



**SINTESIS FOTOLISTRIK PEROVSKITE FAPbI_3 DENGAN
PENAMBAHAN GARAM Co-TFSI ORGANIK**

SKRIPSI

Ditulis Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana

Pendidikan (S-1)

Pada Program Studi Tadris Fisika

Oleh:

FADHILAH

NIM. 2130107006

**PROGRAM STUDI TADRIS FISIKA
FAKULTAS TARBIYAH DAN ILMU KEGURUAN
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAHMUD YUNUS
BATUSANGKAR**

2025



**PHOTOELECTRIC SYNTHESIS OF PEROVSKITE FAPbI_3
WITH THE ADDITION OF ORGANIC Co-TFSI SALTS**

THESIS

*Written As One Of The Requirements To Obtain A Bachelor Of
Education (S-1) Degree
In The Physics Education Study Program*

By:

FADHILAH

NIM. 2130107006

**PHYSICS TADRIS STUDY PROGRAM
FACULTY OF TARBIYAH AND SCIENCE
MAHMUD YUNUS STATE ISLAMIC UNIVERSITY
BATUSANGKAR**

2025



التوليف الفوتوليستريك لبيروفسكايت فابيل 3 مع إضافة ملح الطعام العضوي

أطروحة

(S-1) مكتوبة كأحد متطلبات الحصول على درجة البكالوريوس في التربية

في برنامج تادريس لدراسة الفيزياء

بواسطة

فضيلة

٢١٣٠١٠٧٠٠٦ نيم

برنامج تادريس الفيزياء

كلية التربية وعلوم المعلمين

جامعة محمود يونس الإسلامية الحكومية

باتوسانجكار

٢٠٢٥

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Fadhilah
NIM : 2130107006
Program Studi : Tadris Fisika

Dengan ini menyatakan bahwa SKRIPSI yang berjudul : **“Sintesis Fotolistrik Perovskite FAPbI_3 Dengan Penambahan Garam Co-TFSI Organik”** adalah hasil karya sendiri, bukan plagiat. Apabila di kemudian hari terbukti sebagai plagiat, maka bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Batusangkar, Februari 2025

Yang membuat pernyataan



Fadhilah

NIM 2130107006

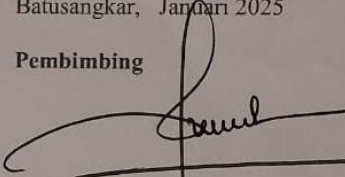
PERSETUJUAN PEMBIMBING

Pembimbing penulisan skripsi atas nama **Fadhilah**, NIM. 2130107006, dengan judul "**Sintesis Fotolistrik Perovskite FAPbI_3 Dengan Penambahan Garam Co-TFSI Organik**" memandang bahwa Skripsi yang bersangkutan telah memenuhi syarat untuk diajukan sidang munaqasah.

Demikianlah persetujuan ini diberikan untuk dapat dipergunakan seperlunya.

Batusangkar, Januari 2025

Pembimbing

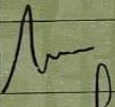
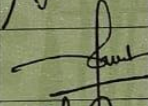
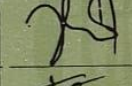
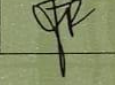


Prof. Dr. Marjoni Imamora, M.Sc
NIP. 197704012008011024

PENGESAHAN TIM PENGUJI

Skripsi atas nama FADHILAH, NIM: 2130197096, dengan judul: **SINTESIS FOTOLISTRIK PEROVSKITE FAPbI_3 , DENGAN PENAMBAHAN GARAM Co-TFSI ORGANIK**, telah diuji dalam Sidang Munaqasyah Fakultas Tarbiyah dan Ilmu Keguruan, Universitas Islam Negeri Mahmud Yunus Batusangkar yang dilaksanakan pada hari Senin, 03 Februari 2025 dan dinyatakan telah dapat diterima sebagai syarat penyelesaian studi (S1) pada Program Studi Tadris Fisika.

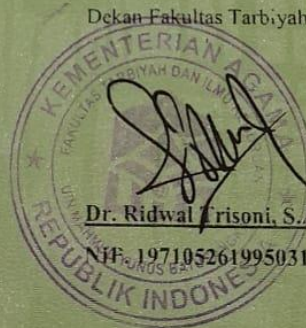
Demikian persetujuan ini diberikan untuk dapat dipergunakan seperlunya.

| No | Nama/NIP Penguji | Jabatan dalam TIM | Tanda Tangan | Tanggal Persetujuan |
|----|--|--------------------|---|---------------------|
| 1 | Prof. Dr. Akrajas Ali Umar | Ketua Penguji |  | 17 Feb 2025 |
| 2 | Prof. Dr. Marjoni Imamora, M.Sc NIP. 197704012008011024 | Sekretaris Penguji |  | 11/2 2025 |
| 3 | Hadiyati Idrus, M.Sc NIP. 198205182015032001 | Anggota Penguji |  | 11/2-2025 |
| 4 | Frans Rizal Agustiyanto, M.Si NIP. 197908022011011009 | Anggota Penguji |  | 15/02/25 |

Batusangkar, Februari 2025

Mengetahui

Dekan Fakultas Tarbiyah dan Ilmu Keguruan



Dr. Ridwal Trisoni, S.Ag., M.Pd

NIP. 197105261995031001

ABSTRAK

Fadhilah, NIM 2130107006, Judul Skripsi “**Sintesis Fotolistrik Perovskite FAPbI₃ dengan Penambahan Garam Co-TFSI Organik**”. Program Studi Tadris Fisika Fakultas Tarbiyah dan Ilmu Keguruan Universitas Islam Negeri (UIN) Mahmud Yunus Batusangkar.

Penelitian perovskite FAPbI₃ merupakan topik yang sangat populer dikalangan peneliti tentang fotolistrik solar sel. Perovskite FAPbI₃ memiliki potensi tinggi dalam aplikasi sel surya, namun masalah stabilitas kristal dan efisiensi konversi energi menjadi tantangan utama dalam pengembangannya. Penambahan garam Co-TFSI organik merupakan bahan yang ditawarkan dalam penelitian ini dimana diharapkan dapat meningkatkan stabilitas struktur kristal dan memperbaiki kinerja fotovoltaiik.

Jenis penelitian yang digunakan oleh peneliti adalah penelitian Eksperimen dengan metode *spin-coating*. Penelitian dilakukan di *Laboratory Organic and Printed Electronic (OPEL) Institute Microengineering and Nanoelectronics (IMEN)*, Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) dalam kurun waktu 25 hari kerja (Juli-Agustus 2024). Sintesis perovskite FAPbI₃ dengan penambahan garam organik Co-TFSI. Garam organik yang digunakan dengan variasi 0 mg, 2 mg, 3 mg, 4 mg, dan 5 mg. Film Perovskite yang dihasilkan seterusnya dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction (XRD)* *Field Scanning Electron Microscopy (FESEM)*, *UV-Vis Spectrophotometer*, *Steady Photoluminescence (PL)* dan pengukuran efisiensi konversi energi sel surya perovskite FAPbI₃.

Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa penambahan Co-TFSI memberikan dampak positif pada struktur dan kinerja perovskite. Karakterisasi XRD menunjukkan bahwa penambahan Co-TFSI pada variasi 5 mg memberikan hasil terbaik dalam meningkatkan kristalinitas dan kualitas struktur perovskite FAPbI₃. Selanjutnya karakterisasi FESEM menunjukkan penambahan Co-TFSI terdapat pada variasi 5 mg dimana butiran kristal menjadi lebih seragam, menghasilkan permukaan yang lebih rata dan homogen. Sementara karakterisasi sifat optik melalui Spektrum UV-Vis pada variasi 5 mg menunjukkan sifat optik terbaik dengan kurva absorbansi mencapai tingkat tertinggi di seluruh rentang panjang gelombang, yang mengindikasikan bahwa material telah mencapai saturasi doping. Terakhir, pada aspek karakterisasi J-V pada penambahan Co-TFSI sebanyak 5 mg menunjukkan hasil yang optimal dengan PCE 1,26 % ($V_{oc} \approx 0,86$ V, $J_{sc} = 4,09$ mA/cm², FF = 0,56).

Kata Kunci: FAPbI₃, Co-TFSI, Sel Surya Perovskite, Efisiensi

ABSTRACT

Fadhilah, NIM 2130107006, Thesis Title “**Photoelectric Synthesis of Perovskite FAPbI₃ with the Addition of Organic Co-TFSI Salt**”. Physics Education Study Program, Faculty of Tarbiyah and Teacher Training, State Islamic University (UIN) Mahmud Yunus Batusangkar.

Perovskite FAPbI₃ research is a very popular topic among researchers on photoelectric solar cells. Perovskite FAPbI₃ has high potential in solar cell applications, but the problem of crystal stability and energy conversion efficiency are the main challenges in its development. The addition of organic Co-TFSI salt is the material offered in this study which is expected to increase the stability of the crystal structure and improve photovoltaic performance.

The type of research used by the researcher is Experimental research with the spin-coating method. The research was conducted at the Laboratory Organic and Printed Electronic (OPEL) Institute Microengineering and Nanoelectronics (IMEN), Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) within 25 working days (July-August 2024). Synthesis of FAPbI₃ perovskite with the addition of organic salt Co-TFSI. Organic salts used with variations of 0 mg, 2 mg, 3 mg, 4 mg, and 5 mg. The resulting Perovskite film was then characterized using X-Ray Diffraction (XRD) Field Scanning Electron Microscopy (FESEM), UV-Vis Spectrophotometer, Steady Photoluminescence (PL) and measurement of energy conversion efficiency of FAPbI₃ perovskite solar cells. The characterization results show that the addition of Co-TFSI has a positive impact on the structure and performance of perovskite. XRD characterization shows that the addition of Co-TFSI at a variation of 5 mg gives the best results in increasing the crystallinity and quality of the FAPbI₃ perovskite structure. Furthermore, FESEM characterization shows that the addition of Co-TFSI is found in the variation of 5 mg where the crystal grains become more uniform, resulting in a flatter and more homogeneous surface. Meanwhile, the characterization of optical properties through the UV-Vis Spectrum at a variation of 5 mg showed the best optical properties with the absorbance curve reaching the highest level in the entire wavelength range, indicating that the material had reached doping saturation. Finally, the J-V characterization aspect of the addition of 5 mg of Co-TFSI showed optimal results with a PCE of 1.26% ($V_{oc} \approx 0.86$ V, $J_{sc} = 4.09$ mA/cm², FF = 0.56).

Keywords: FAPbI₃, Co-TFSI, Perovskite Solar Cells, Efficiency

DAFTAR ISI

| | |
|--|------------------------------|
| ABSTRAK | i |
| ABSTRACT | ii |
| KATA PENGANTAR | Error! Bookmark not defined. |
| DAFTAR ISI | iii |
| DAFTAR GAMBAR | v |
| DAFTAR TABEL | vii |
| DAFTAR LAMPIRAN | viii |
| BAB I PENDAHULUAN | |
| A. Latar Belakang | 1 |
| B. Identifikasi Masalah | 5 |
| C. Batasan Masalah..... | 6 |
| D. Rumusan Masalah | 6 |
| E. Tujuan Penelitian | 6 |
| F. Manfaat Penelitian | 7 |
| G. Definisi Operasional..... | 7 |
| BAB II LANDASAN TEORI | |
| A. Energi Matahari..... | 9 |
| 1. Energi | 9 |
| 2. Matahari..... | 11 |
| B. Panel dan Sel Surya..... | 13 |
| 1. Panel Surya..... | 13 |
| 2. Jenis-Jenis Panel Surya..... | 16 |
| 3. Sel Surya..... | 18 |
| C. Fotolistrik dan Fotovoltaik Perovskite | 22 |
| D. Perovskite FAPbI ₃ Dengan Penambahan Co-TFSI | 26 |
| 1. Perovskite | 26 |
| 2. <i>Formamidinium Timbal Triiodide</i> (FAPbI ₃) | 33 |
| 3. Co-TFSI..... | 36 |

| | |
|--|-----|
| E. Kajian Penelitian yang Relevan | 43 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN | |
| A. Jenis Penelitian..... | 46 |
| B. Tempat Penelitian..... | 46 |
| C. Waktu Penelitian | 46 |
| D. Alat dan Bahan Penelitian..... | 46 |
| E. Prosedur Penelitian..... | 48 |
| 1. Observasi dan Studi Literatur Penelitian..... | 49 |
| 2. Tahap Preparasi Alat dan Substrat | 49 |
| 3. Tahap Penimbangan Bahan Penyusun Perovskite $FAPbI_3$ | 52 |
| 4. Tahap Lapisan SnO_2 (<i>Tin Oxide</i>) | 54 |
| 5. Tahapan Lapisan (PbI_2 , Co-TFSI, PEAI dan Spiro)..... | 55 |
| 6. Tahapan Scrape Pengikisan..... | 56 |
| 7. Tahapan Thermal..... | 56 |
| 8. Fabrikasi Sel Surya Perovskite..... | 57 |
| 9. Karakterisasi | 59 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN | |
| A. HASIL..... | 70 |
| 1. Karakterisasi Dasar..... | 70 |
| 2. Karakterisasi Sifat Optik | 73 |
| 3. Karakterisasi Prestasi Sel Surya | 75 |
| B. PEMBAHASAN | 84 |
| 1. Karakterisasi Dasar..... | 84 |
| 2. Karakterisasi Sifat Optik | 88 |
| 3. Karakterisasi Prestasi Sel Surya | 93 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | |
| A. Kesimpulan | 105 |
| B. Saran..... | 106 |
| DAFTAR PUSTAKA | |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 2.1 Panel surya, terdiri dari banyak sel surya..... | 15 |
| Gambar 2.2 Monocrystalline..... | 16 |
| Gambar 2.3 Polycrystalline..... | 17 |
| Gambar 2.4 Thin Film..... | 17 |
| Gambar 3.1 Prosedur Penelitian..... | 49 |
| Gambar 3.2 Tahapan preparasi alat yang akan digunakan dalam proses..... | 50 |
| Gambar 3.3 Tahapan preparasi substrat kaca ITO | 51 |
| Gambar 3.4 Merupakan tahapan preparasi substrat kaca ITO | 52 |
| Gambar 3.5 Merupakan proses penimbangan bahan-bahan yang akan digunakan pada pembuatan sampel perovskite $FAPbI_3$ | 54 |
| Gambar 3.6 Tahapan proses pembuatan lapisan SnO_2 perovskite $FAPbI_3$ | 54 |
| Gambar 3.7 Merupakan tahapan proses pembuatan lapisan perovskite $FAPbI_3$ | 55 |
| Gambar 3.8 Merupakan tahapan pengikisan pada sampel perovskite $FAPbI_3$ | 56 |
| Gambar 3.9 Merupakan tahapan thermal pada sampel perovskite $FAPbI_3$ | 56 |
| Gambar 3.10 Lapisan Perovskite $FAPbI_3$ Dengan Penambahan Co-TFSI | 58 |
| Gambar 3.11 Merupakan gambar sampel perovskite $FAPbI_3$ dengan penambahan Co-TFSI (a) merupakan gambar perovskite sebelum di thermal, dan (b) merupakan gambar perovskite setelah di thermal dengan Cu/tembaga..... | 58 |
| Gambar 3.12 Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)..... | 60 |
| Gambar 3.13 Karakterisasi FESEM..... | 62 |
| Gambar 3.14 Karakterisasi <i>UV-Vis Spectrophotometer</i> | 63 |
| Gambar 3.15 Karakterisasi <i>Steady Photoluminescence</i> (PL)..... | 65 |
| Gambar 3.16 Proses pengambilan data karakterisasi J-V | 68 |
| Gambar 4.1 Hasil karakterisasi XRD perovskite $FAPbI_3$ | 71 |
| Gambar 4.2 Pembesaran Pola XRD Pada Skala 10 Hingga 17° | 72 |
| Gambar 4.3 FESEM perovskite $FAPbI_3$ (Scale bar Untuk a-e = $1\mu m$ dan a1-e1 =200 nm)..... | 73 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4.4 Spektrum Absorbansi Variasi Ketebalan Lapisan Perovskite FAPbI ₃ | 74 |
| Gambar 4.5 Steady Photoluminescence Perovskite FAPbI ₃ | 75 |
| Gambar 4.6 J-V Dibawah Cahaya Perovskite FAPbI ₃ | 76 |
| Gambar 4.7 Parameter V _{oc} Perovskite FAPbI ₃ | 78 |
| Gambar 4.8 Parameter J _{sc} Perovskite FAPbI ₃ | 79 |
| Gambar 4.9 Parameter FF Perovskite FAPbI ₃ | 79 |
| Gambar 4.10 Parameter PCE Perovskite FAPbI ₃ | 80 |
| Gambar 4.11 Semi Log J-V dalam Gelap Perovskite FAPbI ₃ | 81 |
| Gambar 4.12 Double Log J-V dalam Gelap Perovskite FAPbI ₃ | 81 |
| Gambar 4.13 EIS Perovskite FAPbI ₃ | 83 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 3.1 Alat yang digunakan dalam proses sintesis perovskite FAPbI ₃ | 46 |
| Tabel 3.2 Bahan yang digunakan dalam sintesis perovskite FAPbI ₃ | 48 |
| Tabel 4. 1 Nilai energi gap (bandgap) Perovskite FAPbI ₃ | 74 |
| Tabel 4.2 Data nilai karakterisasi J-V perovskite FAPbI ₃ | 77 |
| Tabel 4.3 <i>Carrier Mobility</i> dan <i>Trap Density</i> perovskite FAPbI ₃ | 82 |
| Tabel 4.4 Hasil EIS Perovskite FAPbI ₃ Dengan Penambahan Co-TFSI | 83 |

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Gambar Alat Dan Bahan Yang Digunakan Dalam Pembuatan Perovskite FAPbI₃ Dengan Penambahan Co-TFSI.. **Error! Bookmark not defined.**
- Lampiran 2 Gambar Proses Pembuatan Perovskite FAPbI₃ Dengan Penambahan Co-TFSI **Error! Bookmark not defined.**
- Lampiran 3 Nilai EIS **Error! Bookmark not defined.**
- Lampiran 4 Nilai Sifat Arus Bocor J-V Dalam Gelap**Error! Bookmark not defined.**
- Lampiran 5 Nilai Uv-Vis Spectrophotometer **Error! Bookmark not defined.**
- Lampiran 6 Nilai XRD..... **Error! Bookmark not defined.**
- Lampiran 7 Nilai Sifat Fotovolta (J-V Bawah Cahaya)**Error! Bookmark not defined.**
- Lampiran 8 Surat Balasan Dari Universitas Kebangsaan Malaysia**Error! Bookmark not defined.**

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Indonesia merupakan negara dengan iklim tropis yang memiliki potensi besar untuk memanfaatkan sinar matahari sebagai sumber energi terbarukan, dengan penyinaran harian rata-rata mencapai 4,5 hingga 4,8 kWh/m². Energi matahari sebagai sumber energi terbarukan, tidak menghasilkan polusi, tidak akan habis, dan dapat dimanfaatkan secara gratis (Abdul Rozak et al., 2023). Cahaya matahari merupakan salah satu sumber energi yang dapat digunakan oleh manusia untuk mendukung berbagai aktivitas kehidupan. Selain itu, pemanfaatan energi matahari tidak akan merusak lingkungan.

