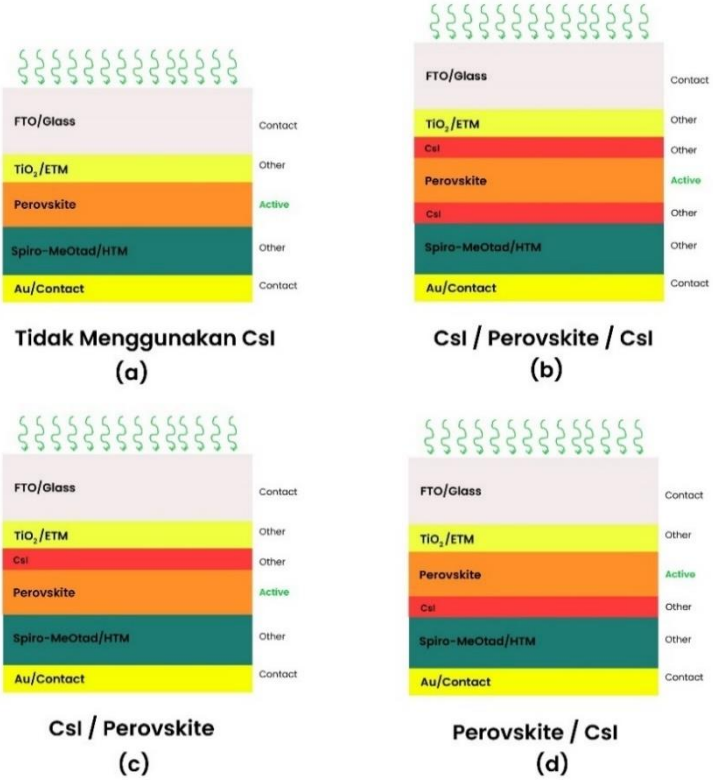
Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan informasi yang lebih akurat dalam melaksanakan penelitian sehingga mempermudah penulis untuk melaksanakan kegiatan penelitian simulasi yang dilakukan. Sumber-sumber pustaka yang digunakan penulis dalam penelitian ini merupakan jurnal nasional dan internasional, buku teks, makalah dan juga sumber-sumber belajar dari internet.

3.3 Penentuan Lapisan

Pada penelitian ini dengan menggunakan *software* simulasi *General – Purpose Photovoltaic Device Model (GPVDM)* untuk melakukan simulasi fotovoltaik sel surya perovskite.Tampilan *software GPVDM* dapat dilihat seperti pada Gambar 3.1. Hal pertama yang dilakukan dalam penggunaan simulasi dengan *GPVDM* adalah dengan menentukan material apa saja yang digunakan dalam simulasi sel surya perovskite. Terdapat dua macam metode yang dilakukan dalam tugas akhir simulasi sel surya perovskite ini antara lain adalah sebagai berikut.



Gambar 3. 2 Tampilan *user interface software General-purpose Photovoltaic Device Model* (GPVDM)



Gambar 3. 3 Susunan lapisan sel surya perovskite pada simulasi GPVDM (a) sel surya perovskite tanpa CsI (b) sel surya perovskite CsI/Perovskite/CsI (c) sel surya perovskite CsI/Perovskite (d) sel surya perovskite Perovskite/CsI

3.3.1 Penentuan Susunan Ketebalan Optimal pada Sel Surya Perovskite

Pada tugas akhir ini akan dilakukan pencarian ketebalan optimal dari sel surya perovskite. Penentuan ketebalan optimal yang dilakukan berdasarkan pada penelitian tentang simulasi sel surya perovskite yang telah dilakukan oleh Kumar dkk tentang simulasi sel surya perovskite (Kumar Mishra and Shukla, 2020).

Penentuan ketebalan tersebut dilakukan untuk menentukan ketebalan optimal dari masing-masing lapisan sel surya perovskite. Ketebalan yang utama yang akan dicari adalah mencari ketebalan optimal pada lapisan perovskite dan lapisan CsI. Lapisan perovskite dilakukan dari ketebalan 100 – 800 nm sedangkan ketebalan lapisan CsI dilakukan dari ketebalan 2 – 20 nm.

3.3.2 Penentuan *Double-Layers* Perovskite

Pada tugas akhir ini akan mencari pemodelan sel surya *double-layers* perovskite agar mencapai nilai efisiensi yang tinggi akan dilakukan penentuan masing-masing komponen lapisan yang akan menyusun lapisan sel surya perovskite. Susunan lapisan sel surya perovskite terdiri dari FTO/TiO_2/Perovskite : $CH_3NH_3PbI_3$/Spiro-OMeTAD/ Au. Selanjutnya untuk melakukan variasi pada penelitian kali ini diberlakukannya penambahan lapisan pada perovskite atau dapat disebut sebagai *double-layer* perovskite. Penambahan lapisan pada lapisan perovskite dilakukan penambahan dengan menggunakan material CsI yang hal ini mengacu pada penelitian Wang dkk (Wang et al., 2021). Wang dkk melakukan penelitian tentang penambahan *double – layer* perovskite, lapisan perovskite ditambah dengan material CsI pada bagian atas, bawah, dan atas bawah lapisan perovskite. Susunan lapisan sel surya perovskite yang akan disimulasikan dapat dilihat seperti yang tertera pada Gambar 3.2. Ketebalan yang digunakan pada simulasi sel surya perovskite dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Parameter ketebalan simulasi sel surya perovskite

Parameter	**Nilai**
FTO (Contact)	5×10^{-7} m
TiO_2 (Other)	4×10^{-8} m
Perovskite (Active)	Variasi
Spiro-Ometad (Other)	2.5×10^{-7} m
Au (Contact)	1×10^{-7} m
CsI (Other)	Variasi

3.4 Penentuan Parameter

Pada tahap penentuan parameter, dilakukan penentuan nilai-nilai elektrik-optik dari material – material yang digunakan sebagai lapisan yaitu lapisan material FTO sebagai elektroda, lapisan material TiO_2 sebagai lapisan ETM, lapisan material Perovskite: $CH_3NH_3PbI_3$ sebagai semikonduktor, lapisan material Spiro-OMeTAD digunakan sebagai HTM, lapisan emas (Au) sebagai elektroda dan lapisan material CsI yang digunakan sebagai *double layer* pada perovskite. Pada simulasi sel surya perovskite dan parameter umum yang dimasukan pada simulasi sel surya perovskite antara lain seperti ukuran luasan sel surya perovskite, intensitas cahaya matahari yang masuk P_{in}, *range* tegangan masukan V_0, dan kelembaban kondisi lingkungan. Parameter umum yang digunakan pada simulasi sel surya perovskite pada tugas akhir ini mengacu pada artikel Wang dkk yaitu dengan menggunakan skala luasan sebesar 0,09 cm^2, pengukuran tegangan dilakukan pada rentang -0,2V sampai 1,2V, intensitas cahaya matahari sebesar 100 mW/cm^2, dan dengan kelembapan kondisi lingkungan sebesar 300 K (Wang et al., 2021). Parameter umum simulasi dapat dilihat pada Tabel 3.2. Nilai elektrik-optik akan ditentukan terlebih dahulu berdasarkan dengan data elektrik-optik yang seharusnya pada material yang asli. Parameter elektrik-optik yang digunakan dalam tugas akhir ini seperti yang terlihat pada Tabel 3.3. Parameter elektrik-optik yang digunakan pada simulasi yang dilakukan berdasarkan dari penelitian yang sebelumnya dilakukan oleh Kumar dkk. (Kumar Mishra and Shukla, 2020).

Tabel 3. 2 Parameter umum simulasi sel surya perovskite

Parameter	**Nilai**
Dimensi	9×10^{-2} cm^2
Intensitas Cahaya	100 mW/cm^2 (AM 1.5)
Tegangan masukan	(-0.2) eV – 1.2 eV
Kelembapan	300 K

Tabel 3. 3 Parameter elektrik simulasi sel surya perovskite

Parameter	**Nilai**
Electron trap density	1×10^{20} $m^{-3}eV^{-1}$
Hole trap density	1×10^{20} $m^{-3}eV^{-1}$
Electron tail slope	30×10^{-3} ev
Hole tail slope	30×10^{-3} ev
Electron mobility	2×10^{-4} m^2v^{-1} s^{-1}
Hole mobility	2×10^{-4} m^2v^{-1} s^{-1}
Relative permittivity	20
Number of traps	5
Free electron to trap electron	1×10^{-21} m^{-2}
Free electron to trap free hole	1×10^{-21} m^{-2}
Free hole to trap electron	1×10^{-21} m^{-2}
Free hole to trap hole	1×10^{-21} m^{-2}
Effective density of free electron states	5×10^{-26} m^{-3}
Effective density of free hole states	5×10^{-26} m^{-3}
Electron affinity	1.6 eV
Band Gap	1.55 eV
n_{free} *to* p_{free} *recombination rate*	1×10^{-18} m^3 s^{-1}

3.5 Pengambilan Data

Pengambilan data yang dilakukan pada tugas akhir ini berupa data dengan karakteristik elektrik-optik simulasi sel surya perovskite yang dilakukan. Setelah dilakukan penyusunan lapisan dan penentuan parameter elektrik-optik, susunan lapisan sel surya perovskite dilakukan dengan masing-masing penambahan *double – layer* pada susunan sel surya CsI – Perovskite dan susunan lapisan *ETM/Perovskite/HTM*. Data yang akan didapatkan dari simulasi sel surya perovskite yang dilakukan adalah masing-masing *open circuit-voltage* (V_{oc}), *short circuit-current* (J_{sc}), *fill factor (FF),)*, dan *power conversion efficiency (PCE).*

3.5 Analisis Data

Data yang didapat dari hasil pengujian simulasi untuk kemudian dianalisis dan dibandingkan dengan hasil fabrikasi *double layer* perovskite yang merujuk pada artikel dari Wang dkk (Wang et al., 2021). Hasil yang didapatkan pada simulasi berupa *open circuit-voltage* (V_{oc}), *short circuit-current* (J_{sc}), *fill factor (FF)*, dan *power conversion efficiency (PCE)*. Hasil yang didapatkan dari simulasi tersebut selanjutnya akan dilakukan perbandingan dengan menggunakan grafik dari pengaruh pemberian variasi lapisan *double layer* perovskite pada simulasi sel surya dan data tersebut juga akan dibandingkan dengan hasil fabrikasi yang merujuk pada penelitian yang dilakukan oleh Wang dkk. Dari hasil grafik yang didapatkan tersebut nantinya akan dapat digunakan untuk meninjau susunan dengan lapisan yang manakah yang menghasilkan tingkat efisiensi dan stabilitas yang tinggi.

BAB IV
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

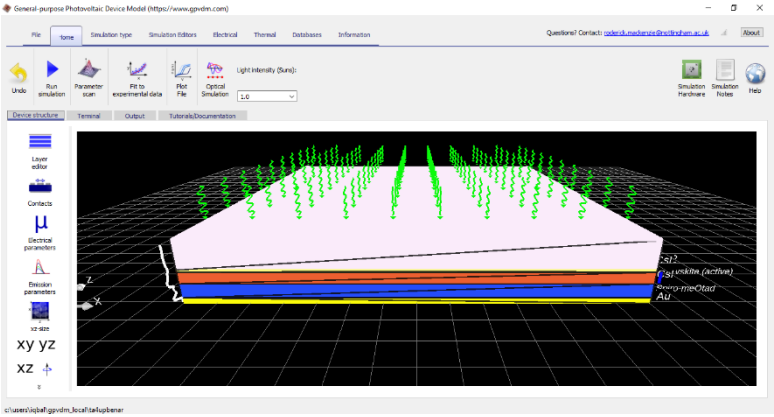
4.1 Simulasi Sel Surya Perovskite

Telah dilakukan simulasi pada sel surya perovskite dengan menggunakan simulasi fotovoltaik *General – Purpose Photovoltaic Device Model (GPVDM)*. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software GPVDM* dengan menggunakan modul simulasi sel surya perovskite.

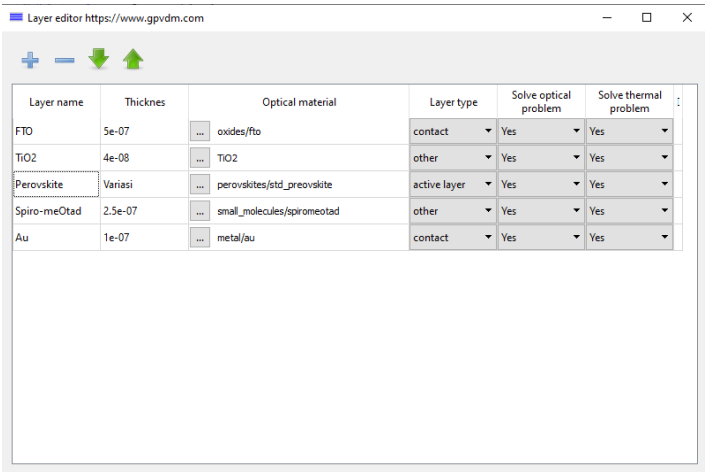
4.1.1 Desain Susunan Lapisan Sel Surya Perovskite

Pada modul sel surya perovskite selanjutnya dilakukan penyusunan masing-masing komponen lapisan pada sel surya perovskite seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan susunan lapisan secara jelas ditampilkan pada Gambar 4.2. Pada Gambar 4.1 ditampilkan sebuah susunan dari sel surya perovskite dengan menggunakan *software GPVDM*. Susunan lapisan yang digunakan seperti yang terlihat pada Gambar 4.1 antara lain adalah lapisan FTO *(Flourine Tin Oxide)* sebagai kontak elektroda yang akan dilewati lebih awal oleh sinar surya yang melewatinya. Lapisan kedua adalah TiO_2 *(Titanium Dioxide)* sebagai lapisan yang berfungsi sebagai ETM *(Electrical Transport Material),* pada lapisan ini yang akan memuat banyaknya jumlah *electron* pada sel surya perovskite yang akan dialirkan pada elektroda. Selanjutnya adalah lapisan utama yang digunakan pada sel surya perovskite yaitu material perovskite yang berfungsi sebagai pemberi *electron* dan *hole* pada masing-masing lapisan ETM dan HTM. Keempat adalah lapisan Spiro-OMeTAD yang digunakan sebagai yang difungsikan sebagai lapisan HTM *(Hole Transport Material),* pada lapisan ini nanti yang akan memuat banyak jumlah *hole* yang nantinya akan dialirkan pada elektroda. Lapisan terakhir adalah lapisan logam Au (emas) yang difungsikan sebagai elektroda penghantar arus listrik nantinya pada pembuatan sel surya perovskite. Setelah dilakukan penyusunan dilakukan parameter elektrik maupun optic dari masing-masing komponen material

yang digunakan pada simulasi sel surya fotovoltaik dengan *software General – Purpose Photovoltaic Device Model (GPVDM).*



Gambar 4. 1 Tampilan skema sel surya perovskite dengan menggunakan *software* GPVDM



Gambar 4. 2 Tampilan ukuran susunan lapisan sel surya perovskite dengan menggunakan *software* GPVDM

4.1.2 Pengaruh Ketebalan pada Lapisan Sel Surya Perovskite

Simulasi yang sudah dijalankan dengan susunan lapisan dan parameter elektrik yang sudah dimasukkan. Selanjutnya simulasi sel surya perovskite akan dijalan dengan variasi ketebalan sel surya perovskite. Variasi ketebalan perovskite yang digunakan adalah ketebalan material perovskite 100 – 800 nm. Hasil pengaruh variasi ketebalan pada sel surya perovskite dapat dilihat seperti pada Tabel 4.1

Tabel 4. 1 Parameter elektrik hasil simulasi pengaruh ketebalan perovskite

Ketebalan (nm)	JsC (mA/cm^{-2})	VoC (Volts)	FF (a.u.)	PCE (%)
100	21,314	0,85	83,10	15,00
200	24,808	0,86	84,16	17,22
300	23,701	0,86	82,78	16,83
400	23,608	0,86	82,80	16,81
500	23,390	0,86	83,11	16,75
600	23,803	0,86	83,67	17,21
700	22,262	0,86	83,92	16,14
800	22,043	0,87	84,31	16,08

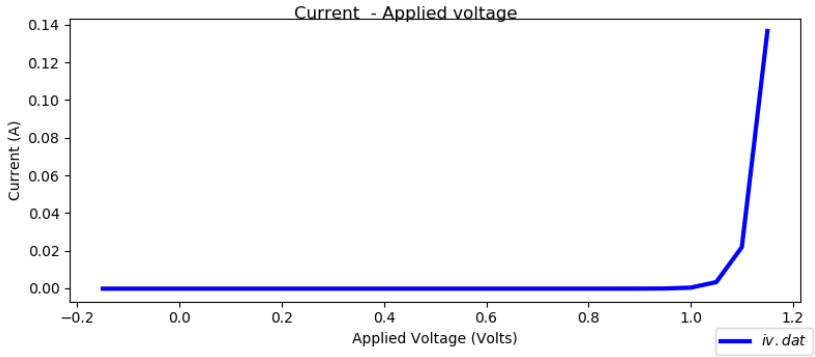
Dari simulasi sel surya perovskite yang telah dijalankan dengan menggunakan variasi ketebalan material perovskite seperti yang telah ditampilkan pada Tabel 4.1 dengan hasil - hasil yang didapatkan antara lain adalah *Jsc, Voc, Fill Factor (FF)* dan *Power Conversion Efficiency (PCE)*. Dari hasil simulasi yang telah jalan dapat diketahui pada tabel bahwa ketebalan perovskite yang menghasilkan PCE paling tinggi adalah pada ketebalan perovskite 200 nm yaitu menghasilkan PCE sebesar 17,22%. Jadi didapatkan pada simulasi sel surya perovskite yang dijalankan ketebalan perovskite optimal yang menghasilkan nilai efisiensi paling tinggi terdapat pada ketebalan 200 nm.

4.1.3 Hasil Simulasi Elektrik pada Sel Surya Perovskite

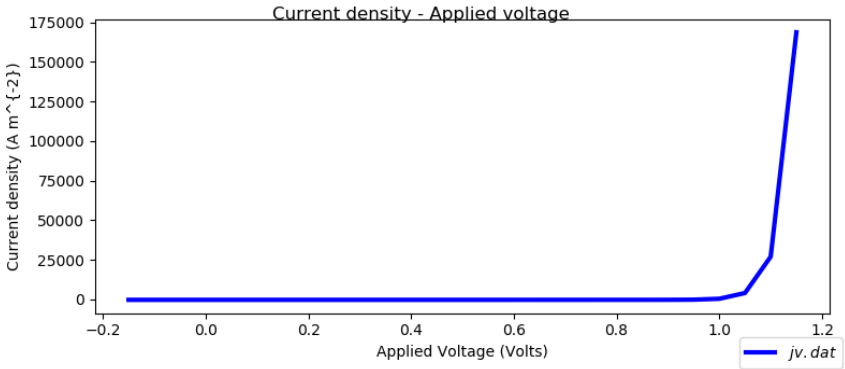
Karakteristik dari elektrik yang didapatkan dari simulasi sel surya perovskite dengan ketebalan lapisan perovskite 200 nm menghasilkan nilai efisiensi sel surya perovskite yang paling tinggi yaitu sebesar 17,22% nilai PCE terdapat pada Tabel 4.1 yang dihasilkan. Karakteristik arus – tegangan yang dapatkan dari hasil efisiensi yang paling tinggi ditampilkan pada grafik hubungan arus-tegangan. grafik I - V yang terdapat pada Gambar 4.3, grafik J - V yang terdapat pada Gambar 4.4, grafik densitas muatan total yang terdapat pada Gambar 4.5, grafik faktor rekombinasi *electron* dan *hole* pada Gambar 4.6. Hasil tersebut didapatkan dengan mengatur beberapa parameter lingkungan yaitu antara lain diatur kondisi lingkungan dengan suhu kelembapan lingkungan sebesar 300 K, ukuran sel surya perovskite disusun secara planar dengan ukuran 0,09 cm^2 dengan intensitas penyinaran cahaya matahari sebesar AM 1,5 (1 intensitas cahaya matahari) yang mana energinya sama dengan 100 mW/cm^2 dan dengan dilakukan perubahan-perubahan ketebalan pada lapisan perovskite untuk mencari nilai efisiensi yang paling tinggi. Hasil dari pembawaan *electron* dan *hole* yang didapatkan pada proses yang terjadi pada sel surya perovskite akan dapat menghasilkan energi yang mana disebut dengan energi listrik.

Generation rate sendiri merupakan gejala terjadinya eksitasi *electron* pada material perovskite aktif ketika dikenai sebuah energi yang lebih besar dan dalam kasus sel surya adalah energi intensitas sinar matahari ketika mengenai material perovskite. Terjadi proses eksitasi, *electron* yang terdapat pada pita valensi material perovskite akan berpindah ke pita konduksi yang mana *electron* tersebut akan meninggalkan *hole* tetap berada pada pita valensi. Kemudian *electron* dan *hole* tersebut akan berpindah menuju ke masing-masing daerah yang memiliki lingkungan yang dominan memiliki *electron* yaitu pada lapisan TiO_2 (ETM) dan *hole* akan banyak terdapat pada lapisan Spiro-OMeTAD (HTM). Sehingga selanjutnya dari karena terdapat perbedaan muatan antara *electron* dan *hole* pada lapisan ETM dan HTM ini akan

menghasilkan beda potensial yang akan menghasilkan arus dan tegangan yang akan diantarkan melalui elektroda pada lapisan FTO dan Au karena dua lapisan ini digunakan sebagai elektroda pada lapisan sel surya perovskite.