Sesuai dengan firman Allah yang dijelaskan dalam QS An-Naba' ayat 13:

وَجَعَلْنَا سِرَاجًا وَهَّاجًا

Artinya: “Dan kami menjadikan pelita yang terang-benderang (matahari).”

Tafsir Quraish Shihab dalam Q.S An-Naba ayat 13 menjelaskan bahwa Allah telah menciptakan pelita yang bersinar terang, yaitu matahari yang memancarkan cahayanya. Matahari merupakan sumber energi yang sangat penting bagi kehidupan di bumi, memberikan cahaya dan kehangatan yang diperlukan makhluk hidup untuk bertahan hidup (Shihab, 2021)

Dari tafsiran tersebut, Allah menjadikan matahari sebagai sumber penerangan yang sempurna di siang hari, yang cahayanya dapat menembus ke seluruh penjuru bumi. Hal ini memiliki kaitan erat dengan konsep pendidikan di sekolah, khususnya dalam pembelajaran sains, di mana peserta didik akan mempelajari tentang matahari sebagai bintang terdekat dengan bumi dan

perannya yang vital dalam sistem tata surya. Siswa akan memahami bagaimana matahari berperan dalam proses fotosintesis pada tumbuhan, siklus air, dan berbagai proses alam lainnya. Pemahaman ini juga mencakup bagaimana matahari sebagai pelita yang terang mempengaruhi keseimbangan ekosistem, proses pembentukan rantai makanan, dan kehidupan organisme di bumi. Pembelajaran ini menekankan pentingnya menjaga keseimbangan alam dan memanfaatkan energi matahari secara bijak untuk keberlanjutan kehidupan di bumi.

Selain dari ayat Al-Qur'an dan pendidikan yang berkaitan dengan energi matahari, telah diketahui bahwasanya beberapa tahun terakhir, banyak penelitian dengan memanfaatkan energi matahari telah dilaporkan seperti arsitektur surya, pemanasan matahari, fotosintesis buatan dan fotovoltaiik (Amalia et al., 2018). Teknologi-teknologi ini telah berhasil diterapkan dan dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan energi. Namun, penelitian di bidang ini perlu terus dikembangkan agar dapat mendukung penggunaan sumber energi tidak terbarukan. Terutama riset mengenai teknologi yang dapat mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik, yang dikenal sebagai sel surya (Setyawan, 2018).

Sel surya adalah perangkat fotovoltaiik yang menghasilkan listrik dengan memanfaatkan energi matahari. Umumnya, sel surya dibagi menjadi tiga generasi. Generasi pertama berbasis wafer, generasi kedua menggunakan lapisan tipis, dan generasi ketiga mengandalkan struktur organik. Meskipun sel surya dari generasi pertama dan kedua telah digunakan selama bertahun-tahun, tingginya biaya, kompleksitas teknologi persiapan, dan dampak lingkungan yang negatif telah membatasi penggunaannya. Oleh karena itu, para peneliti sedang mencari bahan baru untuk sel surya yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan. Saat ini, berbagai jenis sel surya telah dilaporkan, termasuk sel surya silikon polikristalin (mc-Si), sel surya silikon kristalin tunggal (c-Si), sel surya CIGS, sel surya berbasis CdTe, sel surya

tersensitisasi titik kuantum, fotovoltaiik organik, dan sel surya perovskite. Efisiensi konversi daya dan biaya bahan sangat penting untuk keberhasilan komersialisasi sel surya. Hingga kini, sel surya berbasis silikon generasi ketiga mendominasi pasar dengan efisiensi konversi daya (PCE) yang tinggi, mencapai 25–26%. Namun, sel surya perovskite yang merupakan kelas baru dari generasi ketiga, muncul sebagai alternatif untuk sel surya silikon dengan kemampuan menunjukkan PCE sebesar 22,1% (Kumar & Babu, 2021).

Sel surya perovskite telah menunjukkan kemajuan yang luar biasa dalam beberapa tahun terakhir dengan peningkatan efisiensi yang cepat, dari laporan sekitar 3% pada tahun 2009 menjadi lebih dari 26% (2023) saat ini pada perangkat area kecil (sekitar $0,1 \text{ cm}^2$). Sel gabungan perovskite silikon telah mencapai efisiensi hampir 34% (J. Zhang et al., 2024). Sementara sel surya perovskite telah menjadi sangat efisien dalam waktu yang sangat singkat. PV perovskite belum diproduksi dalam skala besar dan sejumlah tantangan harus diatasi sebelum perovskite dapat menjadi teknologi PV komersial yang kompetitif.

Salah satu material semikonduktor organik-anorganik yang sedang banyak diteliti untuk aplikasi sel surya ialah Perovskite FAPbI_3 . Perovskite FAPbI_3 (*Formamidinium Timbal Triiodida*) adalah salah satu material yang menjanjikan dalam teknologi sel surya karena memiliki celah pita (bandgap) yang ideal untuk menyerap spektrum cahaya matahari secara efisien. Namun, efisiensi fotolistriknya masih tergolong rendah dibandingkan dengan material sel surya konvensional seperti silikon kristalin. Efisiensi fotolistrik yang rendah ini disebabkan oleh beberapa faktor, seperti rekombinasi muatan yang tinggi, ketidaksempurnaan struktur kristal, dan ketidakstabilan material ketika terpapar kondisi lingkungan seperti kelembaban, panas, atau cahaya ultraviolet. Selain itu, proses fabrikasi yang belum optimal juga dapat mempengaruhi kualitas lapisan perovskite, sehingga mengurangi efisiensi konversi energi (NREL, 2023). Oleh karena itu, upaya untuk meningkatkan

efisiensi fotolistrik FAPbI₃ menjadi fokus utama dalam penelitian sel surya perovskite.

Untuk mengatasi masalah efisiensi fotolistrik FAPbI₃, berbagai strategi telah dikembangkan termasuk penggunaan aditif dan modifikasi komposisi. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah penambahan garam organik, khususnya garam *cobalt bis(trifluoromethanesulfonyl)imide* (Co-TFSI). Co-TFSI (*cobalt bis(trifluoromethanesulfonyl)imide*) adalah bahan aditif yang potensial untuk meningkatkan kinerja sel surya perovskite. Namun, efek penambahan Co-TFSI terhadap efisiensi fotolistrik perovskite FAPbI₃ masih belum diketahui secara pasti. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa bahan aditif dapat mempengaruhi struktur kristal, meningkatkan mobilitas muatan, atau mengurangi rekombinasi muatan. Namun, hasilnya bervariasi tergantung pada jenis material dan kondisi eksperimen. Misalnya, beberapa studi melaporkan peningkatan efisiensi, sementara yang lain menemukan bahwa penambahan aditif justru dapat menurunkan kinerja sel surya (Zhang, X., 2020). Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk memahami secara komprehensif bagaimana Co-TFSI mempengaruhi efisiensi fotolistrik FAPbI₃.

Penentuan konsentrasi optimal Co-TFSI merupakan langkah penting dalam meningkatkan efisiensi fotolistrik perovskite FAPbI₃. Konsentrasi yang terlalu rendah mungkin tidak memberikan efek signifikan, sementara konsentrasi yang terlalu tinggi dapat menyebabkan masalah seperti degradasi material atau pembentukan fase yang tidak diinginkan. Misalnya, konsentrasi tinggi dapat mengganggu struktur kristal perovskite, mengurangi stabilitas, atau bahkan menimbulkan efek toksik pada material (Lee, J. W., 2021). Oleh karena itu, penelitian diperlukan untuk menemukan konsentrasi Co-TFSI yang optimal, yaitu konsentrasi yang dapat meningkatkan efisiensi tanpa menimbulkan efek negatif pada material.

Peningkatan atau penurunan efisiensi fotolistrik akibat penambahan Co-TFSI masih belum sepenuhnya dipahami. Beberapa hipotesis menunjukkan bahwa Co-TFSI dapat mempengaruhi transportasi muatan, mengurangi rekombinasi, atau mengubah struktur kristal perovskite. Namun, belum ada bukti yang jelas tentang mekanisme dominan yang bertanggung jawab atas perubahan efisiensi tersebut. Misalnya, apakah peningkatan efisiensi disebabkan oleh perbaikan dalam mobilitas muatan, atau apakah penurunan efisiensi disebabkan oleh pembentukan cacat kristal (Wang, Y. et al, 2019). Pemahaman mendalam tentang mekanisme ini sangat penting untuk merancang strategi yang lebih efektif dalam meningkatkan kinerja sel surya perovskite.

Berdasarkan hal tersebut peneliti tertarik untuk meneliti sintesis fotolistrik perovskite FAPbI_3 dengan penambahan garam Co-TFSI organik, guna mendukung pengembangan sel surya perovskite yang lebih efisien dan stabil.

B. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas maka dapat diidentifikasi masalah sebagai berikut :

1. Rendahnya efisiensi fotolistrik dari Perovskite FAPbI_3 .
2. Efek penambahan Co-TFSI belum diketahui secara pasti bagaimana mempengaruhi efisiensi fotolistrik perovskite FAPbI_3 .
3. Belum diketahui berapa penambahan konsentrasi Co-TFSI yang optimal untuk mencapai efisiensi fotolistrik terbaik pada perovskite FAPbI_3 .
4. Mekanisme peningkatan atau penurunan efisiensi fotolistrik yang disebabkan oleh penambahan Co-TFSI masih belum jelas.
5. Belum ada kajian mengenai efek samping penambahan Co-TFSI terhadap perovskite FAPbI_3 .

C. Batasan Masalah

Dari beberapa identifikasi masalah di atas, peneliti membatasi masalah penelitian ini yaitu: untuk mengetahui pengaruh penambahan garam Co-TFSI organik terhadap fotolistrik perovskite FAPbI₃.

D. Rumusan Masalah

Berdasarkan batasan masalah yang telah dipaparkan sebelumnya, maka dapat dirumuskan, yaitu :

1. Bagaimana pengaruh penambahan Co-TFSI terhadap sifat dasar perovskite FAPbI₃?
2. Bagaimana pengaruh penambahan Co-TFSI terhadap sifat optik perovskite FAPbI₃?
3. Bagaimana pengaruh penambahan Co-TFSI terhadap efisiensi fotolistrik perovskite FAPbI₃?
4. Berapa konsentrasi optimal Co-TFSI yang dapat meningkatkan efisiensi fotolistrik perovskite FAPbI₃?
5. Bagaimana mekanisme peningkatan atau penurunan efisiensi fotolistrik akibat penambahan Co-TFSI pada perovskite FAPbI₃?

E. Tujuan Penelitian

Sesuai dengan permasalahan yang telah dikemukakan di atas, maka tujuan penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui pengaruh penambahan Co-TFSI terhadap sifat dasar perovskite FAPbI₃.
2. Untuk mengetahui pengaruh penambahan Co-TFSI terhadap sifat optik perovskite FAPbI₃.
3. Untuk mengetahui pengaruh penambahan Co-TFSI terhadap efisiensi fotolistrik perovskite FAPbI₃.
4. Untuk mengetahui konsentrasi optimal Co-TFSI yang dapat meningkatkan efisiensi fotolistrik perovskite FAPbI₃.

5. Untuk mengetahui mekanisme peningkatan atau penurunan efisiensi fotolistrik akibat penambahan Co-TFSI pada perovskite FAPbI₃

F. Manfaat Penelitian

Manfaat dari hasil penelitian yang dilakukan peneliti dalam mengkaji bagaimana penambahan garam Co-TFSI organik terhadap fotolistrik perovskite FAPbI₃ adalah:

1. Manfaat utama pada penelitian ini ialah untuk memperoleh gelar sarjana (S1) pada program studi Tadris Fisika Universitas Islam Negeri Mahmud Yunus Batusangkar.
2. Bagi peneliti, yaitu peneliti dapat mengetahui penambahan garam Co-TFSI organik terhadap fotolistrik perovskite FAPbI₃
3. Bagi ilmu pengetahuan, yaitu dapat memberikan informasi tentang pengaruh pada penambahan garam Co-TFSI organik terhadap fotolistrik perovskite FAPbI₃
4. Bagi peserta didik, yaitu dapat memberikan informasi terkait dengan pentingnya energi terbarukan dan upaya pengembangan teknologi sel surya yang lebih efisien.
5. Bagi masyarakat, yaitu dapat meningkatkan kesadaran tentang pentingnya penggunaan energi terbarukan dan dampak positifnya terhadap lingkungan
6. Bagi peneliti berikutnya, yakni dapat menjadi bahan pertimbangan dalam melakukan penelitian perovskite.

G. Definisi Operasional

Untuk menghindari kesalahpahaman dalam memahami penulisan, peneliti memberikan definisi operasional terkait dengan istilah-istilah yang digunakan dalam penelitian sebagai berikut :

1. **FAPbI₃** merupakan unsur utama dalam pembuatan perovskite yang merupakan larutan FAI dan PbI₂.

2. **Co-TFSI atau Cobalt(II) bis(trifluoromethylsulfonyl)imide** merupakan garam hidrofilik yang digunakan sebagai lapisan perovskite.
3. **Sel surya** adalah perangkat yang menggunakan tenaga surya dan diubah menjadi energi listrik menggunakan prinsip fotovoltaik.
4. **Perovskite** merupakan sebuah mineral perovskite yang di namai oleh ahli mineral asal Rusia bernama Count Lev Perovskite. Perovskite digunakan pada sel surya dengan berbagai bahan kimia yang diperuntukan untuk energi terbarukan yang dikembangkan sampai saat ini.
5. **DMF (Dimethylformamide)** dan **DMSO (Dimethylsulfoxide)** merupakan pelarut dari FAPbI_3 .
6. **IPA** atau Iso Propyl Alcohol adalah pelarut dari Co-TFSI
7. **MAI (metilammonium Iodida)** adalah garam ammonium yang terdiri dari metilamin dan hidrogen iodide. Ini merupakan komponen sel surya kristal perovskite.
8. **Hexamethylenetetramine (HMT)** merupakan molekul bersiklus keempat yang dapat dengan mudah dibentuk pada suhu kamar, dan bisa digunakan sebagai pelarut dari metileammonium iodide (MAI).
9. **Spin-Coating** merupakan teknik yang digunakan dalam pembuatan lapisan perovskite FAPbI_3 dimana untuk setiap lapisan memakai tahapan spin-coating yang memiliki kecepatan yang berbeda.
10. **Photovoltaic (PV)** adalah teknologi yang mengubah energi cahaya dari matahari menjadi energi listrik

BAB II

LANDASAN TEORI

A. Energi Matahari

1. Energi

Energi adalah konsep yang sangat abstrak, meskipun tidak memiliki massa dan tidak dapat diukur secara langsung, tetapi energi dapat dipengaruhi melalui perubahan yang terlihat. Karena yang berubah adalah energi, maka konsep bentuk energi tidak lepas dari perubahan energi. Hukum Kekekalan Energi menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan tetapi hanya dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Secara umum energi dapat dikelompokkan menjadi beberapa bentuk, seperti energi panas, energi cahaya, energi listrik, energi kinetik, energi kimia, energi potensial, energi nuklir dan lain sebagainya (Sunarti, 2020).

Sesuai dengan firman Allah yang dijelaskan dalam Q.S Thaha Ayat 6 :

لَهُ مَا فِي السَّمٰوٰتِ وَمَا فِي الْاَرْضِ وَمَا بَيْنَهُمَا وَمَا تَحْتَ الثَّرٰى

Artinya : Kepunyaan-Nya-lah semua yang ada di langit, semua yang di bumi, semua yang di antara keduanya dan semua yang di bawah tanah.

Tafsir Al-Mishbah menafsirkan Q.S Thaha ayat 6 dimana Allah menjelaskan bahwa kepunyaan-Nya-lah semua yang ada di langit, semua yang di bumi, semua yang di antara keduanya dan semua yang di bawah tanah. Pada ayat ini membuktikan bahwa Al-Quran menginformasikan tentang kepemilikan mutlak Allah atas segala sesuatu di alam semesta, termasuk energi yang tidak dapat diciptakan

maupun dimusnahkan, hanya dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya (Shihab, 2021).

Dari tafsiran tersebut, segala yang ada di langit, bumi, dan di antara keduanya serta yang di bawah tanah adalah milik Allah, termasuk berbagai bentuk energi yang ada di alam semesta. Hal ini selaras dengan hukum kekekalan energi yang menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, melainkan hanya dapat berubah bentuk. Misalnya energi potensial dapat berubah menjadi energi kinetik, energi kimia dapat berubah menjadi energi listrik, dan sebagainya. Konsep ini menunjukkan bahwa segala bentuk energi yang ada di alam semesta adalah ciptaan Allah dan tetap terjaga jumlahnya sesuai dengan yang telah ditetapkan-Nya.

Hal ini berkaitan dengan pendidikan di sekolah, khususnya dalam pembelajaran fisika tentang hukum kekekalan energi. Peserta didik dapat memahami bahwa berbagai transformasi energi yang terjadi di alam merupakan bukti kekuasaan Allah, dimana setiap perubahan bentuk energi selalu mengikuti hukum kekekalan yang telah ditetapkan-Nya. Pembelajaran ini tidak hanya memberikan pemahaman tentang konsep fisika, tetapi juga menumbuhkan kesadaran akan kebesaran Allah melalui hukum-hukum alam yang berlaku di alam semesta.