Gambar 4. 3 Grafik Karakteristik I-V dari Sel Surya Perovskite pada 300 K



Gambar 4. 4 Grafik Karakteristik J -V dari Sel Surya Perovskite pada 300 K

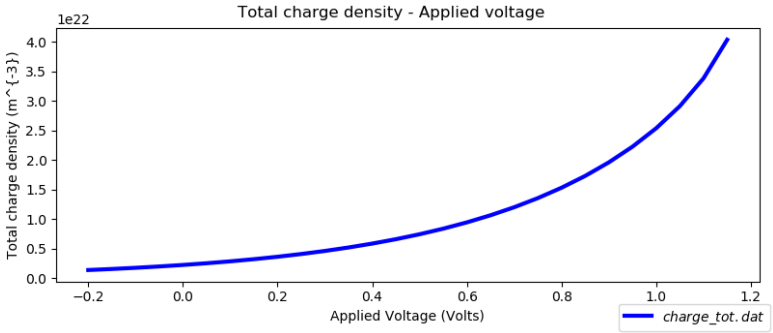
Pada grafik yang didapatkan pada Gambar 4.3 didapatkan grafik arus (Isc) pada luasan sel surya perovskite dengan ukuran 9×10^{-2} cm^2 dan pada Gambar 4.4 adalah grafik densitas arus (Jsc)

disetiap titik yang didapatkan pada sel surya perovskite. Simulasi sel surya perovskite yang dijalankan dilakukan dengan pengukuran tegangan pada rentrang -0,2 V sampai 1,2 V. Rentang pengukuran tegangan pada simulasi dibatasi pada -0,2V sampai 1,2V. Pada rentang pengukuran tegangan ini akan ditinjau hubungan arus-tegangan (I-V) yang dihasilkan pada perangkat sel surya perovskite yang dibuat. Secara mendasar, besaran nilai I-V yang dihasilkan pada sel surya berhubungan dengan sirkuit rangkaian sel surya dan tegangan bias maju *(forward bias)* serta bias balik *(reverse bias).* Rangkaian yang digunakan pada sel surya menentukan hasil pengukuran yang inginkan, pengukuran arus (I) dapat dilakukan dengan menggunakan sirkuit rangkaian tertutup agar terdapat arus yang mengalir untuk menghasilkan daya listrik. Sedangkan jika ingin melakukan pengukuran tegangan (V) yang dihasilkan pada perangkat sel surya dapat menggunakan rangkaian terbuka yaitu ketika perangkat sel surya disinari foton maka akan menimbulkan beda potensial pada lapisan semikonduktor perovskite. Dua kondisi tersebut yang perlu diperhatikan pada pengukuran secara langsung perangkat sel surya.

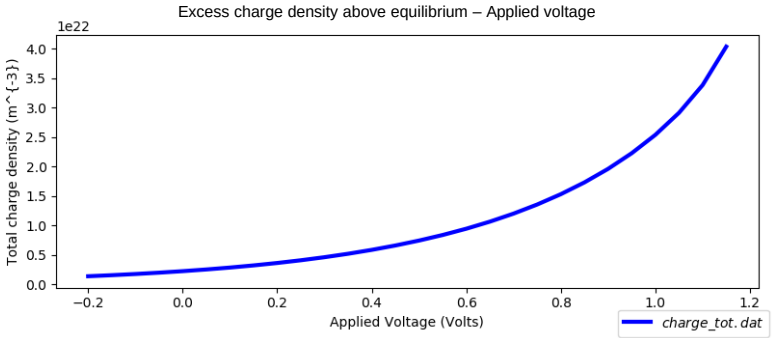
Pada dasarnya perangkat sel surya menerapkan konsep yang hampir sama dengan fotodioda yaitu ketika material semikonduktor disinari cahaya akan dapat menghasilkan arus dan tegangan (I-V) yang dipengaruhi oleh medan listrik yang dihasilkan pada perangkat sel surya. Perangkat sel surya dapat menghasilkan arus dengan penerapan bias balik *(reverse bias)* hal ini sama dengan konsep kerja fotodioda yang menghasilkan arus-tegangan (I-V) negatif pada perangkat sel surya. Bias balik (*reverse bias)* adalah posisi dimana terminal negatif dihubungkan dengan mayoritas pembawa adalah muatan positif *(hole)* yang pada sel surya ini adalah lapisan Spiro-OMeTAD dan terminal positif dihubungkan dengan sel mayoritas pembawa adalah muatan negatif *(electron)* yang pada sel surya ini adalah lapisan TiO_2. Sedangkan jika menghubungkan terminal negatif pada mayoritas pembawa negatif dan terminal positif pada mayoritas pembawa positif, rangkaian ini disebut sebagai bias maju *(forward bias).*

Tegangan tegangan *reverse bias* (bias balik) dan *forward bias* (bias maju) memberikan dampak yang berbeda pada rangkaian sel surya perovskite. Pada *reverse bias*, menyebabkan medan listrik alami pada dopan PN semakin besar yang menyebabkan daerah deplesi semakin lebar sehingga pembawa muatan *electron* dan *hole* pada daerah minoritas akan kembali pada daerah mayoritas dengan melintasi daerah difusi. Arus litrik dapat dihasilkan ketika cahaya foton diserap oleh material semikonduktor perovskite sehingga menimbulkan pemisahan eksiton *electron* dan *hole.* Arus listrik yang dihasilkan bergantung pada banyaknya *electron* dan *hole* pada daerah minoritas dan akan kembali pada daerah mayoritas sehingga muatan pembawa *electron* akan dikumpulkan pada terminal positif dan akan terjadi arus lisrik pada rangkaian sel surya. Lalu *electron* tersebut akan masuk kembali ke dalam daerah mayoritas pembawa muatan positif dan akan mengalami rekombinasi dengan *hole.* Proses ini akan terjadi berulang-ulang sampai Panjang umur pembawa muatan material perovskite. Sedangkan pada kondisi bias maju *(forward bias)* menyebabkan medan listrik yang dihasilkan pada sel surya semakin kecil dan arus difusi semakin besar yang memudahkan muatan pembawa pada daerah mayoritas dapat dengan mudah melewati daerah deplesi. Pada penerapan bias maju ini menyebabkan arus alami pada perangkat sel surya dapat terjadi meskipun pada kondisi gelap dengan penerapan tegangan eksternal. Hal ini dihindari pada perangkat sel surya menghasilkan daya ketika dalam kondisi gelap agar *lifetime* pembawa muatan pada material semikonduktor dapat bertahan lama.

Pada grafik yang terdapat pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa grafik arus dan densitas arus terhadap tegangan yang dihasilkan naik ketika dilakukan pengukuran tegangan mulai 1 V sampai 1,2 V. Pada kondisi aslinya pengukuran tegangan yang menghasilkan arus ini terjadi pada kondisi bias balik *(reverse bias)*. Hal ini menjelaskan pada kondisi tersebut menghasilkan daya arus-tegangan (I-V) dan densitas arus-tegangan (J-V) yang optimum pada perangkat sel surya.



Gambar 4. 5 Grafik variasi densitas muatan total dari Sel Surya Perovskite pada 300 K



Gambar 4. 6 Grafik densitas muatan berlebih dalam kesetimbangan dari Sel Surya Perovskite pada 300 K

Setelah didapatkan ketebalan optimal dari lapisan perovskite yang menghasilkan nilai efisiensi paling tinggi pada luas perangkat sel surya perovskite yaitu 0,09 cm^2 dengan masukan intensitas cahaya sebesar 100 mW/cm^2 dan parameter elektrik-optik yang telah dimasukkan. Terutama pada sel surya perovskite *electron* dan *hole* kedua berfungsi sebagai pembawa muatan agar dapat menghasilkan suatu energi listrik. Pergerakan *electron* dan *hole* dapat dianalisis pada grafik yang didapatkan pada Gambar 4.5 dan 4.6 masing-masing adalah grafik densitas muatan yang dihasilkan

terhadap rentang pengukuran tegangan yang dilakukan dan densitas muatan berlebih pada kesetimbangan sel surya perovskite.

Densitas muatan ini secara alami tanpa dipengaruhi oleh faktor eksternal dapat ditentukan oleh fluks foton dan energi foton. Fluks foton menentukan berapa banyak *electron* yang dapat dihasilkan ketika suatu cahaya dengan Panjang gelombang tertentu menabrak lapisan perovskite. Sehingga ketika fluks foton dikalikan dengan energi 1 foton dengan syarat energi foton harus lebih besar daripada energi gap dari material perovskite. Hubungan tersebut menghasilkan banyaknya densitas muatan yang terjadi pada rangkaian sel surya perovskite dalam satuan waktu. Densitas muatan ini menjelaskan tentang seberapa banyak jumlah foton yang menabrak permukaan perovskite dalam waktu tertentu.

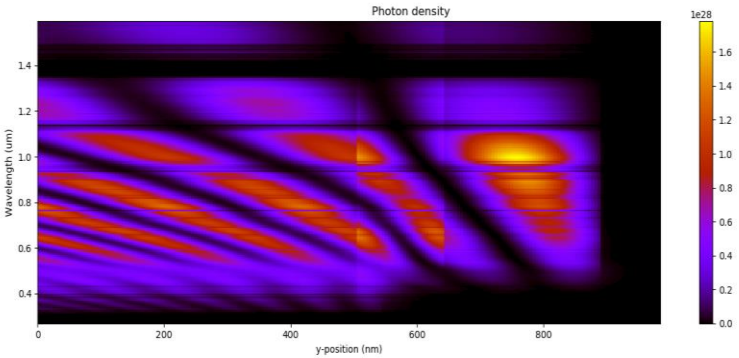
Pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa besar nilai tegangan optimum yang dihasilkan perangkat sel surya terdapat pada pengukuran tegangan sebesar 1,2 V menghasilkan densitas muatan yang dihasilkan semakin besar karena proses generasi dan rekombinasi muatan *electron* dan *hole* semakin tinggi. Generasi yang didapatkan pada sel surya perovskite dapat dinyatakan dengan *Generation rate*. *Generation rate* ini ditentukan dengan berapa banyak cahaya matahari yang serap oleh lapisan perovskite untuk dapat mengeksitasi *electron* pada lapisan perovskite untuk dapat menghasilkan arus listrik pada sel surya. Rekombinasi yang didapatkan dapat dinyatakan dengan *Recombination rate*. *Recombination rate* adalah proses dimana muatan *electron* kehilangan energi dengan mengeluarkan foton dan kembali stabil sehingga selanjutnya bergabung kembali dengan muatan *hole* di pita valensi. Proses generasi dan rekombinasi terjadi berulang-ulang untuk menghasilkan arus listrik.

4.1.4 Hasil Simulasi Optik pada Sel Surya Perovskite

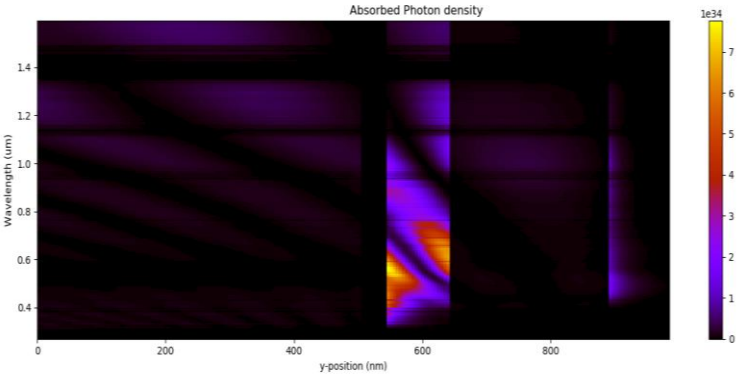
Hasil simulasi optic dengan menggunakan *software GPVDM*, dengan menggunakan susunan struktur lapisan sel surya perovskite antara lain yaitu FTO/TiO_2/Perovskite:$CH_3NH_3PbI_3$/Spiro-OMeTAD/Au (Wang et al., 2021). Sumber cahaya matahari yang

dimasukan pada simulasi bernilai AM1.5 atau sama dengan 1 intensitas cahaya matahari (100 mW/cm^2). Hasil simulasi optik ini dilakukan dengan menggunakan *software GPVDM* dengan menggunakan tools simulasi optik pada sel surya perovskite yang dilakukan. Simulasi optik yang dilakukan menampilkan transmisi cahaya optik dalam hal ini cahaya matahari yang ditransmisi masuk kedalam susunan sel surya perovskite. Transmisi cahaya yang masuk pada sel surya perovskite ditinjau dengan melihat panjang gelombang yang masuk dan diserap pada sel surya perovskite. Penyerapan cahaya matahari dapat diketahui dari sebelumnya bahwa penyerapan cahaya matahari berada pada rentang Panjang 550 nm – 650 nm.

Selanjutnya hasil dari simulasi optik pada sel surya perovskite di ilustrasikan dengan spektrum intensitas cahaya yang masuk pada lapisan sel surya perovskite seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.7, spektrum foton yang diserap pada lapisan sel surya perovskite yang terdapat pada Gambar 4.8. Pada gambar tersebut menampilkan secara jelas ilustrasi energi foton yang masuk ke lapisan sel surya perovskite secara 2D pada Gamvar 4.7 dan Gambar 4.8.

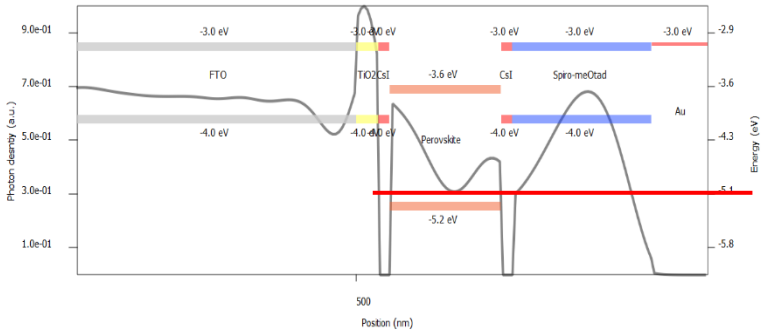


Gambar 4. 7 Spektrum Intensitas Cahaya yang Masuk pada Lapisan Sel Surya Perovskite



Gambar 4. 8 Spektrum Foton yang diserap pada Lapisan Sel Surya Perovskite dengan penambahan *double layer CsI* diatas dan bawah lapisan perovskite

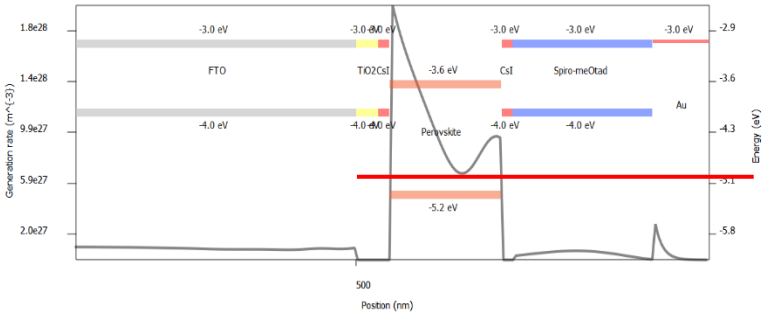
Spektrum distribusi densitas foton tingkat energi dari sel surya perovskite pada susunan lapisan sel surya perovskite yang dapat dilihat pada Gambar 4.9. Gambar tersebut menunjukkan banyaknya densitas foton yang masuk pada lapisan sel surya perovskite dengan panjang gelombang sinar matahari yang mempengaruhi tingkat energi yang dihasilkan oleh sel surya perovskite. Pada Gambar 4.9 menampilkan distribusi foton pada penambahan *double layer CsI* pada lapisan perovskite dan dapat dilihat pada gambar tersebut ketika semakin tinggi densitas foton yang diserap menghasilkan *energy level* yang semakin tinggi. Penyerapan densitas foton tertinggi terdapat pada cahaya matahari dengan panjang gelombang 550 nm – 650 nm. Pada Gambar 4.9 memperlihakan bagaimana suatu densitas foton yang melewati masing-masing lapisan sel surya perovskite dengan meninjau pada *energy level* distrubusi foton yang masuk. Densitas foton yang semakin tinggi menjelaskan bahwa semakin besar serapan foton pada material perovskite sehingga menyebabkan *energy level* pada perangkat sel surya semakin besar. Hal ini berdampak pada besarnya efisiensi perangkat sel surya perovskite.



Gambar 4. 9 Spektrum Tingkat Energi dari Sel Surya Perovskite Distribusi Densitas Foton pada penambahan double layer CsI diatas dan bawah lapisan perovskite

Pada grafik yang didapatkan pada Gambar 4.10 adalah grafik hubungan distribusi foton yang masuk pada lapisan sel surya perovskite dengan *energy level* dan *generatin rate*. *Generation rate* yang terjadi pada sel surya perovskite tersebut ketika sel surya perovskite disimulasikan dengan diberikan intensitas cahaya matahari sebesar 1 intensitas cahaya matahari yang terdiri dari berbagai macam panjang gelombang. Pada grafik tersebut dapat dilihat, bahwa *generation rate* yang terbaik terjadi pada kisaran Panjang gelombang 550 nm – 650 nm. Jadi dapat dikatakan bahwa pada rangkaian sel surya perovskite intensitas cahaya matahari yang paling banyak diserap oleh lapisan perovskite adalah cahaya matahari pada rentang Panjang gelombang 550 nm – 650 nm. Sehingga menghasilkan *generation rate electron* dan *generation rate hole* yang terjadi pada simulasi sel surya perovskite pada rentang panjang gelombang 550 nm – 650 nm. Terdapat sedikit lonjakan grafik yang terlihat pada panjang gelombang 900 nm itu disebabkan karena cahaya masuk pada lapisan elektroda Au yang dimana difungsikan sebagai kontak pada simulasi sel surya perovkite kali ini. Grafik yang terdapat pada Gambar 4.10 merupakan susunan sel surya perovskite dengan penambahan

double layer CsI diatas dan dibawah lapisan perovskite. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa dengan penambahan *double layer CsI* diatas dan dibawah lapisan perovskite membutuhkan *energy level* yang lebih rendah untuk melakukan proses *generation electron* dan *hole* pada lapisan perovskite.



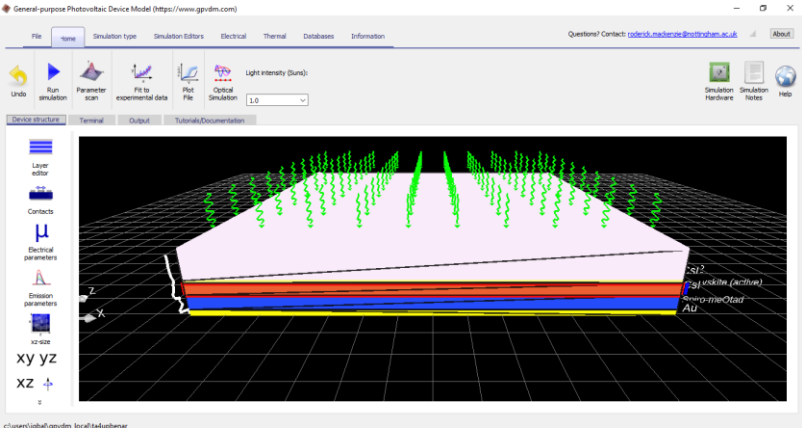
Gambar 4. 10 Generation Rate Pergerakan Pembawa Muatan pada Lapisan Ketebalan Material Perovskite pada penambahan double layer CsI diatas dan bawah lapisan perovskite

4.2 Simulasi *Double Layer* CsI – Perovskite pada Sel Surya Perovskite

Simulasi *Double Layer* Perovskite – CsI pada sel surya perovskite telah dilakukan dengan menggunakan *software GPVDM*. Simulasi ini dilakukan berdasarkan dari penelitian yang dilakukan oleh Wang dkk tentang interkalasi *double layer* CsI pada lapisan perovskite $CH_3NH_3PbI_3$ untuk mencapai efisiensi dan stabilitas yang tinggi pada sel surya perovskite. Simulasi penambahan *double layer CsI* ini mengacu pada penelitian proses fabrikasi sel surya perovskite yang sebelumnya telah dilakukan oleh Wang dkk pada tahun 2021. Sehingga dengan penelitian tugas akhir ini dilakukan pensimulasian sel surya perovskite dengan acuan proses fabrikasi yang telah dilakukan sebelumnya untuk dapat menghasilkan efisiensi dengan stabilitas (Wang et al., 2021).

4.2.1 Desain Susunan *Double Layer* Lapisan Sel Surya Perovskite

Pada modul sel surya perovskite selanjutnya dilakukan penyusunan masing-masing komponen lapisan pada sel surya perovskite. Penyusunan lapisan sel surya perovskite yang dilakukan hampir sama dengan lapisan sel surya perovskite dengan *single layer*. Pada lapisan sel surya perovskite dengan *double layer* Perovskite – CsI ini dilakukan penyusunan dengan menambahkan lapisan CsI pada permukaan atas atau/dan bawah lapisan perovskite aktif susunan lapisan sel surya perovskite pada simulasi dapat dilihat pada lembar lampiran tugas akhir ini.



Gambar 4. 11 Tampilan ukuran susunan lapisan sel surya perovskite double layer dengan menggunakan software GPVDM

Susunan lapisan sel surya perovskite dengan menggunakan *double layer* CsI – Perovskite dilakukan dengan dasar penyusunan dan parameter yang sama seperti pada penyusunan lapisan sel surya perovskite tanda penambahan *double layer* CsI – Perovskite. Perbedaannya hanya terdapat pada penambahan lapisan tipis CsI pada permukaan atas dan bawah material perovskite dengan

ketebalan lapisan CsI 2 – 20 nm. Susunan sel surya perovskite pada simulasi dapat dilihat pada lembar lampiran tugas akhir ini.