Dalam menciptakan energi listrik pada *photovoltaic* (energi sinar matahari menjadi photon) tidak bergantung pada bidang silikon dari *photovoltaic*. *Photovoltaic* secara konstan akan menghasilkan energi mulai dari 0,5 volt – batas 600 mV pada 2 ampere dengan kekuatan radiasi matahari sebesar 1000 W/m^2 yang setara dengan 1 matahari akan menghasilkan aliran listrik sekitar 30 mA/cm^2 per sel surya.

Sumber energi terbagi menjadi 2 yaitu sumber energi terbarukan dan sumber energi tidak terbarukan. Sumber energi tidak terbarukan merupakan jenis energi yang jumlahnya sangat terbatas dan tidak dapat

diperbaharui walaupun dapat diperbaharui tetapi memerlukan waktu yang cukup lama. Contoh sumber energi yang berasal dari fosil adalah minyak bumi, batu bara sedangkan sumber energi yang berasal dari mineral alam adalah uranium yang bisa menghasilkan energi nuklir. Sedangkan sumber energi terbarukan merupakan energi yang didapatkan dari sumber daya alam yang tidak terbatas dan tidak akan pernah habis meskipun digunakan secara terus-menerus. Sumber energi terbarukan disebut juga dengan sumber energi alternatif. Salah satu contoh energi terbarukan yaitu matahari (Saifudin et al., 2020).

2. Matahari

Matahari berfungsi sebagai sumber utama kehidupan di bumi yang pada dasarnya berasal dari reaksi fusi yang terjadi pada inti matahari. Sampai saat ini, matahari terdiri atas beberapa elemen yaitu 71% Hidrogen, 27% Helium dan 2% Oksigen dan gas-gas lainnya. Jarak antara matahari dan bumi adalah sekitar $\sim 1.496 \times 10^{11}$ meter yang juga dikenal sebagai satuan *astronomical unit* (AU). Dengan kecepatan cahaya di ruang hampa yang mencapai $2.9979 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$, foton yang dipancarkan dari matahari memerlukan waktu sekitar ~ 500 detik atau 8,3 menit untuk sampai ke bumi (Triandini, 2024).

Sesuai dengan firman Allah yang dijelaskan dalam Q.S Yunus 5 :

هُوَ الَّذِي جَعَلَ الشَّمْسَ ضِيَاءً وَالْقَمَرَ نُورًا وَقَدَرَهُ مَنَازِلَ لِتَعْلَمُوا عَدَدَ السِّنِينَ
وَالْحِسَابَ ۗ مَا خَلَقَ اللَّهُ ذَلِكَ إِلَّا بِالْحَقِّ ۗ يُفَصِّلُ الْآيَاتِ لِقَوْمٍ يَعْلَمُونَ

Artinya: Dialah yang menjadikan matahari bersinar dan bulan bercahaya dan ditetapkan-Nya manzilah-manzilah (tempat-tempat) bagi perjalanan bulan itu, supaya kamu mengetahui bilangan tahun dan perhitungan (waktu). Allah tidak menciptakan yang demikian itu

melainkan dengan hak. Dia menjelaskan tanda-tanda (kebesaran-Nya) kepada orang-orang yang mengetahui.

Tafsir Al-Mishbah melalui ayat ini, Allah menjelaskan Dialah, bukan selain-Nya, yang menjadikan matahari bersinar dan bukan bercahaya dan ditetapkan-Nya manzilah-manzilah, yakni tempat-tempat baginya. Pada ayat ini untuk matahari membuktikan bahwa Al-quran menginformasikan bahwa cahaya matahari bersumber dari dirinya sendiri. Karena cahaya matahari bersumber dari dirinya, cahayanya menghasilkan panas atau kehangatan, yang memberikan cahaya yang tidak terlalu besar dan juga tidak menghasilkan kehangatan (Shihab, 2021).

Dari tafsiran tersebut dialah yang menjadikan matahari bersinar dan bulan bercahaya. Matahari dengan sinarnya merupakan sumber kehidupan, sumber panas dan tenaga yang dapat menyinari makhluk-makhluk Allah yang diciptakan-Nya. Dengan pemanfaatan sinar matahari inilah yang nantinya dapat dirubah menjadi energi listrik. Hal ini juga berkaitan dengan pendidikan di sekolah, karena pada konsep energi peserta didik nantinya akan mempelajari tentang pemanfaatan energi matahari dari energi panas menjadi energi listrik.

Energi dari matahari berupa radiasi elektromagnetik yang tiba di bumi dalam bentuk cahaya, yang terdiri dari foton atau partikel energi matahari yang dapat berubah menjadi energi listrik. Energi matahari yang mencapai bumi juga dikenal sebagai radiasi surya global. Di Indonesia, radiasi matahari berkisar antara 1700-1950 kWh/m²/tahun, yang setara dengan 466-5,34 kWh/m²/hari. Energi ini dapat dimanfaatkan oleh manusia, salah satunya melalui penggunaan sel surya, yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik (Sunardiyo et al., 2022)

Energi berbasis sinar matahari atau radiasi cahaya terdiri dari foton yang memiliki tingkat energi yang berbeda. Tingkat energi foton cahaya yang berbeda akan menentukan frekuensi rentang cahaya. Foton yang

dikonsumsi oleh sel photovoltaic akan menghasilkan energi listrik (Setiyawan et al., 2021).

B. Panel dan Sel Surya

1. Panel Surya

Panel surya merupakan suatu alat yang dapat mengonversi cahaya matahari menjadi energi listrik. Prinsip kerjanya didasari oleh pertemuan semikonduktor jenis P dan semikonduktor jenis N. Energi yang dihasilkan oleh panel surya berdasarkan energi matahari yang ada juga berdasarkan arah panel surya terhadap matahari. Besar arus yang dihasilkan panel surya berbanding lurus dengan besar intensitas cahaya matahari. Sedangkan besar intensitas matahari selalu berubah sesuai dengan perubahan posisi matahari (Hidayanti, 2020).

Dalam cahaya matahari terkandung energi dalam bentuk foton. Ketika foton ini mengenai permukaan sel surya, elektron-elektronnya akan tereksitasi dan menimbulkan aliran listrik. Prinsip ini dikenal sebagai prinsip *photoelectric*. Sel surya ini mudah pecah dan berkarat jika terkena air. Karena itu sel ini dibuat dalam bentuk panel-panel ukuran tertentu yang dilapisi plastic atau kaca bening yang kedap air. Panel ini dikenal sebagai panel surya (Dwisetyowati, 2020).

Panel surya terdiri dari 3 lapisan, lapisan panel P di bagian atas, lapisan pembatas di tengah, dan lapisan panel N di bagian bawah. Efek fotoelektrik adalah dimana sinar matahari menyebabkan elektron di lapisan panel P terlepas, sehingga hal ini menyebabkan proton mengalir ke lapisan panel N di bagian bawah dan perpindahan arus proton ini adalah arus listrik, dengan pengertian lain Arus listrik timbul karena adanya energi foton cahaya matahari yang diterimanya berhasil membebaskan elektron-elektron dalam sambungan semikonduktor tipe N dan tipe P untuk mengalir.

Arus dan tegangan yang dihasilkan oleh sel surya bergantung pada penyinaran matahari dan dipengaruhi oleh dua variabel fisis, yaitu intensitas radiasi cahaya matahari dan suhu lingkungan. Intensitas radiasi cahaya matahari yang diterima sel surya sebanding dengan tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh sel surya, sedangkan apabila suhu lingkungan semakin tinggi dengan intensitas radiasi cahaya matahari yang tetap, maka tegangan panel surya akan berkurang dan arus listrik yang dihasilkan akan bertambah.

Tegangan yang dihasilkan oleh panel surya berupa tegangan DC. Daya input dari panel surya adalah intensitas cahaya matahari (W/m^2) dan luas penampang panel surya (m^2). Untuk menentukan daya input panel surya dapat digunakan rumus dari persamaan 1 berikut:

$$P_{in} = I_{rad} \times A \quad (1)$$

Keterangan:

P_{in} = Daya yang masuk pada panel surya (W)

I_{rad} = Intensitas cahaya matahari (W/m^2)

A = Luas penampang panel surya (m^2)

Sedangkan output dari panel surya adalah arus dan tegangan. Untuk menentukan daya output dari panel surya digunakan rumus dari persamaan 2 berikut:

$$P_{out} = VPV \times IPV \quad (2)$$

Keterangan:

P_{out} = Daya yang keluar pada panel surya (W)

VPV = Tegangan panel surya (V)

IPV = Arus keluar panel surya (A)

Efisiensi panel surya merupakan ukuran keluaran daya listrik panel surya dibagi dengan luas penampang dan intensitas cahaya matahari.

Umumnya semakin tinggi efisiensi sebuah panel surya maka semakin banyak daya yang dihasilkan panel surya.



Gambar 2.1 Panel surya, terdiri dari banyak sel surya

Panel surya tersusun dari modul surya yang dirangkai secara seri maupun paralel sesuai dengan kebutuhan daya listrik tertentu yang bertugas menyerap ini adalah sel surya. Sel surya sendiri terdiri dari beberapa komponen photovoltaic atau komponen yang dapat mengubah cahaya (*photo*) menjadi listrik (*voltaic*). Umumnya sel surya terdiri dari lapisan silikon yang bersifat semikonduktor, metal, lapisan anti reflektif, dan strip konduktor metal. Lapisan-lapisan inilah yang berjasa menghasilkan listrik agar bisa kamu nikmati di rumah. Banyaknya sel surya yang disusun untuk menjadi panel surya akan berbanding lurus dengan energi yang dihasilkan. Semakin banyak sel surya yang digunakan, maka semakin banyak pula energi matahari yang dikonversi menjadi energi listrik (Gunawan et al., 2021).

Panel surya atau modul surya terbuat dari bahan semikonduktor (umumnya silikon) yang apabila disinari oleh cahaya matahari dapat menghasilkan arus listrik. Panel ini tersusun dari beberapa sel surya yang dihubungkan secara seri maupun paralel. Sebuah sel surya umumnya

terdiri dari 32-40 sel surya, tergantung ukuran panel (Damanik & Silaban, 2023)

Faktor-faktor yang mempengaruhi peningkatan daya yang dihasilkan yaitu suhu permukaan panel surya dan suhu sekitar panel surya sangat berpengaruh terhadap efisiensi daya yang dihasilkan dari panel surya karena semakin rendah suhu permukaan maka efisiensi *photovoltaic* akan semakin meningkat, apabila suhu permukaan panel surya dan suhu sekitar panel surya adanya kenaikan temperatur maka daya listrik yang diproduksi oleh panel surya menjadi berkurang (Alim et al., 2022).

2. Jenis-Jenis Panel Surya

Berdasarkan pada tipe bahan sel surya, modul surya yang umum dipakai dikategorikan kedalam 3 tipe dengan efisiensi konversinya yaitu perbandingan antara daya yang dihasilkan modul surya dengan radiasi matahari yang ditangkap modul surya dalam satuan (%) :

a. Monokristal Silikon (*Mono-crystalline*)



Gambar 2.2 *Monocrystalline* (<https://enjiner.com/panel-surya>)

Gambar 2.2 *Monocrystalline* merupakan panel surya yang memiliki efisiensi 15-20% dengan jenis silikon tunggal. *Monocrystalline* dirancang untuk penggunaan konsumsi listrik besar pada tempat yang memiliki iklim ekstrim. Dan Harga tipe modul ini relatif paling mahal. Kelemahan dari modul *Monocrystalline* adalah

tidak berfungsi dengan baik pada cuaca dengan kondisi matahari terhalang awan yang menyebabkan efisiensi turun drastis (Anggara & Saputra, 2023).

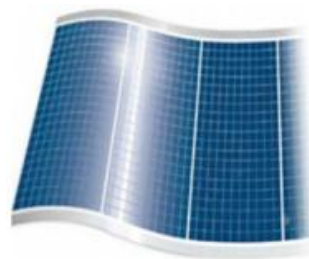
b. Polikristal (*Poly-crystalline*)



Gambar 2.3 *Polycrystalline* (<https://enjiner.com/panel-surya>)

Gambar 2.3 *Polycrystalline* merupakan modul surya yang memiliki susunan kristal acak karena difabrikasi dengan proses pengecoran. Modul jenis ini agar mendapat daya yang sama dengan tipe monocrystalline memerlukan luas permukaan yang lebih besar. Jenis modul ini memiliki efisiensi yang rendah jika dibandingkan dengan monocrystalline sekitar 13-18% karena bahannya merupakan campuran silikon dan material lainnya (Anggara & Saputra, 2023)

c. Thin Film



Gambar 2.4 Thin Film (<https://enjiner.com/panel-surya>)

Gambar 2.4 Thin film adalah Inovasi pembuatan sel berorientasi matahari dengan lapisan tipis direncanakan untuk mengurangi biaya pembuatan sel bertenaga matahari dengan mempertimbangkan bahwa inovasi ini hanya membutuhkan kurang dari 1% bahan alami silikon jika dibandingkan dengan bahan alami untuk jenis wafer silikon. Strategi yang paling sering digunakan untuk membuat silikon film tipis adalah *plasma-enhanced chemical vapor deposition* (PEVCD) dari gas silan dan hidrogen. Lapisan yang dibuat dengan teknik ini menghasilkan silikon yang tidak memiliki arah kristal atau yang dikenal sebagai amorphous silikon (non kristal). (Armansyah et al., 2024).

Selain menggunakan bahan silikon, sel surya film mungil juga diproduksi menggunakan bahan semikonduktor lain yang memiliki efektivitas sel berorientasi matahari tinggi seperti *Cadmium Telluride* (CdTe), *Amorphous Silicon* (a-Si), *Cadmium Sulfide* (Cds), *Gallium Arsenide* (GaAs), *Tembaga Indium Selenida* (CIS), dan *Copper Indium Gallium Selenida* (CIGS). Kemahiran tertinggi yang saat ini dapat dihasilkan oleh sel berorientasi matahari lapisan tipis ini adalah 19,5% yang berasal dari sel bertenaga matahari CIGS. Keuntungan lain menggunakan jenis lapisan tipis adalah semikonduktor sebagai lapisan sel berbasis matahari dapat disimpan pada substrat fleksibel untuk menghasilkan perangkat bertenaga surya yang dapat beradaptasi (Brier, J., 2020).

3. Sel Surya

Sel surya, yang juga dikenal sebagai *photovoltaic* (PV), adalah perangkat yang berfungsi untuk mengubah energi matahari menjadi listrik dengan memanfaatkan efek fotovoltaiik. Cara kerja dasar sel surya bergantung pada penggunaan bahan semikonduktor, seperti silikon, yang

dapat memisahkan elektron dari atomnya saat terkena cahaya. Proses ini dimulai ketika foton dari cahaya matahari mengenai permukaan sel surya dan memberikan energi yang cukup untuk menggerakkan elektron di dalam semikonduktor (Dalimunthe et al., 2023).

Sel surya adalah kumpulan sel dengan lapisan tipis semikonduktor silikon (Si) murni dan bahan semikonduktor lainnya. Sistem fotovoltaik ini dapat mengubah energi elektromagnetik dari sinar matahari menjadi energi listrik. Sel surya adalah semikonduktor dengan permukaan luas yang terdiri dari serangkaian dioda tipe “p” dan “n”, dengan kemampuan mengubah sinar matahari menjadi energi listrik. Prinsip kerja sel surya sangat bergantung pada efek fotovoltaik untuk menyerap sinar matahari dan arus yang mengalir di antara dua lapisan yang berlawanan. Sel surya juga akan selalu menghasilkan energi listrik jika masih ada sinar matahari walaupun dalam kondisi mendung sekalipun sel surya masih berfungsi. Energi listrik yang dihasilkan oleh satu sel surya sangat kecil sehingga membutuhkan gabungan dari beberapa panel surya menjadi sebuah komponen yang disebut panel surya atau modul surya. (Rizki & Abdi Bangsa, 2023).

Berdasarkan teori Maxwell tentang energi elektromagnetik, cahaya dapat dianggap sebagai spektrum gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang yang berbeda. Suatu pendekatan yang berbeda dijabarkan oleh Einstein bahwa efek fotovoltaik menunjukkan cahaya adalah partikel diskrit atau kuantum energi. Dualitas cahaya sebagai partikel dan gelombang dirumuskan oleh persamaan 3 berikut:

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (3)$$

$$E = h\nu$$

dimana cahaya pada frekuensi f atau panjang gelombang λ datang dalam bentuk paket-paket foton dengan energi sebesar E , h adalah

konstanta Planck ($6,625 \times 10^{-34} \text{ Js}$) dan c adalah kecepatan cahaya ($2,99792 \times 10^8 \text{ m/s} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$). Sifat cahaya sebagai energi dalam paket-paket foton ini yang diterapkan pada sel surya (Halliday, D., Resnick, R., 2018).

Sesuai dengan firman Allah yang dijelaskan dalam An-Nur Ayat 35 :

اللَّهُ نُورُ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ مِثْلُ نُورِهِ كَمِشْكُوتٍ فِيهَا مِصْبَاحٌ الْمِصْبَاحُ فِي زُجَاجَةٍ
الزُّجَاجَةُ كَأَنَّهَا كَوْكَبٌ دُرِّيٌّ يُوقَدُ مِنْ شَجَرَةٍ مُبْرَكَةٍ زَيْتُونَةٍ لَا شَرْقِيَّةٍ وَلَا غَرْبِيَّةٍ يَكَادُ
زَيْتُهَا يُضِيءُ وَلَوْ لَمْ تَمْسَسْهُ نَارٌ نُّورٌ عَلَى نُورٍ يَهْدِي اللَّهُ لِنُورِهِ مَنْ يَشَاءُ وَيَضْرِبُ
اللَّهُ الْأَمْثَالَ لِلنَّاسِ وَاللَّهُ بِكُلِّ شَيْءٍ عَلِيمٌ

Artinya : Allah (pemberi) cahaya (kepada) langit dan bumi. Perumpamaan cahaya-Nya, seperti sebuah lubang yang tidak tembus, yang di dalamnya ada pelita besar. Pelita itu di dalam tabung kaca (dan) tabung kaca itu bagaikan bintang yang berkilauan, yang dinyalakan dengan minyak dari pohon yang diberkahi, (yaitu) pohon zaitun yang tumbuh tidak di timur dan tidak pula di barat, yang minyaknya (saja) hampir-hampir menerangi, walaupun tidak disentuh api. Cahaya di atas cahaya (berlapis-lapis), Allah memberi petunjuk kepada cahaya-Nya bagi orang yang Dia kehendaki, dan Allah membuat perumpamaan-perumpamaan bagi manusia. Dan Allah Maha Mengetahui segala sesuatu.