4.2.2 Pengaruh Penambahan *Double Layer* Perovskite – CsI pada Lapisan Sel Surya Perovskite

Hasil yang didapatkan dari pemberian penambahan *double layer* perovskite – CsI pada simulasi sel surya perovskite dengan variasi penambahan lapisan CsI di permukaan atas, permukaan bawah dan permukaan atas bawah pada material perovskite aktif pada simulasi sel surya perovskite. Simulasi *double layer* sel surya perovskite dilakukan dengan parameter elektrik dan susunan lapisan FTO/TiO_2/Perovskite:$CH_3NH_3PbI_3$/Spiro-OMeTAD/Au sama dengan lapisan sel surya perovskite tanpa penambahan CsI yang menghasilkan nilai efisiensi paling tinggi yaitu dengan menggunakan ketebalan lapisan perovskite aktif adalah 200 nm dengan menghasilkan PCE sebesar 17,22%. Serta digunakan parameter umum seperti yang terdapat pada Tabel 3.2. Simulasi *double layer* sel surya perovskite dilakukan dengan variasi lapisan CsI yaitu mulai dari 2 – 20 nm.Hasil yang didapatkan pada simulasi *double layer* sel surya perovskite dapat dilihat pada Tabel 4.2 – 4.4.

Tabel 4. 2 Parameter elektrik hasil simulasi double layer CsI di atas pada lapisan perovskite.

Ketebalan (nm)	Jsc (mA/cm^{-2})	Voc (Volts)	FF (a.u.)	PCE (%)
2,00	24,150	0,86	85,46	17,81
4,00	23,719	0,86	85,40	17,48
6,00	23,346	0,86	85,34	17,18
8,00	22,976	0,86	85,28	16,89
10,00	22,421	0,86	85,18	16,45
12,00	23,248	0,86	85,32	17,10
14,00	22,231	0,86	85,15	16,31
16,00	21,884	0,86	85,08	16,03
18,00	21,542	0,86	85,04	15,77
20,00	21,196	0,86	85,06	15,51

Tabel 4. 3 Parameter elektrik hasil simulasi double layer CsI di bawah pada lapisan perovskite

Ketebalan (nm)	Jsc (mA/cm^{-2})	Voc (Volts)	FF (a.u.)	PCE (%)
2,00	24,269	0,86	84,44	17,62
4,00	23,498	0,86	84,42	17,05
6,00	23,851	0,86	84,42	17,31
8,00	24,201	0,86	84,40	17,56
10,00	24,543	0,86	83,68	17,61
12,00	24,848	0,86	83,68	17,61
14,00	23,218	0,86	84,46	16,85
16,00	23,563	0,86	84,45	17,10
18,00	23,905	0,86	84,44	17,35
20,00	23,173	0,86	84,43	16,81

Tabel 4. 4 Parameter elektrik hasil simulasi double layer CsI di atas dan bawah pada lapisan perovskite

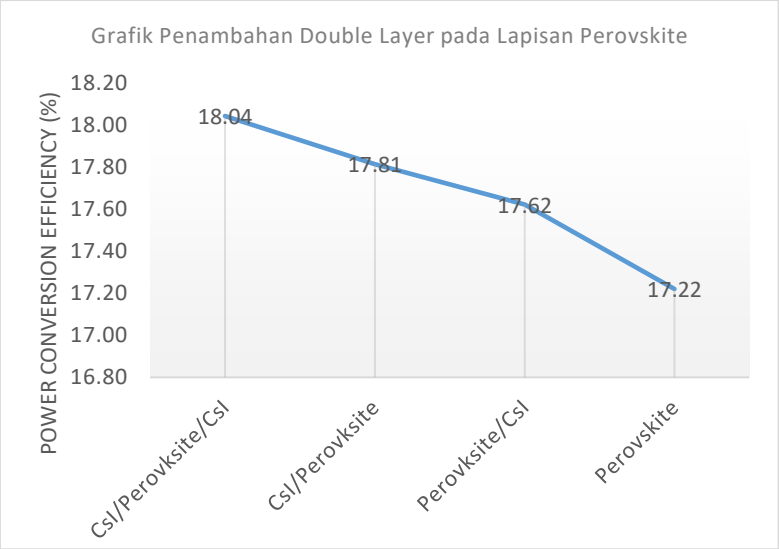
Ketebalan (nm)	Jsc (mA/cm^{-2})	Voc (Volts)	FF (a.u.)	PCE (%)
2,00	24,441	0,86	85,50	18,04
4,00	24,407	0,86	85,50	18,02
6,00	24,163	0,86	85,47	17,83
8,00	23,637	0,86	85,40	17,41
10,00	23,595	0,86	85,40	17,38
12,00	22,384	0,86	85,21	16,43
14,00	22,319	0,86	85,20	16,38
16,00	22,267	0,86	85,19	16,34
18,00	20,845	0,86	85,10	15,26
20,00	20,758	0,86	85,11	15,19

Dari hasil parameter elektrik yang didapatkan dari masing-masing variasi penambahan CsI pada lapisan perovskite aktif yaitu CsI di

atas yang terdapat pada Tabel 4.2 , CsI di bawah yang terdapat pada Tabel 4.3 dan CsI di atas dan bawah pada lapisan perovskite aktif yang dilakukan pada simulasi sel surya perovskite dengan menggunakan *software GPVDM*. Hasil yang didapatkan dari simulasi yang sudah dijalankan, untuk penambahan *double layer* CsI pada bagian atas lapisan perovskite aktif nilai efisiensi yang paling tinggi terdapat pada ketebalan CsI 2 nm yaitu 17,81 %. Pada penambahan *double layer* CsI pada bagian bawah lapisan perovskite aktif nilai efisiensi yang paling tinggi pada ketebalan 2 nm yaitu 17,62 %. Terakhir, pada susunan penambahan *double layer* CsI pada bagian atas dan bawah lapisan perovskite aktif nilai efisiensi yang paling tinggi terdapat pada ketebalan CsI 2 nm yaitu 18,04%.

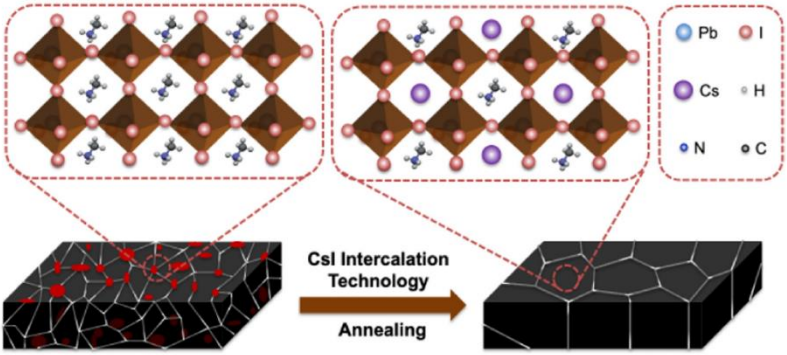
Hasil yang didapatkan tersebut kurang lebih sama dengan hasil fabrikasi yang dilakukan oleh Wang dkk tentang penelitian *double layer* interkalasi CsI – Perovskite untuk mencapai tingkat efisiensi dan stabilitas tinggi pada sel surya perovskite. Hasil yang didapatkan pada fabrikasi *double layer* sel surya perovskite menghasilkan nilai efisiensi yang paling tinggi berturut – turut yaitu dengan memberikan penambahan CsI pada bagian atas dan bawah lapisan perovskite aktif yaitu 18,04%, lalu pada bagian atas lapisan perovskite aktif yaitu 17,81% dan pada bagian bawah lapisan perovskite aktif yaitu 17,62%. Sedangkan pada hasil simulasi *double layer* sel surya perovskite, menghasilkan nilai efisiensi yang paling tinggi berturut – turut yaitu dengan memberikan penambahan CsI pada bagian atas dan bawah lapisan perovskite aktif yaitu 18,04%, lalu pada bagian atas lapisan perovskite aktif yaitu 17,81% dan pada bagian bawah lapisan perovskite aktif yaitu 17,62%. Meskipun hasil yang didapatkan tidak secara keseluruhan sama persis antara hasil fabrikasi dan simulasi yang dilakukan. Tetapi hasil tersebut didapatkan dengan pola yang sama antara penambahan *double layer* sel surya perovskite yaitu berturut-turut penambahan lapisan dengan efisiensi tertinggi dengan melakukan penambahan pada bagian atas/bawah, atas, dan bawah lapisan CsI pada lapisan perovskite

aktif pada sel surya perovskite. Grafik pengaruh penambahan *double layer CsI* pada simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.14.



Gambar 4. 12 Grafik pengaruh penambahan *double layer CsI* pada simulasi dengan *software* GPVDM

Faktor yang mempengaruhi pada *double layer* CsI - Perovskite sel surya perovskite ini adalah karena dengan dilakukan substitusi material CsI pada permukaan lapisan perovskite pada bagian atas, bawah dan atas-bawah. Molekul radius *ionic* dari kation Cs^+ memiliki ukuran yang lebih kecil yaitu (1,81 Å) dari ukuran molekul CH_3NH_3 (MA) yaitu (2,70 Å). Hal ini yang menyebabkan lapisan CsI dapat terinterkalasi pada permukaan lapisan perovskite dan membentuk lapisan kubik-oktahedral pada material perovskite. Kation Cs^+ disubstitusikan pada permukaan perovskite tanpa merubah struktur dasar kristal dari lapisan perovskite . Substitusi dari molekul atom material CsI pada permukaan material perovskite aktif dapat dilihat seperti pada Gambar 4.15 ilustrasi interkalasi molekul atom CsI pada permukaan lapisan perovskite aktif.



Gambar 4. 13 Diagram indikasi perubahan struktur kristal pada permukaan perovskite aktif dengan penambahan lapisan CsI (Wang et al., 2021)

Dari Gambar 4.17 dapat dilihat pengaruh penambahan lapisan CsI pada permukaan lapisan perovskite aktif pada sel surya perovskite. Penambahan lapisan CsI dapat dilihat pada gambar tersebut molekul atom kation Cs^+ non polar disubstitusikan kedalam CH_3NH_3 (MA) polar pada struktur kristal material sel surya perovskite. Hal ini berpengaruh pada pengurangan distorsi sepanjang sumbu C pada struktur molekul PbI_6. Kation Cs^+ tersebut juga mempengaruhi energi ikat pada Pb dan I. Secara umum ketika menambahkan *double layer* CsI pada material perovskite aktif akan mendoping struktur kristal kation perovskite yaitu $CH_3NH_3^+$ dengan disubstitusikannya molekul Cs^+ yang memiliki ukuran yang lebih kecil ke dalam struktur atom perovskite. Sehingga hal tersebut akan meningkatkan ukuran kisi (grain) dan mengurangi celah struktur kristal *(grain boundary)* pada kristal perovskite yang masuk kedalam sela-sela kisinya tanpa merubah struktur dasar kristal perovskite seperti yang terdapat pada Gambar 4.17. Semakin kecilnya celah struktur kristal *(grain boundary)* dengan semakin besarnya ukuran grain struktur kristal

perovskite akan memudahkan proses eksitasi dan ionisasi muatan pada material perovskite aktif.