Tafsir Al-Mishbah melalui ayat ini, Allah menjelaskan bahwa Dialah pemberi cahaya kepada langit dan bumi. Perumpamaan cahaya Allah bagaikan sebuah ceruk yang tak tembus yang di dalamnya ada pelita besar. Pelita itu berada dalam tabung kaca, dan tabung kaca itu bagaikan bintang yang berkilauan. Pada ayat ini, perumpamaan tentang cahaya Allah menunjukkan bahwa cahaya memiliki peran penting dalam kehidupan, baik cahaya yang bersifat material (dapat dilihat dengan mata) maupun immaterial (cahaya keimanan dan pengetahuan) (Shihab, 2021).

Dari tafsiran tersebut, pelita yang berada dalam tabung kaca yang bercahaya seperti bintang menggambarkan bagaimana cahaya dapat dipantulkan dan diteruskan melalui medium. Hal ini berkaitan dengan prinsip konversi energi cahaya menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaiik, dimana cahaya yang masuk ke dalam sel surya akan diserap dan dikonversi menjadi energi listrik. Konsep ini memiliki relevansi dengan pendidikan di sekolah, khususnya dalam pembelajaran fisika tentang energi dan perubahannya (Tipler & Mosca, 2007). Peserta didik dapat memahami bagaimana struktur sel surya yang berlapis-lapis mirip dengan perumpamaan pelita dalam tabung kaca, dimana setiap lapisan memiliki fungsi dalam proses konversi energi cahaya menjadi listrik.

Perumpamaan dalam ayat ini juga mengajarkan bahwa ilmu pengetahuan dan teknologi yang dikembangkan manusia merupakan upaya untuk memahami dan memanfaatkan tanda-tanda kekuasaan Allah di alam semesta. Pembelajaran tentang efek fotovoltaiik tidak hanya memberikan pemahaman tentang konsep fisika, tetapi juga menumbuhkan kesadaran akan kebesaran Allah melalui pemanfaatan energi cahaya yang merupakan salah satu nikmat-Nya.

Berdasarkan perkembangannya, sel surya dibagi menjadi tiga generasi. Sel surya generasi pertama merupakan sel surya yang pertama kali diproduksi hingga saat ini. Sel surya ini terbuat dari silikon kristal, baik monokristalin atau polikristalin. Kelebihan dari sel surya generasi pertama ini adalah efisiensinya yang cukup tinggi, sedangkan kekurangannya terletak pada biaya produksinya yang mahal. Selanjutnya, sel surya generasi kedua merupakan modifikasi dari sel surya generasi pertama yang disebut dengan sel surya film tipis. Kelebihan dari sel surya generasi kedua ini adalah biaya produksi yang dibutuhkan lebih murah dari generasi pertama namun efisiensinya lebih rendah. Dan sel surya generasi ketiga memiliki tujuan untuk menciptakan sel surya yang dapat

menghasilkan energi listrik yang tinggi dengan biaya yang murah dan efisiensi yang tinggi, yaitu melalui pembuatan sel surya polimer atau disebut dengan sel surya organik, salah satu contohnya adalah *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC). (Moh. Irfan Ainurraziqin, Sudarlin, 2016).

C. Fotolistrik dan Fotovoltaik Perovskite

1. Fotolistrik

Efek fotolistrik pertama kali ditemukan oleh Heinrich Hertz pada tahun 1887 ketika ia mengamati bahwa percikan listrik antara dua elektroda menjadi lebih mudah terjadi ketika permukaan elektroda disinari dengan cahaya ultraviolet. Fenomena ini kemudian dijelaskan secara teoretis oleh Albert Einstein pada tahun 1905, yang memperoleh Hadiah Nobel pada tahun 1921 atas kontribusinya dalam menjelaskan efek fotolistrik (L. Zhang, 2023).

Efek fotolistrik merupakan fenomena fisika yang terjadi ketika foton atau cahaya menumbuk permukaan logam dan menyebabkan elektron terlepas dari permukaan logam tersebut. Prinsip dasar efek fotolistrik menunjukkan bahwa setiap foton memiliki energi yang besarnya berbanding lurus dengan frekuensinya. Ketika foton dengan energi yang cukup menumbuk elektron pada permukaan logam, energi tersebut dapat menyebabkan elektron terlepas dari ikatannya. Fenomena ini menunjukkan sifat partikel dari cahaya yang tidak dapat dijelaskan dengan teori gelombang klasik (Wang, Y., & Li, 2024).

Salah satu karakteristik penting dari efek fotolistrik adalah bahwa jumlah elektron yang dilepaskan berbanding lurus dengan intensitas cahaya, sementara energi kinetik elektron yang terlepas hanya bergantung pada frekuensi cahaya yang menumbuk. Hal ini merupakan bukti eksperimental yang mendukung teori kuantum cahaya. Aplikasi modern dari efek fotolistrik dapat ditemukan dalam berbagai perangkat, termasuk

sel surya, sensor cahaya, dan perangkat pencitraan. Dalam sel surya, efek fotolistrik dimanfaatkan untuk mengkonversi energi cahaya menjadi energi listrik melalui proses yang melibatkan pembentukan pasangan elektron-hole (Rodriguez, 2023).

2. Fotovoltaik

Efek fotovoltaik merupakan fenomena fisika dimana material dapat menghasilkan tegangan listrik ketika terpapar cahaya. Berbeda dengan efek fotolistrik yang hanya melibatkan pelepasan elektron, efek fotovoltaik mencakup proses lengkap konversi energi cahaya menjadi energi listrik. Prinsip kerja efek fotovoltaik melibatkan tiga tahap utama: absorpsi foton, pembentukan pasangan elektron-hole, dan pemisahan muatan (Kim, 2024).

Tahap pertama dalam proses fotovoltaik adalah absorpsi foton, yang merupakan langkah fundamental dalam konversi energi cahaya menjadi energi listrik. Ketika cahaya matahari mengenai permukaan material semikonduktor dalam sel surya, foton dengan energi yang sesuai akan diserap oleh material tersebut. Proses absorpsi ini sangat bergantung pada karakteristik material semikonduktor, terutama celah pita energinya (band gap). Foton yang memiliki energi lebih besar atau sama dengan celah pita energi material akan diserap secara efektif, sementara foton dengan energi yang lebih rendah akan melewati material tanpa diserap. Efisiensi absorpsi juga dipengaruhi oleh ketebalan material, struktur permukaan, dan teknik light trapping yang digunakan untuk meningkatkan probabilitas absorpsi foton. Material seperti silikon kristal memiliki koefisien absorpsi yang berbeda untuk panjang gelombang yang berbeda, sehingga optimasi ketebalan material menjadi sangat penting untuk memaksimalkan absorpsi foton dalam rentang spektrum cahaya matahari yang tersedia (Anderson, 2024).

Setelah foton diserap, tahap kedua adalah pembentukan pasangan elektron-hole, yang merupakan proses kuantum yang kompleks. Ketika foton dengan energi yang cukup diserap oleh material semikonduktor, energi tersebut ditransfer ke elektron yang berada di pita valensi. Elektron yang menerima energi ini akan tereksitasi dan berpindah ke pita konduksi, meninggalkan kekosongan atau "hole" di pita valensi. Proses ini menciptakan pasangan elektron-hole, yang merupakan pembawa muatan yang dapat berkontribusi pada arus listrik. Efisiensi pembentukan pasangan elektron-hole dipengaruhi oleh berbagai faktor termasuk kualitas kristal semikonduktor, kehadiran defek dan ketidakmurnian, serta suhu operasi. Dalam material berkualitas tinggi, probabilitas rekombinasi elektron-hole sebelum dapat berkontribusi pada arus listrik diminimalkan, sehingga meningkatkan efisiensi konversi energi secara keseluruhan. Proses ini juga dipengaruhi oleh mobilitas pembawa muatan dalam material, yang pada gilirannya mempengaruhi kemampuan pasangan elektron-hole untuk bergerak ke junction dan berkontribusi pada arus listrik (Anderson, 2024).

Tahap ketiga dalam proses fotovoltaik adalah pemisahan muatan, yang terjadi di *junction* antara material tipe-p dan tipe-n dalam sel surya. Di daerah *junction* ini terbentuk medan listrik internal yang kuat akibat difusi pembawa muatan mayoritas dari kedua sisi junction. Medan listrik ini berperan penting dalam memisahkan elektron dan hole yang terbentuk dari proses absorpsi foton. Elektron akan bergerak menuju sisi n-type karena pengaruh medan listrik, sementara hole bergerak ke arah sebaliknya menuju sisi p-type. Proses pemisahan ini harus terjadi sebelum elektron dan hole mengalami rekombinasi, yang merupakan salah satu mekanisme kerugian utama dalam sel surya. Efisiensi pemisahan muatan sangat dipengaruhi oleh kualitas *junction*, ketebalan lapisan deplesi, dan

struktur internal sel surya. Penggunaan lapisan passivasi dan teknik rekayasa junction modern telah memungkinkan peningkatan signifikan dalam efisiensi pemisahan muatan. Setelah muatan terpisah, elektron dan hole yang terpisah ini menghasilkan beda potensial antara kedua sisi sel surya, yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan arus listrik dalam rangkaian eksternal. Optimasi proses pemisahan muatan ini menjadi kunci dalam meningkatkan efisiensi konversi energi sel surya secara keseluruhan (Anderson, 2024).

Untuk meningkatkan efisiensi konversi energi sel surya dapat dihitung dengan persamaan 4 berikut:.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} \times 100 \% \quad (4)$$

Keterangan:

η = Efisiensi konversi daya (%0

P_{\max} = Daya listrik yang dihasilkan oleh sel surya

P_{in} = Daya cahaya yang diterima oleh sel surya

Untuk menghitung daya listrik yang dihasilkan oleh sel surya dapat dihitung dengan perkalian tegangan dan arus yang dihasilkan oleh efek fotovoltaiik dengan menggunakan persamaan 5 berikut:

$$P = V \times I \quad (5)$$

Keterangan:

P = Daya listrik (W)

I = Arus listrik (A)

V = Tegangan listrik (V)

D. Perovskite FAPbI₃ Dengan Penambahan Co-TFSI

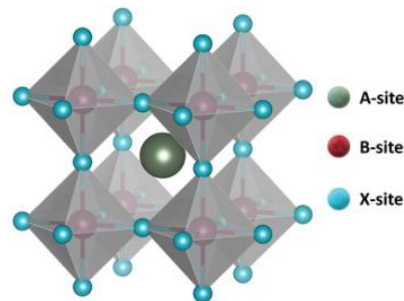
1. Perovskite

Perovskite halida adalah kelas material yang menarik dengan berbagai aplikasi, terutama dalam bidang optoelektronik. Berikut penjelasan detail mengenai kegunaannya:

a. Struktur dan Komposisi

Perovskite halida memiliki rumus umum ABX₃, dengan A adalah kation monovalen (misalnya *metilammonium* (MA), *formamidinium* (FA), atau *cesium* (Cs)), B adalah kation logam divalen (misalnya *timbal* (Pb), *timah* (Sn)) dan X adalah anion halida (misalnya *klorida* (Cl), *bromida* (Br), *iodida* (I)).

Struktur perovskite halida mirip dengan struktur oksida perovskite, namun dengan ion halide yang menggantikan ion oksigen.



Gambar 2.5 Struktur perovskite dengan stoikiometri mengikuti ABX₃.

b. Sifat Optoelektronik

Perovskite halida dikenal memiliki sifat optoelektronik yang sangat baik, yang meliputi:

- 1) **Penyerapan Optik Tinggi.** Perovskite halida memiliki koefisien serapan yang tinggi yang membuatnya sangat efisien dalam menangkap cahaya. Hal ini disebabkan oleh struktur kristal dan sifat elektroniknya yang unik yang memungkinkan interaksi yang

efektif dengan cahaya. Tingginya koefisien serapan ini dapat dijelaskan melalui beberapa faktor, seperti adanya celah pita langsung, kopling spin-orbit yang kuat, struktur kristal yang simetris, konstanta dielektrik yang tinggi, serta komposisi hibrid organik-anorganik (Ali et al., 2021; Faridi et al., 2022). Kombinasi dari faktor-faktor ini memungkinkan perovskite halida untuk berinteraksi secara efisien dengan cahaya, sehingga sangat efektif dalam menyerap foton dan mengubahnya menjadi energi listrik. Oleh karena itu, material ini sangat menjanjikan untuk berbagai aplikasi, seperti sel surya dan perangkat optoelektronik. Berikut adalah penjelasan lebih lanjut mengenai alasan tingginya daya serap perovskite halida:

a) Kesenjangan Pita Langsung

Perovskite halida umumnya memiliki celah pita yang bersifat langsung, yang berarti bahwa transisi elektron dari pita valensi ke pita konduksi dapat terjadi tanpa melibatkan fonon, yaitu getaran pada kisi Kristal (Chouhan et al., 2020). Pada material yang memiliki celah pita langsung, proses penyerapan cahaya menjadi lebih efisien karena foton dengan energi yang sama atau lebih besar dari celah pita dapat langsung mengeksitasi elektron. Hal ini menghasilkan probabilitas penyerapan yang tinggi untuk foton yang masuk, yang pada gilirannya berkontribusi pada tingginya koefisien penyerapan. Dengan demikian, kesenjangan pita langsung ini menjadi salah satu faktor kunci yang mendukung kemampuan perovskite halida dalam menyerap cahaya secara efektif.

b) Kopling Spin-Orbit yang Kuat

Halida perovskite terutama yang mengandung unsur berat seperti *timbal* (Pb) atau *timah* (Sn) menunjukkan adanya ikatan spin-orbit yang kuat. Kopling spin-orbit merujuk pada interaksi antara putaran elektron dan gerakannya di sekitar inti atom. Dalam halida perovskite, efek ini dapat membagi tingkat energy yang pada gilirannya meningkatkan penyerapan cahaya dengan menambah jumlah transisi elektronik yang tersedia (Grånäs et al., 2016). Fenomena ini memungkinkan halida perovskite untuk menyerap spektrum cahaya yang lebih luas secara lebih efektif dibandingkan dengan material yang memiliki kopling spin-orbit yang lebih lemah.

c) Struktur Kristal Simetris

Struktur kristal simetris dari perovskite halida juga berperan penting dalam memfasilitasi transisi elektronik yang efisien antara pita energi. Kation pada situs B, seperti Pb^{2+} atau Sn^{2+} berkontribusi pada pembentukan pita energi yang sangat dispersif. Sifat dispersif dari pita energi ini mengurangi massa efektif pembawa muatan, baik elektron maupun lubang, sehingga memudahkan mereka untuk berpindah antar keadaan energi saat berinteraksi dengan cahaya (Shen et al., 2022). Hal ini menghasilkan penyerapan foton yang lebih kuat pada berbagai panjang gelombang.

d) Konstanta Dielektrik Tinggi

Halida perovskite memiliki konstanta dielektrik yang relatif tinggi yang mengurangi tarikan Coulomb antara elektron dan lubang (eksiton) yang dihasilkan setelah penyerapan cahaya. Hal ini memungkinkan material untuk lebih mudah memisahkan eksiton menjadi pembawa muatan bebas yang

mendorong penyerapan cahaya yang efisien tanpa kehilangan energi yang signifikan untuk rekombinasi eksiton. Konstanta dielektrik yang tinggi juga meningkatkan polarisasi material, meningkatkan interaksi dengan medan elektromagnetik dan berkontribusi terhadap penyerapan yang lebih tinggi (Bonn et al., 2017).

e) Komposisi Hibrid Organik-Anorganik

Banyak perovskite halide terutama perovskite halida *timbal metilammonium* (misalnya, $\text{CH}_3 \text{NH}_3 \text{PbI}_3$) merupakan bahan organik-anorganik hibrid. Komponen organik, seperti *metilammonium* ($\text{CH}_3 \text{NH}_3^+$) membantu menstabilkan struktur kristal dan mempengaruhi sifat elektronik material. Kombinasi halida logam anorganik dengan kation organik menciptakan lingkungan unik yang memfasilitasi interaksi materi cahaya yang kuat yang berkontribusi terhadap koefisien serapan yang tinggi (Green et al., 2014).

f) Spektrum Penyerapan Luas

Perovskite halida mampu menyerap cahaya pada spektrum yang luas dari ultraviolet hingga inframerah dekat. Rentang serapan yang lebar ini disebabkan oleh adanya celah pita yang dapat disesuaikan pada bahan perovskite. Penyesuaian ini dapat dilakukan dengan mengubah komposisi halida (misalnya dengan mencampurkan *iodida*, *bromida*, atau *klorida*) (Chouhan et al., 2020). Kemampuan menyerap berbagai energi foton semakin meningkatkan koefisien serapan material karena memungkinkan material menangkap sebagian besar spektrum matahari.

- 2) Celah Pita yang dapat disesuaikan. Dengan memvariasikan komposisi halida, celah pita pada perovskite dapat disesuaikan. Kemampuan ini sangat berguna untuk berbagai aplikasi seperti sel surya dan LED (Chouhan et al., 2020).
- 3) Panjang Difusi Pembawa Panjang. Properti ini memungkinkan pengangkutan muatan secara efisien yang sangat penting untuk perangkat berkinerja tinggi (Chouhan et al., 2020). Properti ini merupakan faktor kunci yang berkontribusi terhadap efisiensi tinggi dalam aplikasi optoelektronik (Shrestha et al., 2022).

Berikut adalah alasan utama mengapa perovskite halida menunjukkan panjang difusi yang begitu panjang:

- 1) Kepadatan Cacat Rendah

Perovskite halide terutama dalam bentuk kristal tunggal memiliki kepadatan cacat dan batas butir yang rendah. Cacat dan batas butir biasanya bertindak sebagai perangkap bagi pembawa muatan yang menyebabkan rekombinasi. Kepadatan cacat yang rendah pada perovskite berarti terdapat lebih sedikit jebakan, sehingga pembawa muatan dapat menempuh jarak yang lebih jauh (Cho et al., 2022).

- 2) Mobilitas Pengangkut Tinggi

Mobilitas pembawa muatan (elektron dan lubang) pada perovskite halida relatif tinggi. Mobilitas yang tinggi berarti pembawa muatan dapat bergerak cepat melalui material, sehingga berkontribusi terhadap panjang difusi yang lebih panjang (Shrestha et al., 2022).

- 3) Umur Pembawa yang Panjang

Perovskite halida memiliki masa hidup pembawa yang panjang yang berarti bahwa pembawa muatan dapat bertahan lebih lama sebelum bergabung kembali. Masa hidup yang lebih lama ini memungkinkan mereka menempuh jarak yang lebih jauh di dalam material (Chen et al., 2020).

4) Transportasi Pengangkut Gratis yang Efisien

Pada perovskite halide transpor pembawa bebas mendominasi transpor eksiton. Artinya pembawa muatan tidak terikat sebagai eksiton (pasangan elektron-lubang) tetapi ada sebagai elektron dan lubang bebas yang dapat bergerak lebih bebas dan efisien melalui material (Chen et al., 2020).

5) Penyerapan Cahaya Yang Kuat

Perovskite halida memiliki sifat penyerapan cahaya yang kuat, yang menghasilkan kepadatan pembawa muatan yang tinggi. Kepadatan yang tinggi ini dapat meningkatkan panjang difusi dengan meningkatkan kemungkinan pembawa muatan bergerak melalui material tanpa bergabung kembali (Ali et al., 2021).

6) Struktur Elektronik yang Menguntungkan

Struktur elektronik perovskite halida termasuk struktur pita dan kepadatan keadaannya, mendukung pengangkutan muatan yang efisien. Koordinasi tingkat energi memfasilitasi pergerakan pembawa muatan yang berkontribusi pada panjang difusi yang lebih panjang (Liang et al., 2020).

7) Pengurangan Migrasi Ion

Dalam kristal perovskite halida berkualitas tinggi, migrasi ion diminimalkan. Migrasi ion dapat menciptakan medan listrik lokal yang memerangkap pembawa muatan, sehingga mengurangi

panjang difusinya. Dengan meminimalkan migrasi ion, panjang difusi secara efektif meningkat (Cho et al., 2022).

C. Aplikasi

Bahan perovskite telah banyak diaplikasikan di berbagai bidang. Berikut adalah ringkasan beberapa penerapan penting dari materi ini.

- 1) Sel Surya. Perovskite halida telah merevolusi bidang fotovoltaik karena efisiensinya yang tinggi dan biaya produksi yang rendah. Perovskite ini digunakan dalam sel surya sambungan tunggal dan gabungan (Cho et al., 2022).
- 2) *Light Emitting Diode* (LED). Efisiensi fotoluminesensinya yang tinggi membuatnya cocok untuk digunakan pada LED (Chouhan et al., 2020).
- 3) Laser. Kemampuan material untuk mendukung emisi terstimulasi telah menyebabkan penggunaannya dalam aplikasi laser (Chouhan et al., 2020).
- 4) Aplikasi Lain. Perovskite ini juga sedang dieksplorasi untuk digunakan dalam fotodetektor, perangkat memori, dan aplikasi optoelektronik lainnya (Seok & Guo, 2020).

D. Sintesis dan Stabilitas

Perovskite halida dapat disintesis menggunakan berbagai metode termasuk pemrosesan larutan yang relatif sederhana dan hemat biaya. Namun, stabilitas perovskite halida, terutama terhadap kelembapan dan panas merupakan tantangan yang secara aktif coba ditingkatkan oleh para peneliti (Correa-Baena, Saliba, et al., 2017).

E. Tantangan dan Arah Masa Depan

Ada beberapa tantangan dan permasalahan dalam penggunaan material perovskit dalam aplikasi. Berikut ini secara singkat mengulas beberapa tantangan utama.

- 1) Stabilitas. Meningkatkan stabilitas jangka panjang perovskite halida adalah fokus utama penelitian saat ini (Zhu et al., 2023).
- 2) Toksisitas. Perovskite berbasis dasar *timbal* menimbulkan risiko lingkungan dan kesehatan, sehingga mendorong pencarian alternatif bebas timbal (Chen et al., 2023).
- 3) Skalabilitas. Mengembangkan proses manufaktur yang terukur sambil mempertahankan kinerja tinggi sangat penting untuk aplikasi komersial (Wang et al., 2018).

Perovskite halida memiliki potensi besar untuk masa depan optoelektronik dengan penelitian berkelanjutan yang bertujuan untuk mengatasi keterbatasan saat ini dan memperluas penerapannya.

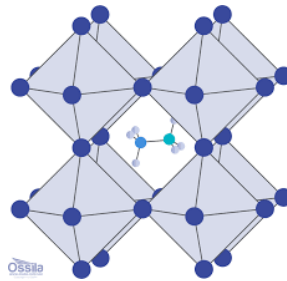
2. *Formamidinium Timbal Triiodide (FAPbI₃)*

Struktur molekul *Formamidinium Timbal Triiodida* (FAPbI₃) diilustrasikan pada gambar 2.6 dan gambar 2.7 di bawah ini. FAPbI₃ menunjukkan beberapa sifat penting yang menjadikannya kandidat kuat untuk aplikasi fotovoltaik. Berikut adalah beberapa sifat detailnya, yaitu struktur kristal pada suhu kamar (300 K), FAPbI₃ mengadopsi struktur perovskite kubik yang dicirikan oleh kelompok ruang Pm3m. Struktur ini merupakan bagian integral dari kinerja optoelektroniknya. Fase aktif optoelektronik, Fase α kubik hitam dari FAPbI₃ adalah bentuk aktif optoelektronik yang penting untuk aplikasi fotovoltaik karena efisiensinya yang tinggi.

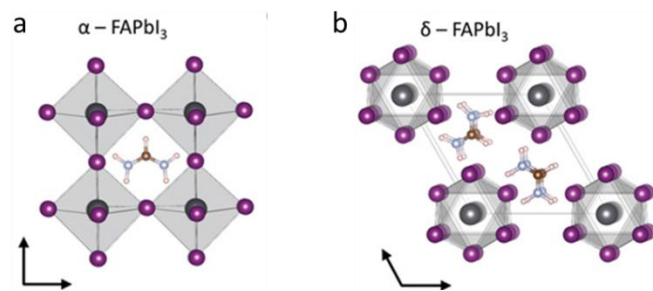
Namun, fase ini bersifat stabil dalam kondisi standar yang berarti bahwa fase ini cenderung bertransisi ke bentuk lain seiring berjalannya waktu. Secara termodinamika, Fase δ heksagonal kuning lebih stabil

dibandingkan dengan fase α . Meskipun demikian, fase δ kurang efisien untuk aplikasi fotovoltaik, sehingga menimbulkan tantangan dalam menjaga kinerja perangkat berbasis FAPbI_3 seiring berjalannya waktu (Chen et al., 2021)

Struktur molekul fase alfa dan delta perovskite FAPbI_3 ditunjukkan pada Gambar 2.6 dan 2.7 di bawah ini.



Gambar 2.6 Struktur molekul FAPbI_3 .



Gambar 2.7 Struktur kisi fase alfa (a) dan delta (b) dari FAPbI_3 .

FAPbI_3 memiliki celah pita yang lebih rendah dibandingkan dengan metilammonium *timbal iodida* (MAPbI_3), yang memperluas serapan ke wilayah inframerah dekat (Niu et al., 2022). FAPbI_3 memiliki celah pita sekitar 1,48 eV lebih rendah dari *metilammonium timbal iodida* (MAPbI_3). Celah pita yang lebih rendah ini memungkinkan FAPbI_3 menyerap spektrum sinar matahari yang lebih luas termasuk wilayah

inframerah-dekat, sehingga meningkatkan potensi efisiensi fotovoltaik yang lebih tinggi.

FAPbI₃ menunjukkan mobilitas pembawa muatan yang tinggi yang sangat penting untuk pengangkutan muatan yang efisien dalam material. Properti ini membantu mengurangi kerugian rekombinasi dan meningkatkan efisiensi sel surya secara keseluruhan. Material ini juga menunjukkan mobilitas pembawa muatan yang tinggi dan seimbang yang sangat penting untuk kinerja fotovoltaik yang efisien (Chen et al., 2021).

Hal ini disebabkan oleh relatif rendahnya massa efektif elektron dan lubang di FAPbI₃ yang berkontribusi terhadap tingginya mobilitas pembawa muatan. Properti ini penting untuk transportasi dan pengumpulan muatan yang efisien pada perangkat fotovoltaik. Selain itu, FAPbI₃ memiliki toleransi yang tinggi terhadap cacat, artinya keberadaan cacat tidak berdampak signifikan terhadap sifat elektroniknya. Hal ini bermanfaat untuk mempertahankan kinerja tinggi meskipun terdapat ketidaksempurnaan pada material dan karena konstanta dielektriknya yang tinggi, FAPbI₃ membantu menyaring pembawa muatan dari interaksi Coulomb, sehingga dapat mengurangi laju rekombinasi dan meningkatkan efisiensi pemisahan muatan (Bechir et al., 2023; Cordero et al., 2019).

Dilihat dari sifat optiknya, FAPbI₃ mempunyai penampang serapan yang tinggi sehingga efektif dalam menangkap sinar matahari (Han et al., 2016). Celah pita optik berkurang karena jari-jari kation efektif *formamidinium* lebih besar dibandingkan *metilamonium* (Wang et al., 2020).

Bahan ini menunjukkan stabilitas termal yang lebih baik dibandingkan MAPbI₃, sehingga bermanfaat untuk kinerja perangkat jangka panjang (Bechir et al., 2023). Namun, fase α sensitif terhadap kelembaban yang dapat menyebabkan degradasi. Namun penelitian terbaru menunjukkan bahwa bahan ini dapat tetap stabil dalam waktu lama

dalam kondisi terkendali (Bechir et al., 2023). Menarik untuk dicatat di sini, tampilan aspek (011) dalam film FAPbI₃ telah terbukti meningkatkan sifat transportasi muatan dan koordinasi tingkat energi, sehingga menghasilkan efisiensi konversi daya yang lebih tinggi (Zhang et al., 2023). Sifat-sifat ini menjadikan FAPbI₃ bahan yang sangat efisien dan stabil untuk digunakan dalam sel surya perovskite dan perangkat optoelektronik lainnya.

Pada Tabel 1.1 perbandingan sifat FAPbI₃ dengan sistem perovskite lainnya ditunjukkan.

| No | Property | FAPbI ₃ | MAPbI ₃ | CsPbI ₃ | FA _{1-x} CS _x PbI ₃ |
|----|--|--------------------|--------------------|--------------------|--|
| 1 | Band gap (eV) | 1.48 | 1.55 | 1.73 | ~1.3 - 1.7 |
| 2 | Phase stability | metastable | ↑metastable | stable | ↑metastable |
| 3 | Thermal stability | Stable | Metastable | ↑↑stable | ↑stable |
| 4 | Charge mobility (cm ² /V-s) | 35 (eksperiment) | 2.5 (eksperiment) | 270 (Teori) | 40 (eksperiment) |

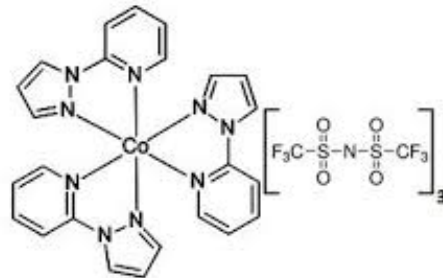
↑= indicates better performance compared to FAPbI₃.

3. Co-TFSI

a. Struktur dan Komposisi Kimia

Co-TFSI atau *Cobalt(II) bis(trifluoromethylsulfonyl)imide* memiliki rumus molekul Co(CF₃SO₂)₂N₂ dan memiliki berat molekul 1223 g/mol. Struktur molekul ditunjukkan pada Gambar 2.8 di bawah ini. Terdiri dari kation Co dan anion imida, mereka menunjukkan sifat fase yang menarik karena adanya konformer yang berbeda (cis dan trans) dari ion TFSI. Setiap anion *bis(trifluoromethanesulfonyl)imide* (TFSI) diwakili oleh N(SO₂CF₃)₂ dan terdapat dua anion yang

terkoordinasi dengan kation kobalt(II). Keseimbangan antara konformer ini dapat mempengaruhi pembentukan fase kristal pada berbagai temperatur.



Gambar 2.8 Struktur molekul Cobalt(II)
bis(trifluoromethylsulfonyl)imide

b. Kestabilan Kimia

Stabilitas kimia Co-TFSI (*Cobalt bis (trifluoromethylsulfonyl)imide*) tidak dirinci secara luas dalam literatur yang tersedia. Namun, beberapa fakta berikut dapat dianggap sebagai ukuran stabilitas Co-TFSI:

- 1) Co-TFSI sering digunakan dalam aplikasi yang mengutamakan stabilitas kimia, seperti dalam sistem elektrolit untuk baterai dan mediator redoks. Ia juga menjaga stabilitas dalam kondisi pengoperasian suhu tinggi dan lingkungan oksidatif.
- 2) Co-TFSI telah menunjukkan stabilitas sebagai mediator redoks yang menjaga stabilitas selama proses pengukuran siklik, meskipun rincian spesifik tidak selalu diberikan dalam penelitian. Co-TFSI menunjukkan interaksi yang signifikan dengan matriks dan stabilitas termal, serta transparansi di berbagai wilayah spektral, yang dikonfirmasi oleh spektroskopi FT-IR (Gupta et al., 2022).

- 3) Co-TFSI juga menunjukkan stabilitas elektrokimia yang baik. Dalam elektrolit gel polimer, Co-TFSI mencapai konduktivitas ionik $1,11 \times 10^{-4} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pada $30 \text{ }^\circ\text{C}$ dan $4,26 \times 10^{-4} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pada $80 \text{ }^\circ\text{C}$, dengan transfer Li-ion angka 0,36 dan jendela stabilitas elektrokimia 4,7 V vs. Li/Li⁺ (Ruan et al., 2022). Co-TFSI dapat menjalani reaksi redoks reversibel dan mengambil bagian aktif dalam proses transfer muatan sehingga menjadikannya serbaguna dalam aplikasi elektrokimia.
- 4) Co-TFSI telah digunakan dalam sel surya perovskite untuk meningkatkan stabilitas dan kinerja sel surya (Nakka et al., 2023).

c. Konduktifitas

Co-TFSI memiliki sifat konduktivitas ionik yang sangat baik dan sangat cocok untuk aplikasi dalam elektrolit padat, gel ion, dan sistem lain yang mengutamakan mobilitas dan stabilitas ionik. Kinerjanya semakin ditingkatkan oleh suhu, kandungan cairan ionik, dan anion spesifik yang terlibat dalam komposisi elektrolit. Dalam film padat, seperti sel surya perovskite, Co-TFSI secara signifikan meningkatkan konduktivitas lapisan transpor lubang. Berikut ini penjelasan umum sifat konduktivitas Co-TFSI.

- 1) Co-TFSI menunjukkan konduktivitas ionik yang tinggi dalam berbagai aplikasi. Misalnya, ketika dimasukkan ke dalam elektrolit polimer padat, ia mencapai konduktivitas ionik yang tinggi terutama bila dikombinasikan dengan cairan ionik lainnya. Konduktivitas tertinggi yang dilaporkan adalah sekitar $2,42 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$ pada suhu $30 \text{ }^\circ\text{C}$ yang menunjukkan efektivitasnya dalam meningkatkan mobilitas ionik secara keseluruhan dalam elektrolit keadaan padat komposit (Sidhik et al., 2018).

- 2) Konduktivitas ionik Co-TFSI bervariasi menurut suhu. Dalam sistem ion-gel, konduktivitas berkisar antara 10^{-3} hingga 10^{-2} S/cm pada suhu antara 25-110 °C. Hal ini menunjukkan bahwa konduktivitas meningkat seiring suhu, sehingga cocok untuk aplikasi suhu tinggi (Cowan et al., 2016).
- 3) Konduktivitas Co-TFSI berhubungan dengan anion TFSI. Anion TFSI-, dengan muatan negatifnya yang relatif bebas dan ukurannya yang besar, mengurangi interaksi dengan kation, sehingga menghasilkan konduktivitas yang lebih tinggi, terutama pada suhu 30 °C (Tułodziecki et al., 2016).
- 4) Konduktivitas listrik Co-TFSI bervariasi berdasarkan lingkungannya. Pada campuran *suksinonitrile-poli(etilen oksida)*, konduktivitas listrik ditemukan sekitar $4,7 \times 10^{-4}$ S•cm⁻¹ untuk rasio tertentu, sehingga cocok untuk berbagai aplikasi perangkat (Gupta et al., 2022).

d. Kelarutan

Co-TFSI larut dalam berbagai macam pelarut, sehingga memudahkan pengaplikasiannya pada berbagai bahan dan formulasi. Co-TFSI larut dalam semua pelarut yang digunakan dalam pembuatan sel surya perovskit seperti DMF, DMSO, IPA dan clorobenzena.

e. Sifat optik

Sifat optik Co-TFSI (*Cobalt bis(trifluoromethylsulfonyl)imide*) ditunjukkan terutama melalui transparansi di berbagai wilayah spektrum elektromagnetik. Secara khusus, Co-TFSI telah terbukti menunjukkan transparansi di wilayah UV-A, cahaya tampak, dan inframerah dekat. Transparansi yang luas ini membuatnya cocok untuk aplikasi yang memerlukan transmisi cahaya yang jelas pada rentang spektral ini, yang sangat berguna pada perangkat dan material optik

(Gupta et al., 2022). Properti ini berguna dalam aplikasi optoelektronik di mana material harus memungkinkan cahaya masuk. melewatinya tanpa penyerapan atau hamburan yang signifikan, memastikan bahwa bahan tersebut tidak mengganggu fungsi optik yang diinginkan.

f. Sebagai Dopan

Ketika Co-TFSI diolah menjadi bahan seperti perovskite, sifat-sifatnya dapat berubah. Misalnya, hal ini dapat memengaruhi struktur kristal, morfologi, dan sifat optoelektrik material, sehingga berpotensi menghasilkan kinerja yang lebih baik pada perangkat seperti sel surya.