Selain itu penambahan lapisan CsI pada material perovskite diketahui dapat berpengaruh pada densitas perangkap *(trap density)* dari material perovskite dengan proses terjadinya interkalasi *double layer* CsI tersebut nilai *trap density* berkurang menjadi setengah dari aslinya yang dipengaruhi oleh pendopinga struktur kristal kation pada material perovskite. Pengurangan nilai *trap density* ini menjelaskan mengapa proses *generation* pada penambahan *double layer CsI* dapat terjadi dengan *energy level* yang rendah dan meningkatkan struktur kristal lapisan perovskite. Sehingga hal ini memberikan pengaruh pada masa pakai pembawa muatan yang lebih lama dibandingkan dari yang sebelumnya (Wang et al., 2021).

4.3 Perbandingan Hasil Simulasi GPVDM dengan Hasil Fabrikasi pada Sel Surya Perovskite

Hasil yang didapatkan dari simulasi dengan *software GPVDM* dan hasil fabrikasi yang telah dilakukan didapatkan seperti yang terlihat pada Tabel 4.5 untuk hasil simulasi dengan menggunakan *software GPVDM* dan Tabel 4.6 untuk hasil fabrikasi. Parameter umum yang dimasukkan pada simulasi dan diterapkan pada proses fabrikasi *double layer* sel surya perovskite adalah sama. Seperti yang terdapat pada Tabel 3.2 yaitu untuk ukuran yang digunakan adalah seluas 0,09 cm^2, intensitas cahaya yang digunakan adalah 100 mW/m^3 (sama dengan 1 intensitas cahaya), pengukuran tegangan yang digunakan pada sel surya perovskite mulai dari -0,2 sampai 1,2 Volt, dan kelembapan kondisi lingkungan pada sel surya perovskite sebesar 300 K. Perbandingan hasil antara simulasi dan fabrikasi ini didasari dari penelitian yang dilakukan oleh Wang dkk tentang pembuatan *double layer* CsI - Perovskite sel surya perovskite untuk menghasilkan efisiensi dan stabilitas tinggi. Hasil yang didapatkan dari fabrikasi yang telah dilakukan tersebut selanjutnya pada tugas akhir ini dibuatkan sebuah simulasi *double*

layer CsI – Perovskite sel surya perovskite dengan menggunakan *software* GPVDM.

Tabel 4. 5 Hasil Parameter Fotovoltaik pada Simulasi Double Layer CsI Sel Surya Perovskite

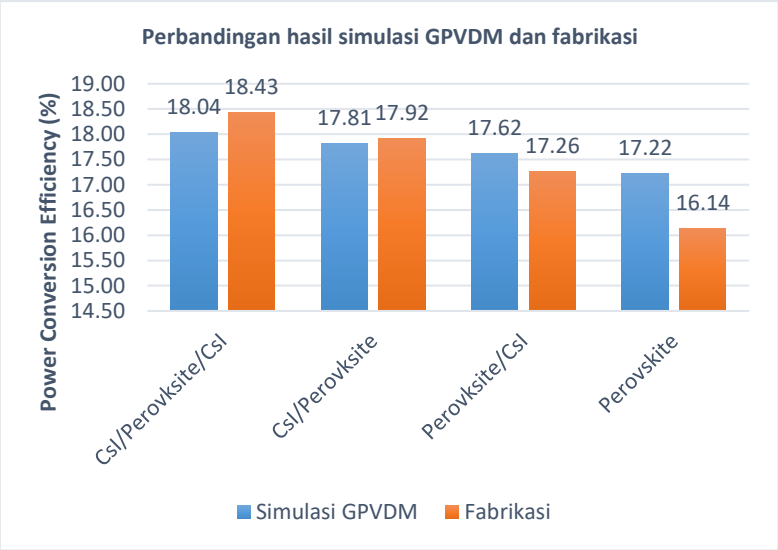
Material	Jsc (mA/cm^{-2})	Voc (Volts)	FF (a.u.)	PCE (%)
CsI/Perovskite/CsI	24,441	0,86	85,50	18,04
CsI/Perovskite	24,808	0,86	85,46	17,81
Perovskite/CsI	24,269	0,86	84,44	17,62
Perovskite	24,150	0,86	84,16	17,22

Tabel 4. 6 Hasil Parameter Fotovoltaik pada Fabrikasi Double Layer CsI Sel Surya Perovskite

Material	Jsc (mA/cm^{-2})	Voc (Volts)	FF (a.u.)	PCE (%)
CsI/Perovskite/CsI	23,90	1,04	74,00	18,43
CsI/Perovskite	23,57	1,04	73,00	17,92
Perovskite/CsI	23,17	1,04	72,00	17,26
Perovskite	22,93	1,02	69,00	16,14

Hasil yang didapatkan dari simulasi *double layer* CsI sel surya perovskite yang dilakukan dengan *software GPVDM* akan dibandingkan dengan hasil yang didapatkan pada proses fabrikasi *double layer* CsI sel surya perovskite yang telah dilakukan oleh Wang dkk. Pada hasil yang didapatkan dilakukan perbandingan hasil *Power Conversion Efficiency (PCE)* seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.15 grafik perbandingan antara hasil PCE *double layer* sel surya perovskite simulasi dengan menggunakan *software GPVDM* dengan hasil fabrikasi. Grafik perbandingan yang telah didapatkan tersebut dapat diketahui bahwa hasil yang didapatkan tidaklah sama persis antara hasil simulasi dan fabrikasi meskipun parameter utama yang dilakukan pada simulasi dan fabrikasi sama. Perbedaan ini disebabkan karena terdapat beberapa faktor lain

yang juga ikut menentukan hasil nilai efisiensi dari sel surya perovskite yang dilakukan. Faktor-faktor tersebut seperti kualitas masing-masing material yang digunakan pada proses fabrikasi, alat yang digunakan pada proses fabrikasi dan teknik pembuatan susunan lapisan *double layer* sel surya perovskite saat proses fabrikasi. Sedangkan pada simulasi dengan *software GPVDM* yang dijalankan berpengaruh dari parameter elektrik yang dimasukan pada pengaturan parameter untuk masing-masing material. Selain itu juga dapat disebabkan karena datasheet untuk parameter optik yaitu datasheet indeks bias (n), koefisien absorpsi (k) dan penyerapan (absorpsi) (α) cahaya untuk masing-masing material cukup berbeda serta pada simulasi ini pendopingan CsI disusun secara planar dipermukaan lapisan perovskite sedagkan pada proses fabrikasi masuk pada kisi-kisi kristal lapisan perovskite.



Gambar 4. 14 Grafik perbandingan hasil PCE double layer sel surya perovskite yang dilakukan dengan Simulasi GPVDM dan fabrikasi

Namun dari hasil yang telah didapatkan seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.15 grafik perbandingan antara hasil simulasi dan fabrikasi memiliki pola yang sama. Hasil simulasi paling tinggi terdapat pada *double layer* sel surya perovskite dengan susunan lapisan *double layer* CsI/Perovskite/CsI dengan nilai sebesar 18,04% dan pada hasil fabrikasi nilai efisiensi paling tinggi juga terdapat pada susunan lapisan *double layer* CsI/Perovskite/CsI dengan nilai sebesar 18,43%. Efisiensi tertinggi kedua hasil efisiensi tertinggi pada simulasi didapatkan pada susunan *double layer* CsI/Perovskite dengan nilai sebesar 17,83% dan pada hasil fabrikasi juga sama nilai efisiensi tertinggi terdapat pada CsI yang diletakkan di bagian atas material perovskite dengan nilai efisiensi sebesar 18,92%. Sedangkan pada nilai efisiensi ketiga pada simulasi didapatkan dengan susunan *double layer* CsI diletakkan di bawah lapisan perovskite dengan nilai efisiensi yang dihasilkan sebesar 17,62% dan pada hasil fabrikasi didapatkan pada susunan lapisan *double layer* yang sama CsI diletakkan di bagian bawah material perovskite dengan nilai efisiensi sebesar 17,26%. Terakhir, pada sel surya perovskite tanpa dilakukan penambahan pada CsI pada material perovskite aktif. Hasil yang didapatkan dari simulasi didapatkan nilai efisiensi sebesar 17,22% sedangkan pada hasil fabrikasi dengan perovskite murni didapatkan nilai efisiensi sebesar 16, 12%.

Validasi dilakukan untuk dapat mengetahui seberapa besar validasi antara data yang didapatkan pada simulasi dengan fabrikasi. Penghitungan nilai *error* dan keseksamaan dilakukan agar diketahui seberapa besar nilai *error* dan keseksamaan antara simulasi dan fabrikasi agar dapat menyatakan data yang didapatkan dari hasil simulasi telah tervalidasi dari data yang didapatkan dari proses fabrikasi. Perhitungan validasi ini dilakukan agar hasil yang didapatkan pada proses pembuatan simulasi sel surya perovskite sesuai dengan kondisi yang sebenarnya. Hal ini dilakukan untuk dapat menentukan proses simulasi sel surya perovskite dengan penentuan parameter-parameter yang sesuai dengan kondisi sebenarnya untuk dapat memodelkan sel surya perovskite.