Mekanisme doping Co-TFSI pada perovskite melibatkan beberapa proses utama yang meningkatkan kinerja dan stabilitas material, terutama dalam aplikasi seperti sel surya dan fotodetektor:

- 1) Oksidasi dan Transportasi Lubang. Co-TFSI, terutama dalam bentuk Co(III), bertindak sebagai dopan yang mengoksidasi *Spiro-OMeTAD*, bahan transportasi lubang yang umum digunakan dalam sel surya perovskite. Proses oksidasi ini meningkatkan konsentrasi pembawa muatan, sehingga meningkatkan efisiensi pengangkutan lubang. Hasilnya adalah peningkatan yang signifikan dalam efisiensi konversi daya sel surya perovskite, karena *Spiro-OMeTAD* yang diolah menghasilkan ekstraksi muatan yang lebih efektif (Nakka et al., 2023).
- 2) Pasivasi Cacat. Dalam konteks lapisan tipis perovskite seperti $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, doping ion Co, sering kali difasilitasi oleh zat aditif seperti ZIF-67, membantu memasivasi kondisi cacat, terutama yang berhubungan dengan lokasi Pb^{2+} yang tidak terkoordinasi. Pasivasi ini mengurangi pusat rekombinasi non-radiasi, sehingga menghasilkan sifat optoelektronik dan stabilitas material perovskite yang lebih baik. Pengurangan batas butir dan

penekanan status cacat berkontribusi pada peningkatan kinerja perangkat seperti fotodetektor (Cheng et al., 2023).

- 3) Pengurangan batas butir. Doping Co-TFSI juga berkontribusi terhadap penurunan batas butir pada struktur perovskite. Batas butir yang lebih sedikit mengurangi jalur rekombinasi pembawa muatan, sehingga meningkatkan efisiensi pengangkutan muatan dalam material. Mekanisme ini penting untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas perangkat berbasis perovskite secara keseluruhan.

Secara keseluruhan, doping Co-TFSI meningkatkan kinerja material perovskite melalui oksidasi material pengangkut lubang, pasivasi kondisi cacat, dan pengurangan batas butir, sehingga menghasilkan efisiensi dan stabilitas yang lebih baik pada perangkat optoelektronik berbasis perovskite.

g. Fungsi Sel Surya Perovskite

Co-TFSI ketika digunakan dalam sel surya perovskite, memiliki peran penting dalam meningkatkan kinerja dan stabilitas perangkat tersebut. Berikut adalah beberapa sifat dan efek spesifik Co-TFSI pada sel surya perovskite:

- 1) Peningkatan Stabilitas. Penambahan cairan ionik berbasis Co-TFSI ke dalam lapisan perovskite telah terbukti secara signifikan meningkatkan stabilitas jangka panjang sel surya perovskite. Misalnya, sel dengan Co-TFSI mempertahankan lebih dari 95% efisiensi awalnya setelah 1.000 jam penuaan¹.
- 2) Peningkatan kinerja. Co-TFSI berkontribusi terhadap pencapaian efisiensi konversi daya (PCE) yang tinggi pada sel surya perovskite. Penelitian telah melaporkan PCE lebih besar dari 21%

ketika cairan ionik berbasis Co-TFSI dimasukkan ke dalam lapisan perovskite (Gao et al., 2021; Seo et al., 2021).

- 3) Kontrol Morfologi. Kehadiran Co-TFSI dapat mempengaruhi kristalisasi film perovskite, menghasilkan film yang sangat kristalin dengan ukuran butir besar yang bermanfaat bagi efisiensi dan stabilitas sel surya (Gao et al., 2021).
- 4) Menstabilkan Struktur Perovskite. Dengan membentuk jaringan luas ikatan hidrogen dengan penghalang rendah, Co-TFSI berkontribusi pada stabilisasi struktur perovskite yang bermanfaat untuk menjaga integritas jalur transpor muatan dalam jangka waktu yang lama (Hu et al., 2022).
- 5) Penghambatan migrasi ion. Co-TFSI ditemukan secara efektif menghambat migrasi ion di lapisan perovskite. Hal ini penting untuk menjaga integritas struktural sel surya dan mencegah degradasi seiring berjalannya waktu (Chen et al., 2024).
- 6) Peningkatan transportasi muatan dan mencegah rekombinasi. Bahan yang dimodifikasi bersama TFSI dapat meningkatkan ekstraksi lubang dan mengurangi rekombinasi antarmuka yang merupakan faktor kunci dalam kinerja optoelektronik sel surya perovskite (J. Zhou et al., 2024). Cairan ionik berbasis Co-TFSI ini dapat meningkatkan kualitas lapisan perovskite sehingga menghasilkan transportasi muatan yang baik. Penambahan Co-TFSI membantu mengurangi rekombinasi muatan yang tidak diinginkan pada antarmuka sel surya. Hal ini penting untuk menjaga efisiensi yang tinggi karena memastikan lebih banyak pembawa muatan berkontribusi pada keluaran saat ini (Zhang et al., 2022).

Sifat-sifat Co-TFSI ini menjadikannya bahan tambahan yang berharga untuk sel surya perovskite, berkontribusi terhadap efisiensi konversi daya yang tinggi dan stabilitas jangka panjang. Penelitian dan pengembangan yang sedang berlangsung di bidang ini bertujuan untuk lebih memahami dan mengoptimalkan peran Co-TFSI dalam transportasi yang bertanggung jawab dan kinerja sel surya secara keseluruhan.

E. Kajian Penelitian yang Relevan

Penelitian yang relevan dengan penelitian penulis yaitu:

1. Penelitian yang dilakukan oleh (Noman et al., 2023) ia melakukan uji coba penelitian terhadap efisiensi dan stabilitas pada perovskite FAPbI_3 dengan menggunakan bahan SrCu_2O_2 . Perbedaan penelitian ini dengan peneliti yaitu peneliti menggunakan penambahan garam *Cobalt(II) bis(trifluoromethylsulfonyl)imide* (Co-TFSI) organik terhadap efisiensi fotolistrik perovskite FAPbI_3 .
2. Penelitian selanjutnya dilakukan oleh (Stanić et al., 2022) ia membahas tentang pengembangan sel surya perovskite FAPbI_3 dengan penambahan lapisan BaTiO_3 untuk meningkatkan efisiensi konversi energi. Perbedaan penelitian ini dengan peneliti yaitu peneliti menggunakan penambahan garam *Cobalt(II) bis(trifluoromethylsulfonyl)imide* (Co-TFSI) organik terhadap efisiensi fotolistrik perovskite FAPbI_3 .
3. Penelitian selanjutnya dilakukan oleh (M. I. Ali Umar et al., 2023) ia mendapatkan nilai efisiensi yang tinggi dan juga kestabilan dari perovskite MAPbI_3 pada variasi suhu annealing lapisan MAI (*metileammonium iodide*) dan untuk mengetahui sifat fisik berupa morfologi dari perovskite. Perbedaan penelitian ini dengan peneliti yaitu peneliti menggunakan konsentrasi penambahan garam *Cobalt(II) bis(trifluoromethylsulfonyl)imide* (Co-TFSI) organik terhadap efisiensi fotolistrik perovskite FAPbI_3 .

4. Penelitian selanjutnya dilakukan oleh (Triyanto et al., 2023) ia menggabungkan SnO_2 sebagai ETL dengan penggunaan perovskite FAPbI_3 dan MAPBr_3 sebanyak 5 mol% sehingga dapat menghasilkan efisiensi sebesar 24,7% dengan peningkatan terbesar pada V_{oc} dan faktor pengisian dayanya. Perbedaan penelitian ini dengan peneliti yaitu peneliti menggunakan penambahan garam *Cobalt(II) bis(trifluoromethylsulfonyl)imide* (Co-TFSI) organik terhadap efisiensi fotolistrik perovskite FAPbI_3 .
5. Penelitian selanjutnya dilakukan oleh (Huang et al., 2023) bersifat fotovoltaik FAPbI_3 yang didoping dengan Cs (*cesium*) dan Cl (*klorin*) berfokus pada peningkatan efisiensi dan stabilitas sel surya perovskite. Doping dengan Cs bertujuan untuk memperbaiki struktur kristal, mengurangi cacat dalam kristal dan meningkatkan kualitas film aktif. Sementara itu, penambahan Cl berfungsi meningkatkan mobilitas muatan dengan menciptakan saluran transportasi yang lebih baik untuk elektron dan hole. Perbedaan penelitian ini dengan peneliti yaitu peneliti menggunakan penambahan garam *Cobalt(II) bis (trifluoromethylsulfonyl) imide* (Co-TFSI) organik terhadap efisiensi fotolistrik perovskite FAPbI_3 .
6. Penelitian selanjutnya dilakukan oleh (A. Ali Umar et al., 2024) dilakukan untuk peningkatan kristalisasi perovskite FAPbI_3 dengan dibantu dengan molekul garam organik. Perbedaan penelitian ini dengan peneliti yaitu peneliti menggunakan penambahan garam *Cobalt(II) bis (trifluoromethylsulfonyl)imide* (Co-TFSI) organik terhadap efisiensi fotolistrik perovskite FAPbI_3 .
7. Penelitian selanjutnya dilakukan oleh (Makableh & Dalal'ah, 2022) ia melakukan uji coba untuk menyelidiki pengaruh fabrikasi dan suhu pada serapan optic, morfologi, dan struktur kristal film tipis perovskite yang disiapkan. Dengan tiga sampel yang berbeda yaitu FA, MAI, dan, PbI_3 . Yang mana pada penelitian ini peneliti juga menggunakan sampel FA dan

Fbl₃. Perbedaan penelitian ini dengan peneliti ialah peneliti menyelidiki penambahan garam *Cobalt(II) bis(trifluoromethylsulfonyl)imide* (Co-TFSI) organic terhadap efisiensi fotolistrik perovskite FAPbI₃.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

A. Jenis Penelitian

Jenis penelitian ini adalah penelitian eksperimen. Dalam penelitian ini, peneliti secara sengaja memanipulasi variabel independen (perlakuan/ treatment) yaitu dengan penambahan Co-TFSI terhadap variabel dependen (hasil) yaitu perovskite dan pada akhirnya mengamati dampaknya.

B. Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di *Laboratory Organic and Printed Electronic (OPEL) Institute Microengineering and Nanoelectronics (IMEN)* Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM), Bangi, Selangor Darul Islam, Malaysia.

C. Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dalam waktu 8 bulan mulai dari studi literature hingga ujian akhir penelitian yang dimulai dari bulan Juni 2024 hingga bulan Januari 2025.

D. Alat dan Bahan Penelitian

Adapun alat yang digunakan ditampilkan di Tabel 3.1 dan bahan yang digunakan ditampilkan di Tabel 3.2.

Tabel 3.1 Alat yang digunakan dalam proses sintesis perovskite FAPbI₃

| No | Nama Alat | Fungsi |
|----|----------------|--|
| 1 | Botol sintesis | Berfungsi sebagai tempat atau wadah bahan-bahan yang telah ditimbang seperti PbI ₃ , Co (Cobalt), PEAI, P ₃ HT, dan zat lainnya. |
| 2 | Cawan petri | Berfungsi untuk meletakkan atau menyimpan substrat |

| | | |
|----|-----------------------------------|---|
| 3 | Gelas beaker | Berfungsi sebagai tempat mencuci botol-botol sintesis dan alat lainnya. |
| 4 | Kain halus | Berfungsi untuk membersihkan kaca ITO dari debu. |
| 5 | Multimeter | Berfungsi untuk mengetahui sisi kaca ITO yang mengandung resistansi dan mengukur nilai resistansinya. |
| 6 | Timbangan digital | Berfungsi untuk menimbang massa zat kimia. |
| 7 | Tweezer dan Spatula | Berfungsi untuk mengambil zat kimia/senyawa dan substrat yang digunakan dalam penelitian. |
| 8 | Magnetik stirrer | Berfungsi untuk mengaduk larutan. |
| 9 | Oven | Berfungsi untuk mengeringkan botol dan tweezzer. |
| 10 | Ultrasonic cleaner | Berfungsi untuk proses sonikasi botol sintesis dan membantu dalam proses pelarutan bahan kimia yang tidak mudah larut. |
| 11 | Glove | Berfungsi untuk melindungi tangan peneliti dari zat yang berbahaya dan melindungi alat dan bahan peneliti dari kontaminasi luar. |
| 12 | Sikat botol | Berfungsi untuk membersihkan botol sintesis dan alat-alat kecil lainnya. |
| 13 | Aluminium foil | Berfungsi untuk menutup gelas beaker. |
| 14 | Tip biru dan tip kuning | Berfungsi untuk mengambil zat-zat yang akan digunakan. |
| 15 | Micropipet | Berfungsi untuk mengambil zat sesuai dengan ukurannya. |
| 16 | Hot plate | Berfungsi untuk memanaskan sampel. |
| 17 | Spin-coating | Berfungsi untuk mendeposisikan lapisan tipis dengan cara meneteskan material dalam bentuk larutan ke pusat atas permukaan substrat yang tersimpan di atas piringan yang dapat berputar. |
| 18 | Glove box | Berfungsi untuk tempat atau ruang untuk menimbang zat-zat dalam pembuatan perovskite. |
| 19 | <i>Thermal evaporation system</i> | Berfungsi untuk melapisi perovskite dengan Cu (tembaga) |
| 20 | Kain microfiber | Berfungsi untuk membersihkan bagian |

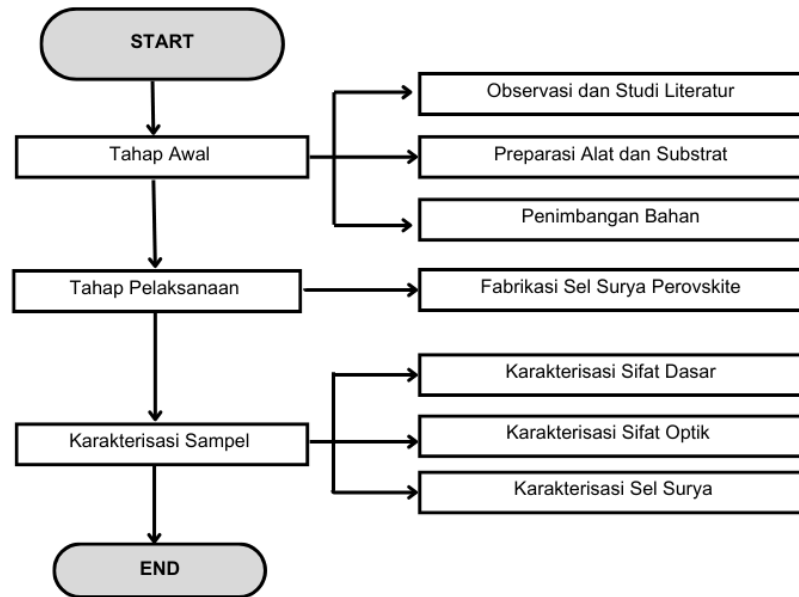
| | | |
|----|-------------------|---|
| | | ITO |
| 21 | Stopwatch | Berfungsi untuk melihat waktu ketika memanaskan sampel. |
| 22 | Substrat kaca ITO | Sebagai substrat semikonduktor |
| 23 | Cotton bud | Membersihkan sample |
| 24 | Blower | Membersih debu |

Tabel 3.2 Bahan yang digunakan dalam sintesis perovskite FAPbI₃

| No | Nama Senyawa | Formula Kimia | Kemurniaan |
|----|---|--|------------|
| 1 | <i>Timbal (II) Iodida</i> (PbI ₂) | PbI ₂ | 99,9 % |
| 2 | <i>Formamidinium Iodida</i> (FAI) | CH ₅ IN ₂ | 99,9 % |
| 3 | <i>Dimethylformamide</i> (DMF) | C ₃ H ₇ NO | 99,8 % |
| 4 | <i>Dimethyl sulfoxide</i> (DMSO) | (CH ₃) ₂ SO | 99,9 % |
| 5 | <i>Spiro-OMeTAD</i> | C ₈₁ H ₆₈ N ₄ O ₈ | 99,9 % |
| 6 | <i>FK 102 Co(III) TFSI Slat</i> | C ₃₀ H ₂₁ CoN ₁₂ O ₁₂ S ₆ F ₁₈ | 99 % |
| 7 | <i>Methyleammonium Iodide</i> (MAI) | CH ₃ NH ₂ | 99 % |
| 8 | <i>Methyleammonium Chloride</i> (MACl) | CH ₃ CIN | 99 % |
| 9 | <i>Hexamethylenetetramide</i> | HMT | 99 % |
| 10 | Ethanol | CH ₃ CH ₂ OH | 99,5 % |
| 11 | <i>Iso Propyl Alcohol</i> (IPA) | C ₃ H ₈ O | 99,9 % |
| 12 | <i>Copper Pellets</i> | Cu | 99,99 % |
| 13 | <i>Cesium Iodide</i> | Csi | 99,99 % |
| 14 | Aquades | H ₂ O | 100 % |
| 15 | Decon | | 100 % |
| 16 | <i>Phenethylammonium Iodide</i> | PEAI | 99,7 % |
| 17 | <i>Chlorobenzena</i> | C ₅ H ₅ C | 99,8 % |
| 18 | Timah Oksida | SnO ₂ | 85 % |
| 19 | <i>Lithium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide</i> (Li-TFSI) | LiN(SO ₂ CF ₃) ₂ | 99,9 % |

E. Prosedur Penelitian

Adapun prosedur yang dilakukan dalam penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Prosedur Penelitian

1. Observasi dan Studi Literatur Penelitian

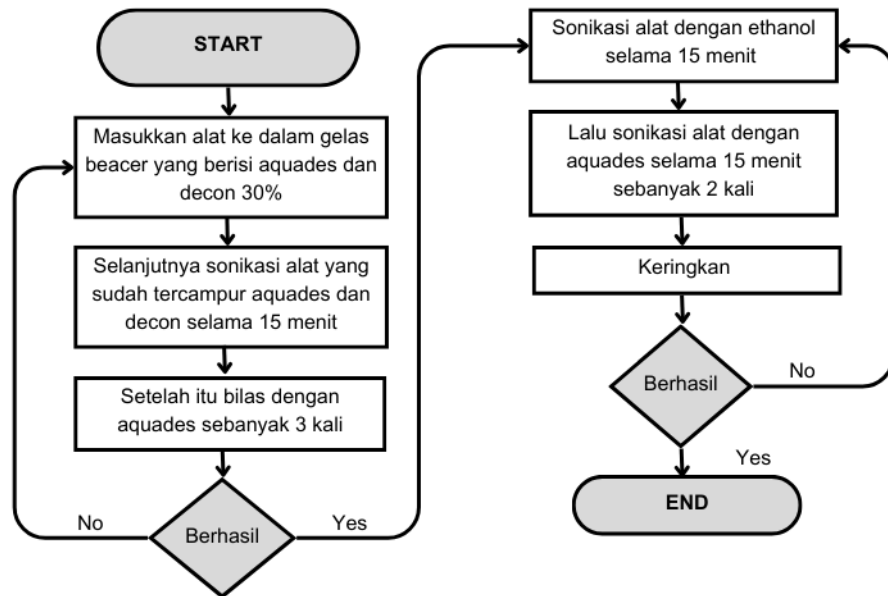
Observasi dan studi literatur dari pembuatan perovskite FAPbI_3 ini, merupakan langkah awal yang harus dilakukan sebelum melakukan penelitian. Penelitian diawali dengan membaca, mempelajari FAPbI_3 , mencari referensi yang berkaitan dengan sel surya perovskite terutama dari bahan FAPbI_3 . Untuk itu, ada beberapa tahapan yang harus diikuti dalam proses pembuatan perovskite FAPbI_3 , yaitu: preparasi alat, preparasi substrat, penimbangan bahan, lapisan SnO_2 , lapisan (PbI_2 , Co-TFSI, PEAI dan Spiro).

2. Tahap Preparasi Alat dan Substrat

a. Tahap Preparasi Alat

Sebelum menggunakan alat untuk pembuatan perovskite, perlu dilakukan terlebih dahulu membersihkan alat-alat yang digunakan seperti botol sintesis, magnetic stirred, tip mikro biru dan kuning, dan

tweezer. Adapun tahap dalam membersihkan alat dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Tahapan preparasi alat yang akan digunakan dalam proses sintesis sampel perovskite FAPbI_3 .

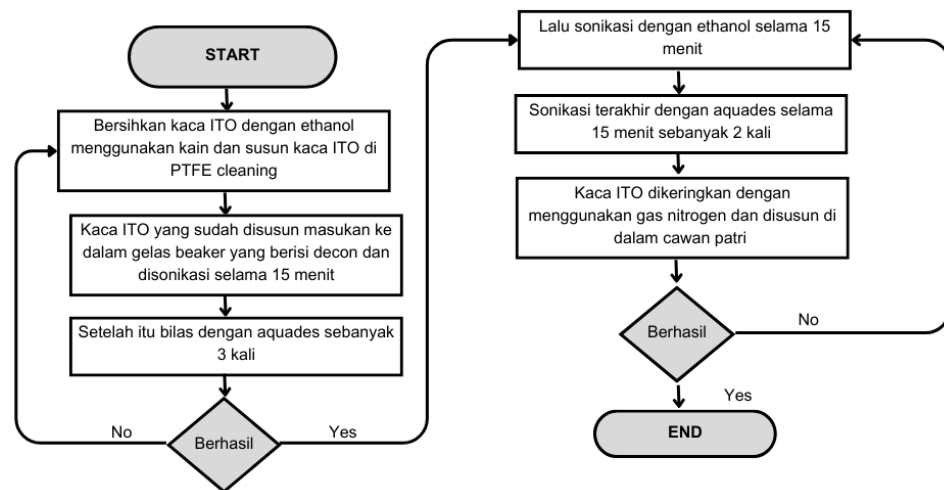
Dari tahapan diatas dapat diuraikan, hal pertama yang dilakukan yaitu membuat larutan *aquades* 150 ml yang dicampur dengan larutan *decon 30%* di gelas beaker yang kemudian alat yang akan dipreparasi dimasukkan kedalam larutan tersebut dan disonikasikan dalam *Ultrasonic cleaner* selama 15 menit. Setelah disonikasi bilas dengan *aquades* dengan cara masukkan *aquades* kedalam gelas beaker kemudian celupkan alat-alat tersebut dilakukan 3 kali, hingga *aquades* tidak ada busa lagi.

Selanjutnya masukkan alat-alat tersebut ke dalam gelas beaker yang berisikan ethanol kemudian disonikasi kedalam *Ultrasonic cleaner* selama 15 menit. Setelah itu pindahkan alat-alat ke gelas beaker yang berisikan *aquades* dan disonikasi kedalam *Ultrasonic*

cleaner selama 15 menit, dilakukan dua kali dengan mengganti aquades. Setelah disonikasi dengan aquades dua kali, tahap selanjutnya yaitu pengeringan, untuk botol dan *tweezer* pengeringannya menggunakan oven dengan suhu 150° selama 30 menit, tip kuning biru dikeringkan dengan oven selama 15 menit pada suhu 150° , sementara itu *Magnetic stirred* dikeringkan dengan aliran gas nitrogen.

b. Tahap Preparasi Substrat Kaca ITO

Lapisan penyusun dari perovskite FAPbI_3 menggunakan kaca indium tin oksida (ITO), karena memiliki sifat transparansi dan konduktifitas yang paling baik diantara oksida lain. Ukuran substrat kaca yang dipakai adalah $1,5\text{cm} \times 1,5\text{cm}$, dengan tahapan pembersihannya ditunjukkan oleh Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Tahapan preparasi substrat kaca ITO

Dari tahapan preparasi substrat kaca ITO pada Gambar 3.3, dapat diuraikan yang pertama membersihkan substrat kaca ITO dengan cara dilap menggunakan kain atau tisu yang sudah dibasahi ethanol, setelah itu disusun dalam *PTFE cleaning*. Selama penyusunan substrat perhatikan

arah ITO, bila perlu diberi tanda arah ITO pada *PTFE cleaning*. Setelah substrat kaca ITO tersusun rapi di *PTFE cleaning*, selanjutnya dimasukkan ke dalam gelas beaker yang berisi larutan *aquades* 150 ml dan decon 30% untuk disonikasi dalam ultrasonic selama 15 menit.

Setelah disonikasi selama 15 menit, bilas substrat kaca ITO dengan *aquades* sebanyak 3 kali hingga busanya menghilang, selanjutnya sonikasi dalam ultrasonic selama 15 menit dengan ethanol. Dan tahapan terakhir sonikasi menggunakan *aquades* sebanyak dua kali selama 15 menit dengan *aquades* yang berbeda. Setelah selesai tahap sonikasi, substrat kaca ITO, Selanjutnya keringkan substrat kaca ITO menggunakan aliran gas nitrogen.



Gambar 3.4 Merupakan tahapan preparasi substrat kaca ITO

3. Tahap Penimbangan Bahan Penyusun Perovskite FAPbI_3

a. Larutan *Timbal II Iodide* (PbI_2)

Pada penelitian ini, yang akan dibuat 12 sampel dengan menggunakan bahan *Timbal II Iodide* (PbI_2) yang digunakan sebanyak 692 mg, *Formamidinium Iodide* (FAI) digunakan sebanyak 2 mg, *Cesium Iodide* (CSI) digunakan sebanyak 2 mg dan *Heksametiltetramin* (HTM) dengan 2 mg dan dilarutkan dengan menggunakan pelarut *Dimethylformamide* (DMF) sebanyak 0,9 ml dan

Dimethyl Sulfoxide (DMSO) sebanyak 0,1 ml. Pada proses ini menggunakan bantuan Magnetic Stirrer yang diputar dengan kelajuan 500 Rpm dengan suhu 110°C selama 4 jam di atas hot plate.

b. Larutan *Cobalt bis(trifluoromethanesulfonyl)imide* (Co-TFSI)

Bahan yang digunakan pada penelitian ini, yaitu bahan *Cobalt bis(trifluoromethanesulfonyl)imide* (Co-TFSI) digunakan sebanyak 2 mg, *Formamidinium Iodide* (FAI) digunakan sebanyak 90 mg, *Methylammonium Iodide* (MAI) digunakan sebanyak 6,4 mg dan *Methyleammonium Chloride* (MACl) digunakan sebanyak 9 mg dilarutkan dengan menggunakan pelarut *Iso Propyl Alcohol* (IPA) sebanyak 1 ml. Proses pelarutan menggunakan bantuan Magnetic Stirrer yang diputar dengan kelajuan 700 Rpm di atas hot plate dengan suhu 25°C selama 4 jam.

c. Larutan *Phenethylammonium Iodide* (PEAI)

Bahan yang digunakan, yaitu *Phenethylammonium Iodide* (PEAI) digunakan sebanyak 12 mg dilarutkan dengan menggunakan pelarut *Iso Propyl Alcohol* (IPA) sebanyak 2 ml dengan bantuan Magnetic Stirrer yang diputar dengan kelajuan 700 Rpm di atas hot plate dengan suhu 25°C selama 4 jam.

d. Larutan *Spiro-OmeTAD*

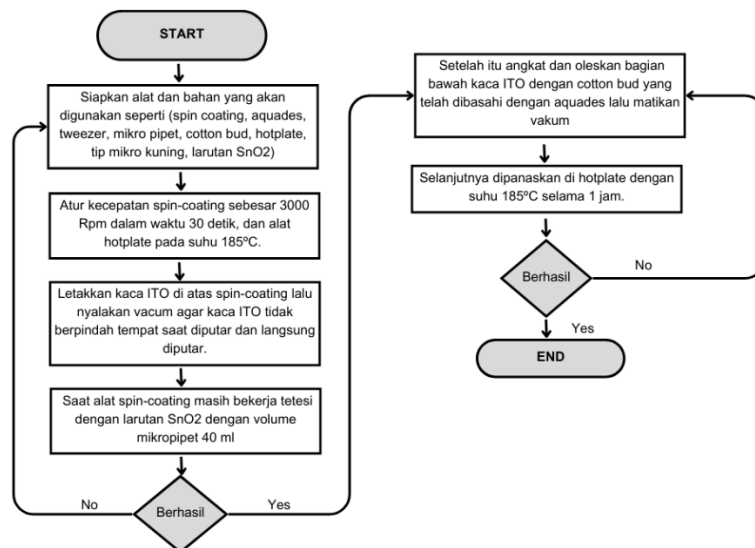
Bahan yang digunakan, yaitu *Spiro-OmeTAD* digunakan sebanyak 72,3 mg, *Lithium bis (trifluoromethanesulfonyl)imide* (*LiTFSI*) digunakan sebanyak 1 mg dan *Cobalt bis(trifluoromethanesulfonyl)imide* (Co-TFSI) digunakan sebanyak 1 mg dilarutkan dengan menggunakan pelarut *Chlorobenzene* sebanyak 1 ml dengan proses Magnetic Stirrer yang diputar dengan kelajuan 700 Rpm dengan suhu ruang selama 4 jam di atas hot plate.



Gambar 3.5 Merupakan proses penimbangan bahan-bahan yang akan digunakan pada pembuatan sampel perovskite FAPbI_3

4. Tahap Lapisan SnO_2 (*Tin Oxide*)

Lapisan pertama pada sampel perovskite FAPbI_3 menggunakan larutan SnO_2 yang harus difilter terlebih dahulu sebelum ditetesi diatas substrat kaca ITO. Proses pelapisan sampel pada kaca ITO dilakukan pada suhu 25°C dengan langkah-langkah yang ditunjukkan oleh Gambar 3.4.

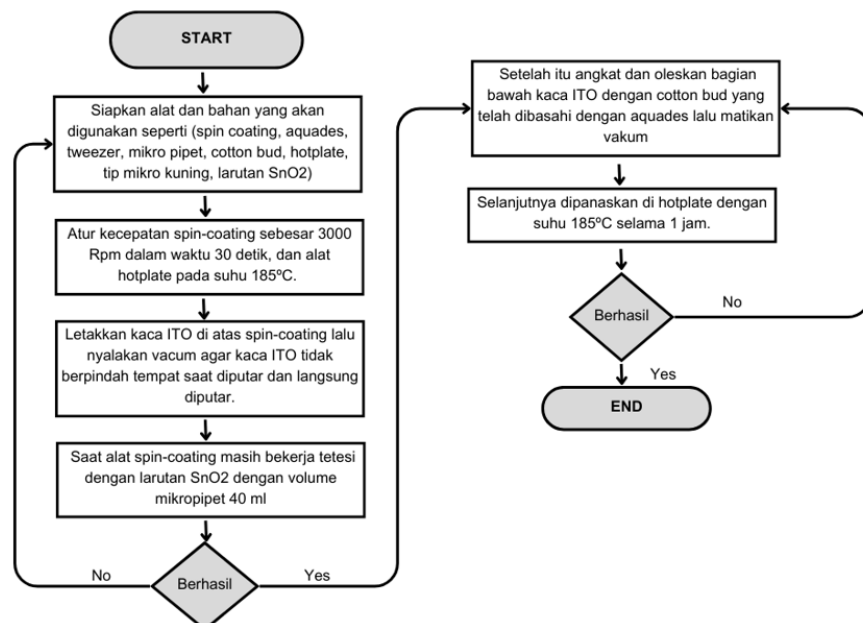


Gambar 3.6 Tahapan proses pembuatan lapisan SnO_2 perovskite FAPbI_3

Ada beberapa hal yang harus diperhatikan selama proses lapisan SnO_2 karena tahap ini dapat menentukan keberhasilan sampel perovskite yang telah dibuat: Pastikan kondisi kaca ITO tidak terbalik, salah satu cara untuk mengetahuinya bisa diuji dengan menggunakan multimeter. Pada tahap melap kaca ITO dengan cotton bud yang sudah dibasahi aquades pastikan yang dilap itu bagian ITO bukan glass. Pada saat memanaskan kaca ITO yang sudah dilapisi SnO_2 di atas hotplate pastikan posisinya tidak terbalik karena dapat membuat sampel rusak.

5. Tahapan Lapisan (PbI_2 , Co-TFSI, PEAI dan Spiro)

Proses lapisan perovskite setelah SnO_2 dilakukan didalam glove box. Setiap larutan yang ditetesi pada lapisan penyusun perovskite harus divakum dan gaskan supaya proses pelapisan perovskite mengkilat dan bagus. Sebagaimana yang ada pada Gambar 3.5.

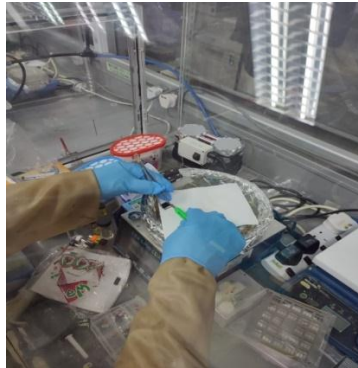


Gambar 3.7 Merupakan tahapan proses pembuatan lapisan perovskite

FAPbI_3

6. Tahapan Scrape Pengikisan

Tahapan pengikisan pada sampel perovskite FAPbI_3 menggunakan pisau cutter, bagian kaca ITO yang akan dikikis oleh pisau berada dibagian ITO nya atau bagian kaca yang dilap oleh cotton bud pada tahapan lapisan SnO_2 .



Gambar 3.8 Merupakan tahapan pengikisan pada sampel perovskite FAPbI_3

7. Tahapan Thermal

Pada tahap thermal ini, yaitu tahapan melapisi sampel menggunakan Cu/tembaga.



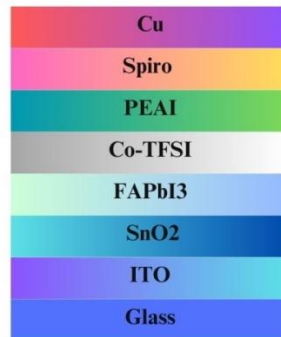
Gambar 3.9 Merupakan tahapan thermal pada sampel perovskite FAPbI_3

8. Fabrikasi Sel Surya Perovskite

Struktur sel surya perovskite (PSC) yang sudah dibuat disusun oleh film tipis SnO_2 di atas permukaan substrat kaca ITO, lapisan SnO_2 berada di atas substrat ITO yang dilakukan dengan proses spin-coating menggunakan larutan SnO_2 dengan kelajuan spin-coating sebesar 3000 Rpm dalam waktu 30s. Kemudian, film dipanaskan di atas hot plate pada suhu 185°C selama 1 jam. Untuk film perovskite, lapisan film perovskite setelah SnO_2 adalah lapisan PbI_2 dengan kelajuan spin-coating 1500 Rpm selama 60s, selanjutnya dipanaskan diatas hot plate selama 1 menit pada suhu 70°C dan untuk lapisan PbI_2 , Co-TFSI, PEAI dan Spiro dilakukan didalam glove box yang humidity atau kelembapannya $<30\%$ karena perovskite sangat mudah terdegradasi oleh kelembapan berdasarkan penelitian yang telah dilaporkan oleh (Gangishetty et al., 2016) bahwa film perovskite yang dibuat dengan menggunakan pada tingkat kelembapan yang sangat rendah (1%) menjadi struktur berbentuk kubus kecil dan terdefinisi dengan baik. Pada kelembapan sedang diatas (40%) menyebabkan butiran perovskite kehilangan bentuk awalnya berbentuk kubus, yang mulai satu sama lain, dan menyebabkan penurunan atau kerusakan pada kisi perovskite.