Perhitungan rata – rata data hasil simulasi dan fabrikasi :

$$\overline{X_{sim}} = \frac{\sum x}{n}$$

$$\overline{X_{sim}} = \frac{18{,}04 + 17{,}81 + 17{,}62 + 17{,}22}{4}$$

$$\overline{X_{sim}} = 17{,}673\%$$

$$\overline{X_{fab}} = \frac{18{,}43 + 17{,}92 + 17{,}26 + 16{,}14}{4}$$

$$\overline{X_{fab}} = 17{,}438\%$$

Nilai Error :

$$\left| Error = \frac{\overline{X_{sim}} - \overline{X_{fab}}}{\overline{X_{fab}}} \right| \times 100\%$$

$$\left| Error = \frac{17{,}673 - 17{,}438}{17{,}438} \right| \times 100\%$$

$$Error = 1{,}348\%$$

Nilai Keseksamaan :

$$Keseksamaan = 100\% - Error$$

$$Keseksamaan = 100\% - 1{,}348\%$$

$$Keseksamaan = 98{,}65\%$$

Dari hasil perhitungan *error* dan keseksamaan antara simulasi dan fabrikasi didapatkan nilai *error* sebesar 1,348% dan nilai keseksamaan sebesar 98,65%. Hasil perhitungan *error* dan keseksamaan membuktikan bahwa nilai *error* yang didapatkan tidak sampai lebh dari 3% sehingga hasil simulasi yang dilakukan cukup valid dari fabrikasi yang telah dilakukan sebelumnya.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini antara lain :

1. Pembuatan simulasi sel surya perovskite dilakukan menggunakan *software General-purpose Photovoltaic Device Model* (GPVDM) 7.88.027. Susunan simulasi sel surya perovskite yang menghasilkan nilai efisiensi paling tinggi terdapat pada FTO/TiO_2/CsI/Perovskite/CsI/Spiro-OMeTAD/Au dengan nilai efisiensi paling tinggi sebesar 18,04%.
2. Berdasarkan hasil yang didapatkan pada simulasi *double layer* sel surya perovskite dengan melakukan penambahan CsI pada lapisan perovskite menghasilkan efisiensi dengan stabilitas yang tinggi pada sel surya perovskite. Penambahan lapisan CsI di atas dan bawah, di atas, di bawah dan tanpa penambahan CsI pada lapisan perovskite aktif nilai stabilitas dengan efisiensi paling tinggi berturut-turut adalah 18,04% ; 17,81% ; 17,62% ; 17,22%.
3. Perbandingan hasil *Power Conversion Efficiency (PCE)* antara hasil simulasi dan fabrikasi didapatkan error sebesar 1,35% dan tingkat keseksamaan sebesar 98,65%.

5.2 Saran

Berdasarkan simulasi dan hasil penelitian yang telah dilakukan pada tugas akhir ini terdapat banyak hal yang belum dilakukan. Sehingga terdapat beberapa saran untuk perbaikan pada penelitian selanjutnya. Saran tersebut antara lain:

1. Penelitian dengan simulasi fotovoltaik dengan menggunakan *software GPVDM* dalam membuat model sel surya perovskite untuk dapat menghasilkan efisiensi tinggi dapat dilakukan dengan menerapkan parameter lain

selain ketebalan dan susunan lapisan sel surya untuk dapat menghasilkan nilai efisien yang lebih tinggi.

2. Simulasi dapat dilakukan dengan merubah material yang digunakan pada struktur perovskite. Seperti memberikan material lain sebagai *Electron Transport Materal* (ETM) atau *Hole Transport Material* (HTM) berdasarkan dari hasil fabrikasi yang menghasilkan nilai efisiensi yang paling tinggi.
3. Simulasi dapat dilakukan dengan memberikan parameter elektrik-optik yang berbeda agar dapat mencapai nilai efisiensi optimum. Seperti dapat memberikan pengaruh mobilitas muatan *electron* dan *hole* pada lapisan perovskite untuk dapat menghasilkan energi yang lebih besar lagi pada sel surya perovskite.
4. Simulasi dapat dilakukan dengan menambahkan susunan lapisan sel surya perovskite dengan menambahkan susunan lapisan sel surya menjadi dua atau disebut sebagai sel surya *tandem layer*.
5. Simulasi GPVDM dapat dikembangkan kembali dengan melakukan pengembangan pada *source code* yang menyusun dan menjalankan simulasi GPVDM ini. Pengembangan *software* tersebut dapat dilakukan untuk dapat menambahkan hasil simulasi yang diinginkan.

DAFTAR PUSTAKA

Berhe, T.A., Su, W.-N., Chen, C.-H., Pan, C.-J., Cheng, J.-H., Chen, H.-M., Tsai, M.-C., Chen, L.-Y., Dubale, A.A., Hwang, B.-J., 2016. Organometal halide perovskite solar cells: degradation and stability. Energy Environ. Sci. 9, 323–356. https://doi.org/10.1039/C5EE02733K

Bragagnolo, J.A., Barnett, A.M., Phillips, J.E., Hall, R.B., Rothwarf, A., Meakin, J.D., 1980. The design and fabrication of thin-film CdS/Cu_2S cells of 9.15-percent conversion efficiency. IEEE Trans. Electron Devices 27, 645–651. https://doi.org/10.1109/T-ED.1980.19917

Energi dan Sumber Daya Mineral, Kementrian, "Matahari untuk PLTS di Indonesia", https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/matahari-untuk-plts-di-indonesia, diakses 16 Februari 2021.

Hu, Q., Wu, J., Jiang, C., Liu, T., Que, X., Zhu, R., Gong, Q., 2014. Engineering of Electron-Selective Contact for Perovskite Solar Cells with Efficiency Exceeding 15%. ACS Nano 8, 10161–10167. https://doi.org/10.1021/nn5029828

Janaloka, "Sejarah Teknologi Panel Surya", https://janaloka.com/sejarah-teknologi-panel-surya/, diakses Maret 2021.

Kumar Mishra, A., Shukla, R.K., 2020. Electrical and optical simulation of typical perovskite solar cell by GPVDM software. Mater. Today Proc. S221478532038994X. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.376

Li, C., Soh, K.C.K., Wu, P., 2004. Formability of ABO3 perovskites. J. Alloys Compd. 372, 40–48. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2003.10.017

Lun, S., Du, C., Yang, G., Wang, S., Guo, T., Sang, J., Li, J., 2013. An explicit approximate I–V characteristic model of a solar cell based on padé approximants. Sol. Energy 92, 147–159. https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.02.021

MacKenzie, R.C.I., Shuttle, C.G., Chabinyc, M.L., Nelson, J., 2012. Extracting Microscopic Device Parameters from Transient Photocurrent Measurements of P3HT:PCBM Solar Cells. Adv. Energy Mater. 2, 662–669. https://doi.org/10.1002/aenm.201100709

Marchioro, A., Teuscher, J., Friedrich, D., Kunst, M., van de Krol, R., Moehl, T., Grätzel, M., Moser, J.-E., 2014. Unravelling the mechanism of photoinduced charge transfer processes in lead iodide perovskite solar cells. Nat. Photonics 8, 250–255. https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.374

Mardatila, Ani, "7 Jenis Energi Terbarukan, yang Dapat Menjadi Alternatif di Masa Depan", https://www.merdeka.com/sumut/7-jenis-energi terbarukan-yang-dapat-menjadi-alternatif-di-masa-depan-kln.html, diakses 16 Februari 2021.

Ossila, "Solar Cells: A Guide to Theory and Measurement", https://www.ossila.com/pages/solar-cells theory#:~:text=The%20key%20characteristic%20of%20a,(IV)%20measurements%20are%20performed, diakses 3 April 2021.

Pribadi, Agung, "Hingga Juni 2020, Kapasitas Pembangkit di Indonesia 71 GW", https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/hingga-juni-2020-kapasitas-pembangkit-di-indonesia-71-gw, diakses 16 Februari 2021.

Service, R.F., 2014. Perovskite Solar Cells Keep On Surging. Science 344, 458–458. https://doi.org/10.1126/science.344.6183.458

Shafiee, S., Topal, E., 2009. When will fossil fuel reserves be diminished? Energy Policy 37, 181–189. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.08.016

Snaith, H.J., 2013. Perovskites: The Emergence of a New Era for Low-Cost, High-Efficiency Solar Cells. J. Phys. Chem. Lett. 4, 3623–3630. https://doi.org/10.1021/jz4020162

Sze, S.M., Lee, M.K., 2012. Semiconductor devices, physics and technology, 3rd ed. ed. Wiley, Hoboken, N.J.

Villalva, M.G., Gazoli, J.R., Filho, E.R., 2009. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. IEEE Trans. Power Electron. 24, 1198–1208. https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2013862

Wã, P., n.d. Physics of Solar Cells 289.

Wang, J., Zhang, J., Zhou, Y., Liu, H., Xue, Q., Li, X., Chueh, C.-C., Yip, H.-L., Zhu, Z., Jen, A.K.Y., 2020. Highly efficient all-inorganic perovskite solar cells with suppressed non-radiative recombination by a Lewis base. Nat. Commun. 11, 177. https://doi.org/10.1038/s41467-019-13909-5

Wang, L., Shahiduzzaman, Md., Muslih, E.Y., Nakano, M., Karakawa, M., Takahashi, K., Tomita, K., Nunzi, J.M., Taima, T., 2021. Double-layer CsI intercalation into an MAPbI3 framework for efficient and stable perovskite solar cells. Nano Energy 86, 106135. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106135

Wang, Z.L., Kang, Z.C., Uchino, K., 1998. *Functional and Smart Materials: Structural Evolution and Structure Analysis*. Phys. Today 51, 70–71. https://doi.org/10.1063/1.882083

Wei, R., n.d. Modelling of Perovskite Solar Cells 81.

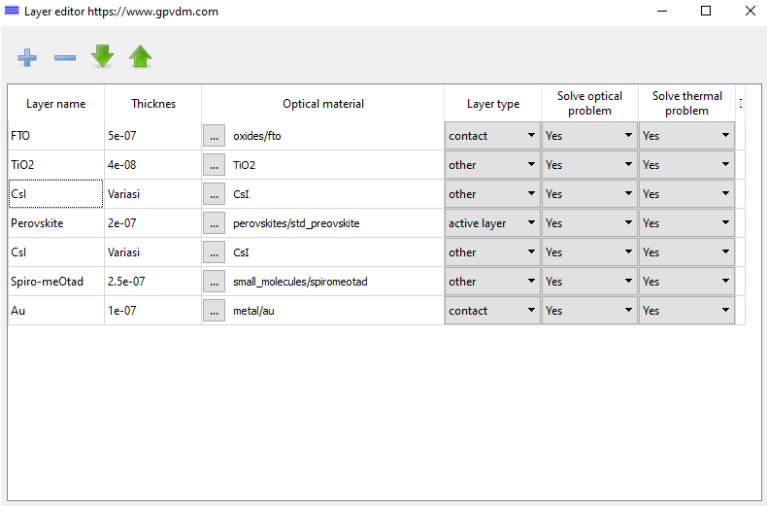
World Energy Council, 2016. editor. World Energy Resources 2016 Survey. World Energy Council. https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-resources-2016, diakses Maret 2021.

Zhou, W., Zhao, Yicheng, Zhou, X., Fu, R., Li, Q., Zhao, Yao, Liu, K., Yu, D., Zhao, Q., 2017. Light-Independent Ionic Transport in Inorganic Perovskite and Ultrastable Cs-Based Perovskite Solar Cells. J. Phys. Chem. Lett. 8, 4122–4128. https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.7b01851

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

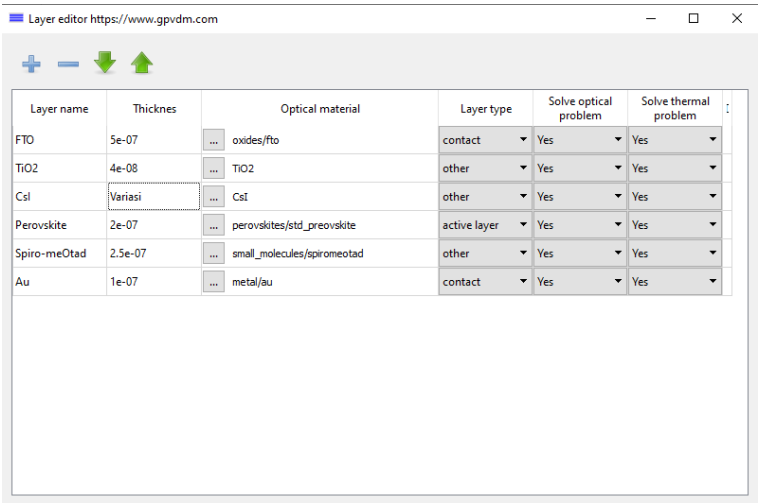
LAMPIRAN

Susunan lapisan sel surya perovskite pada simulasi GPVDM



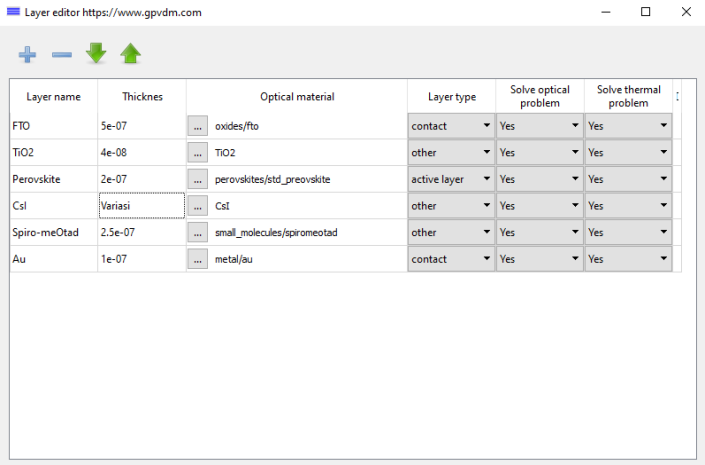
Layer name	Thicknes	Optical material	Layer type	Solve optical problem	Solve thermal problem
FTO	5e-07	oxides/fto	contact	Yes	Yes
TiO2	4e-08	TiO2	other	Yes	Yes
CsI	Variasi	CsI	other	Yes	Yes
Perovskite	2e-07	perovskites/std_preovskite	active layer	Yes	Yes
CsI	Variasi	CsI	other	Yes	Yes
Spiro-meOtad	2.5e-07	small_molecules/spiromeotad	other	Yes	Yes
Au	1e-07	metal/au	contact	Yes	Yes

Double layer CsI diatas dan dibawah lapisan perovskite



Layer name	Thicknes	Optical material	Layer type	Solve optical problem	Solve thermal problem
FTO	5e-07	oxides/fto	contact	Yes	Yes
TiO2	4e-08	TiO2	other	Yes	Yes
CsI	Variasi	CsI	other	Yes	Yes
Perovskite	2e-07	perovskites/std_preovskite	active layer	Yes	Yes
Spiro-meOtad	2.5e-07	small_molecules/spiromeotad	other	Yes	Yes
Au	1e-07	metal/au	contact	Yes	Yes

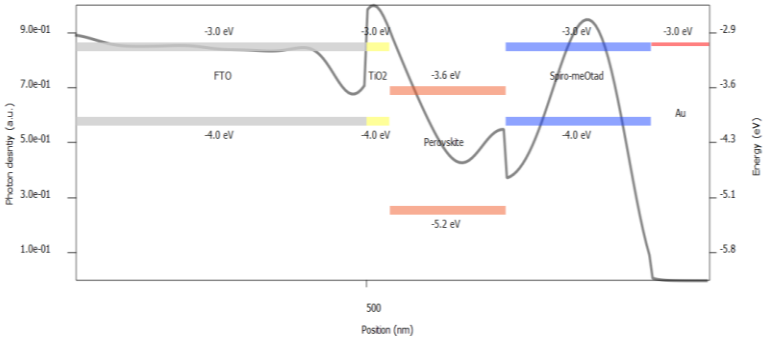
Double layer CsI diatas lapisan perovskite



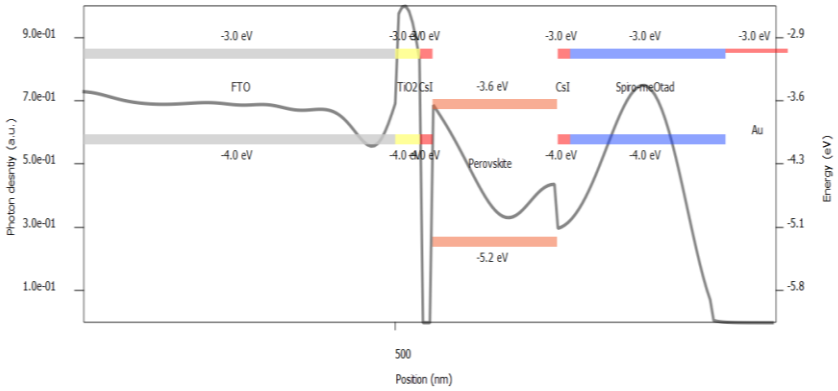
Layer name	Thicknes	Optical material	Layer type	Solve optical problem	Solve thermal problem
FTO	5e-07	oxides/fto	contact	Yes	Yes
TiO2	4e-08	TiO2	other	Yes	Yes
Perovskite	2e-07	perovskites/std_preovskite	active layer	Yes	Yes
CsI	Variasi	CsI	other	Yes	Yes
Spiro-meOtad	2.5e-07	small_molecules/spiromeotad	other	Yes	Yes
Au	1e-07	metal/au	contact	Yes	Yes

Double layer CsI dibawah lapisan perovskite

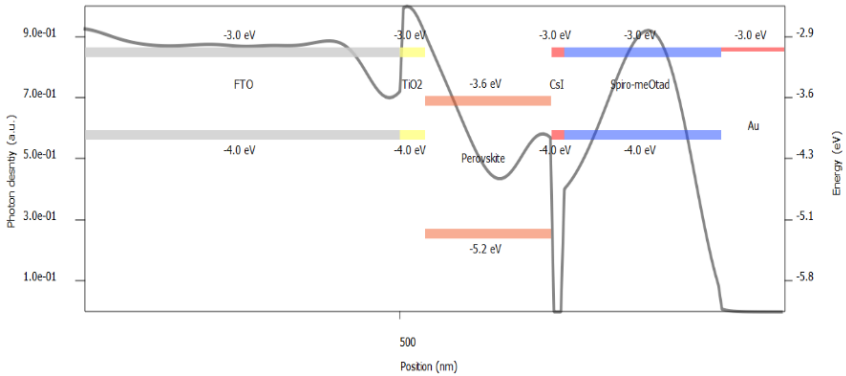
Distribusi densitas foton pada lapisan sel surya perovskite



Distribusi densitas foton pada lapisan sel surya perovskite tanpa penambahan *double layer CsI*

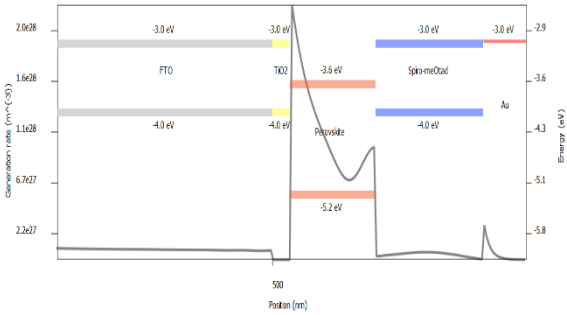


Distribusi densitas foton pada lapisan sel surya perovskite dengan penambahan *double layer CsI* diatas

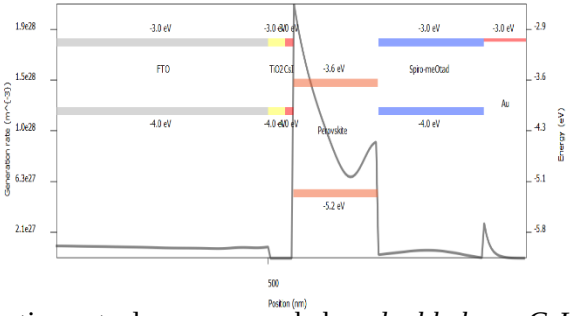


Distribusi densitas foton pada lapisan sel surya perovskite dengan penambahan *double layer CsI* dibawah

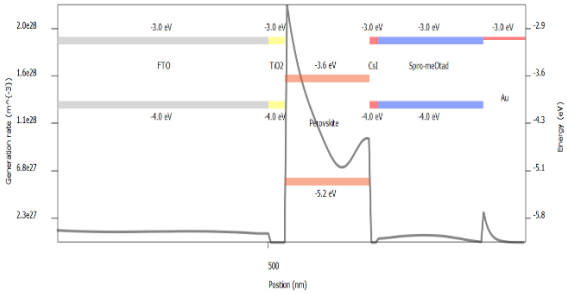
Generation rate pada perangkat sel surya perovskite



Generation rate tanpa penambahan *double layer CsI*



Generation rate dengan penambahan *double layer CsI* diatas



Generation rate dengan penambahan *double layer CsI* dibawah

BIODATA PENULIS

Penulis bernama lengkap Iqbal D. Rachmadhana, dengan nama panggilan Rama. Penulis dilahirkan pada tanggal 13 Nopember 1999 di Kapuas Kalimantan Tengah. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Ayah penulis bernama Rachman Hakim dan Ibu bernama Tirna. Saat ini penulis bertempat tinggal di Ampel Kejeron I no 06 Kecamatan Semampir Kota Surabaya Jawa Timur. Penulis mulai menempuh pendidikan formal di TK Tanjung Sari (2004-2005), dilanjutkan di SDN Garantung – 1 (2005-2011). Penulis melanjutkan pendidikan menengah pertama di MTsN Maliku Baru (2011-2014) dan pendidikan menengah atas di SMA Negeri 1 Maliku (2014-2017). Penulis menempuh pendidikan tinggi di Departemen Fisika FSAD Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan NRP 01111740000057 (2017-2021). Selama menempuh pendidikan tinggi, penulis aktif mengikuti kegiatan akademik dan organisasi. Organisasi yang diikuti oleh penulis antara lain Himpunan Mahasiswa Fisika ITS 2018/2019 sebagai staff PSDM Kabinet Nirwasita , BEM ITS 2018/2019 sebagai staff Dalam Negeri Kabinet Kolaborapi, Himpunan Mahasiswa Fisika ITS 2019/2020 sebagai Kepala Departemen PSDM Kabinet Bara Asa. Penulis juga pernah menjadi asisten Laboratorium Fisika Dasar 1, Laboratorium Fisika Madya dan Laboratorium Optoelektronika dan Elektromagnetika Terapan.

Email : iqbaldonnyrachmadhana@gmail.com