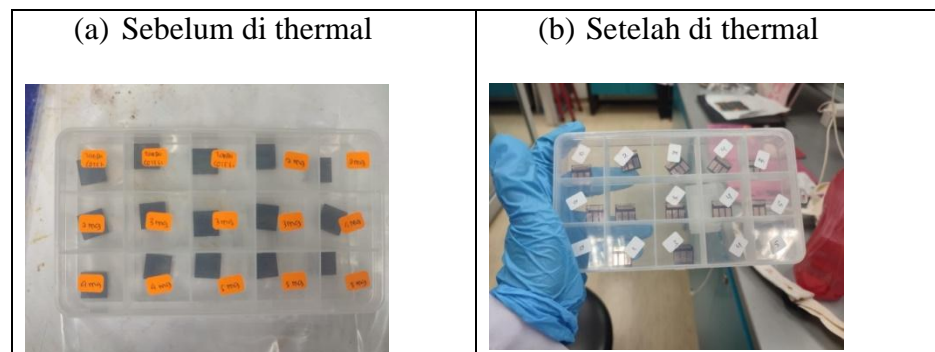
Selanjutnya lapisan Co-TFSI di spin-coating dengan menggunakan kelajuan spin-coating 2200 rpm dalam waktu 30s kemudian dipanaskan dihotplate dengan suhu 150°C selama 15 menit. Pada pemanasan dilapisan FAPbI_3 ini mengapa dipilih suhu 150°C karena berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh (Ahdaliza, 2023) dimana ia telah mendapatkan hasil bahwasanya suhu yang paling optimum ialah pada suhu 150°C . Selanjutnya lapisan PEAI di spin-coating dengan menggunakan kelajuan spin-coating 5000 Rpm dalam waktu 30s. Sedangkan lapisan penghantar hole yaitu Spiro-OmeTAD, menggunakan kecepatan spin-coating 3000 rpm dalam waktu 30s. Tahapan terakhir yaitu elektroda Cu/tembaga yang

ditumbuhkan diatas lapisan penghantar hole Spiro-OmeTAD menggunakan shadow mask dalam proses evaporasi termal. Dimana inti dari tahapan spin-coating menyatakan bahwa lapisan-lapisan pada perovskite FAPbI_3 tersebut akan menyebar menyeluruh dan merata.



Gambar 3.10 Lapisan Perovskite FAPbI_3 Dengan Penambahan Co-TFSI

Perovskite FAPbI_3 yang sudah di thermal didalam kotak thermal dimana nanti pada satu sampel perovskite FAPbI_3 memiliki tiga device yang dikarakterisasi J-V, artinya satu sampel bisa menghasilkan tiga data yang memiliki nilai dan tegangan yang dapat diukur dengan tahapan karakterisasi. Saat pentermalan selesai , sampel dikeluarkan dengan hati-hati supaya tidak tergores dan langsung disimpan didalam kotak.



Gambar 3.11 Sampel perovskite FAPbI_3 dengan penambahan Co-TFSI
 (a) Sampel perovskite penambahan Co-TFSI sebelum di thermal, dan
 (b) Sampel perovskite penambahan Co-TFSI setelah di thermal

9. Karakterisasi

Adapun beberapa alat yang bisa digunakan untuk mengkarakterisasi sampel perovskite FAPbI_3 yang telah dibuat adalah:

1. Karakterisasi Sifat Dasar

a. Karakterisasi Fase Kristal (XRD)

X-Ray Diffraction (XRD) adalah teknik analisis yang memanfaatkan interaksi antara sinar-X dengan struktur kristal dalam material. Prinsip dasar XRD berdasarkan pada fenomena difraksi sinar-X yang terjadi ketika berkas sinar-X mengenai material kristal. Ketika sinar-X berinteraksi dengan material kristal, elektron-elektron dalam atom material tersebut akan menyerap energi sinar-X dan kemudian memancarkannya kembali dalam bentuk gelombang elektromagnetik dengan frekuensi yang sama namun dengan fase yang berbeda. Proses ini menghasilkan pola difraksi yang karakteristik dan unik untuk setiap struktur kristal.

Cara kerja XRD dimulai dari sumber sinar-X yang dihasilkan dari tabung sinar-X, di mana elektron dipercepat dengan tegangan tinggi dan ditumbukkan pada target logam (biasanya Cu atau Mo). Sinar-X yang dihasilkan kemudian diarahkan ke sampel yang diletakkan pada holder sampel. Sampel akan berputar dengan sudut θ sementara detektor berputar dengan sudut 2θ untuk menangkap sinar-X yang terdifraksi. Intensitas sinar-X yang terdeteksi kemudian diplot terhadap sudut 2θ menghasilkan pola difraksi yang karakteristik.

Dalam proses pengukuran, sampel ditempatkan pada holder khusus yang dapat dirotasi dengan sudut tertentu (θ) terhadap berkas sinar-X datang. Bersamaan dengan itu, detektor yang berfungsi mengukur intensitas sinar-X yang terdifraksi juga

dirotasi dengan sudut 2θ untuk menangkap berkas yang terdifraksi. Proses difraksi ini mengikuti hukum Bragg yang dinyatakan dalam persamaan di bawah ini.

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

dimana d adalah jarak antara dua garis partikel, λ adalah panjang gelombang, dan θ adalah sudut difraksi. Detector pada XRD bergerak dengan kecepatan sudut yang konstan sepanjang lintasannya untuk mendeteksi berkas sinar-x yang didifraksikan oleh sampel. Data yang ditampilkan berupa hubungan antara intensitas dengan sudut 2θ . Data tersebut akan diolah untuk menentukan ukuran kristalin. Hubungan antara ukuran kristalin dengan lebar puncak difraksi sinar-X dapat diaproksimasi dengan persamaan Scherrer.

$$D = K \frac{\lambda}{B \cos \theta}$$

dengan D adalah ukuran (diameter) kristalin, λ adalah panjang gelombang sinar-X yang digunakan, θ adalah sudut Bragg, B adalah FWHM satu puncak yang dipilih, dan K adalah konstanta material yang nilainya kurang dari satu. Nilai yang digunakan umumnya untuk K adalah 0,09.



Gambar 3.12 Karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD)

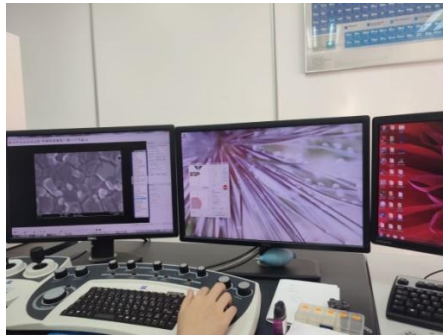
Fenomena pergeseran puncak difraksi ke kanan dan ke kiri pada pola XRD memberikan informasi penting tentang perubahan struktur kristal. Ketika puncak bergeser ke kanan (sudut 2θ lebih besar), hal ini mengindikasikan bahwa jarak antar bidang kristal (d-spacing) mengecil atau struktur kristal mengalami tekanan (compressed). Sebaliknya, pergeseran ke kiri (sudut 2θ lebih kecil) menunjukkan bahwa jarak antar bidang kristal membesar atau struktur kristal mengalami peregangan (expanded). Perubahan ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor seperti tegangan internal, substitusi atom, atau perubahan komposisi kimia. Sementara itu, pelebaran puncak difraksi juga dapat memberikan informasi tentang ukuran kristal dan regangan mikro dalam material (Goldstein, J., 2017)

b. *Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)*

Pengujian FESEM (*Field Emission Scanning Electron Microscope*) bertujuan untuk mengetahui sifat fisik baik itu morfologi, karakteristik, ukuran dari kristal pada sampel dengan perbesaran tertentu.

Karakterisasi FESEM (*Field Emission Scanning Electron Microscopy*) digunakan sebagai alat pengujian yang bertujuan untuk menganalisa morfologi lapisan tipis semikonduktor untuk mengetahui bentuk permukaan dan ketebalan lapisan tipis dari semikonduktor nanopartikel. Dengan menganalisa morfologi lapisan tersebut kita dapat mengetahui bentuknya apakah sesuai jika digunakan pada sel surya, kemudian kita akan mengetahui efektivitas bahan tersebut jika digunakan. Manfaat lain dari FESEM yaitu mudah dalam preparasi sampel, memiliki medan yang besar serta resolusi yang tinggi dan memiliki perbesaran yang

cukup signifikan (banyak analisis FESEM pada batuan yang mempunyai perbesaran antara 10000x sampai dengan 20000x). Semuanya ini sangat penting untuk membantu karakteristik bahan sampel (Masta, 2020).



Gambar 3.13 Karakterisasi FESEM

FESEM bekerja menggunakan Field Emission Gun (FEG) sebagai sumber elektron, di mana medan listrik kuat diaplikasikan pada kristal tungsten runcing untuk menghasilkan berkas elektron melalui proses quantum tunneling. Berkas elektron ini kemudian difokuskan dan dipercepat oleh sistem lensa elektromagnetik yang terdiri dari kondensor lens dan objective lens. Scanning coil mengarahkan berkas elektron untuk men-scan sampel dalam pola raster. Saat berkas elektron menumbuk sampel, terjadi interaksi yang menghasilkan secondary electrons (SE) dan backscattered electrons (BSE). SE memberikan informasi topografi permukaan, sementara BSE memberikan informasi komposisi material (Egerton, 2018) 1

2. Karakterisasi Sifat Optik

a. Karakterisasi *UV-Vis Spectrophotometer*

Spektrofotometer UV-Vis adalah alat ukur yang digunakan untuk menentukan konsentrasi senyawa yang dapat menyerap radiasi pada daerah ultraviolet (200-400 nm) atau pada daerah

cahaya tampak (400-800 nm). Serapan cahaya UV atau VIS (cahaya tampak) mengakibatkan transisi elektronik, yaitu promosi elektron-elektron dari orbital keadaan dasar yang berenergi rendah ke orbital keadaan tereksitasi berenergi lebih rendah (Suharti, 2019).



Gambar 3.14 Karakterisasi *UV-Vis Spectrophotometer*

Cara kerja UV-Vis Spectrophotometer dimulai dari sumber radiasi yang biasanya menggunakan dua jenis lampu, yaitu deuterium lamp untuk daerah UV dan tungsten-halogen lamp untuk daerah visible. Radiasi dari sumber kemudian melewati monokromator yang berfungsi memisahkan radiasi polikromatik menjadi panjang gelombang tunggal (monokromatik). Monokromator biasanya terdiri dari prisma atau grating yang dapat diputar untuk memilih panjang gelombang spesifik. Berkas cahaya monokromatik ini kemudian dibagi menjadi dua oleh beam splitter, di mana satu berkas melewati sampel dan berkas lainnya melewati referensi (blanko).

Setelah melewati sampel dan referensi, intensitas cahaya yang ditransmisikan diukur oleh detektor. Detektor akan mengkonversi energi cahaya menjadi sinyal listrik yang kemudian diperkuat dan diproses oleh sistem elektronik. Komputer yang terhubung dengan instrumen akan mengolah data dan menampilkan spektrum absorbansi atau transmitansi sebagai

fungsi panjang gelombang. Spektrum yang dihasilkan dapat memberikan informasi kualitatif tentang struktur molekul berdasarkan posisi puncak absorpsi, serta informasi kuantitatif tentang konsentrasi sampel berdasarkan nilai absorpsi pada panjang gelombang tertentu.

Pada Uv-Vis Spectrophotometer di dapatkan spektrum absorpsi dan energi gap (bandgap). Spektrum absorpsi adalah pengukuran seberapa banyak cahaya yang diserap oleh suatu sampel pada berbagai panjang gelombang yang ditampilkan dalam grafik dengan sumbu x menunjukkan panjang gelombang (nm) dan sumbu y menunjukkan nilai absorpsi. Sementara itu, energi gap (bandgap) adalah celah energi atau jarak energi yang memisahkan pita valensi (keadaan energy elektron terikat) dan pita konduksi (keadaan energy elektron bebas) dalam suatu material terutama semikonduktor. Nilai energi gap dapat ditentukan dari spektrum Uv-Vis dengan menggunakan metode Tauc Plot, yaitu plot antara $(\alpha h\nu)^2$ vs $h\nu$.

Energi gap (E) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan di bawah ini

$$E = hc/\lambda$$

Keterangan:

h adalah konstanta Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ Joule.detik)

c adalah kecepatan cahaya (3×10^8 meter/detik)

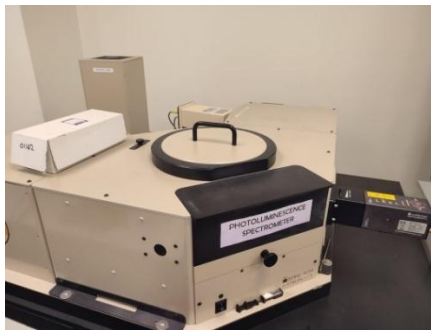
λ (lambda) adalah panjang gelombang dalam meter

Persamaan ini menunjukkan hubungan terbalik antara energi dan panjang gelombang, yang berarti semakin pendek panjang gelombang, semakin besar energi yang dihasilkan. Dalam konteks spektroskopi UV-Vis, panjang gelombang yang digunakan

untuk perhitungan energi gap adalah panjang gelombang pada tepi absorpsi (absorption edge) yang diperoleh dari spektrum absorbansi. Untuk memudahkan interpretasi, energi gap biasanya dinyatakan dalam satuan elektron volt (eV), di mana 1 eV setara dengan $1,602 \times 10^{-19}$ Joule. Nilai energi gap ini sangat penting dalam karakterisasi material semikonduktor karena menggambarkan energi minimum yang dibutuhkan elektron untuk berpindah dari pita valensi ke pita konduksi, yang pada akhirnya menentukan sifat optoelektronik material tersebut (Skoog, D. A., & Holler, 2017).

b. *Steady Photoluminescence (PL)*

Fotoluminesensi (PL) adalah emisi cahaya spontan dari suatu material di bawah eksitasi optik. Energi dan intensitas eksitasi dipilih untuk menyelidiki berbagai daerah dan konsentrasi eksitasi dalam sampel. Investigasi PL dapat digunakan untuk mengkarakterisasi berbagai parameter material (Gfroerer, 2000).



Gambar 3.15 Karakterisasi *Steady Photoluminescence (PL)*

Cara kerja spektroskopi PL dimulai dengan sumber eksitasi, biasanya berupa laser dengan panjang gelombang tertentu yang memiliki energi lebih besar dari energi gap material yang diuji. Berkas laser difokuskan pada sampel menggunakan sistem optik yang terdiri

dari lensa dan cermin. Ketika sampel menyerap foton dari laser, elektron dalam pita valensi tereksitasi ke pita konduksi, menciptakan pasangan elektron-hole (eksiton). Setelah waktu yang sangat singkat (umumnya dalam orde nano atau pikosekon), elektron akan kembali ke keadaan dasar melalui berbagai jalur rekombinasi, memancarkan foton dengan energi yang karakteristik terhadap transisi elektronik yang terjadi.

3. Karakterisasi Sel Surya

a. Karakterisasi Sifat Fotovolta (J-V Bawah Cahaya)

Parameter yang bisa digunakan untuk menentukan karakterisasi sifat Fotovolta (J-V Bawah Cahaya)

- 1) Arus hubungan terbuka atau short circuit current (I_{sc}) merupakan arus maksimum dari sel surya saat tidak ada resistansi, arus ini merupakan arus yang mengalir pada tegangan sel surya sama dengan nol.
- 2) Tegangan hubung terbuka atau open circuit voltage (V_{oc}) merupakan tegangan maksimum dari sel surya pada saat arus sel sama dengan nol atau bisa juga merupakan kapasitas dari tegangan maksimum yang dapat dicapai pada saat tidak ada arus, semakin sel surya mendekati nilai tegangan maksimum, maka arus sirkuit dari V_{oc} akan mendekati angka nol.
- 3) Kerapatan arus listrik (J_{sc}) sama dengan I_{sc} dimana arus maksimal yang diproduksi oleh sel surya (I_{sc}) didalam daerah teliti, untuk besar luas daerah yang diteliti umumnya digunakan $0,23 \text{ cm}^2$
Setara dengan $J_{sc} = (1 \times 1000) : 0,23$
- 4) Faktor pengisian (fill faktor = FF) pada sel surya merupakan besaran tidak berdimensi yang menyatakan perbandingan daya

maksimum yang dihasilkan oleh sel surya atau perovskite dimana perkalian itu antara V_{oc} dan I_{sc} .

- 5) PCE atau bisa juga disebut dengan η Efficiency (η) merupakan keseluruhan yang ditentukan oleh kerapatan arus (J_{sc}), tegangan (V_{oc}) dan fill factor pengukuran ini diukur dalam parameter bentuk persen (%) dengan mempresentasikan porsi energi menjadi energi listrik.

$$PCE = J_{sc} \times V_{oc} \times FF \quad (3.1)$$

b. Karakterisasi Sifat Arus Bocor (J-V Dalam Gelap)

Dalam pengukuran ini akan didapatkan nilai V_{TFL} yaitu tegangan batas terisi perangkap (*Trap-Filled Limit Voltage*) di mana semua perangkap dalam material menjadi terisi dengan pembawa muatan, dan peningkatan tegangan lebih lanjut menghasilkan peningkatan arus yang cepat.

Melalui nilai V_{TFL} dapat ditentukan variasi yang signifikan dalam mobilitas pembawa muatan (*Carrier Mobility*) melalui persamaan 3.2 dan densitas perangkap (*Trap Density*) yang menunjukkan perubahan yang relatif kecil melalui persamaan 3.3. :

$$J = \frac{9}{8} \epsilon \epsilon_0 \mu_h \frac{V^2}{L^3} \quad (3.2)$$

Dimana :

J = arus per satuan luas (current density)

ϵ = permitivitas relatif material

ϵ_0 = permitivitas ruang hampa (8.85×10^{-12} F/m)

μ_h = mobilitas pembawa muatan (hole mobility)

V = tegangan yang diterapkan

L = panjang/jarak

$$N = \frac{2 \epsilon \epsilon_0 V_{TFL}}{eL^2} \quad (3.3)$$

Dimana :

N = Kepadatan Perangkap (Trap Density)

ϵ_0 = Permittivitas ruang hampa

V_{TFL} = Tegangan Batas Terisi Perangkap (Trap-Filled Limit Voltage)

e = Muatan elektron

L = Panjang material (Xie et al., 2024)

c. Karakterisasi *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS)

Pengukuran *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) dilakukan untuk menentukan nilai konduktivitas listrik dari sel elektrokimia. Bentuk kurva EIS yang diperoleh adalah setengah lingkaran dan garis lurus. Setengah lingkaran pada EIS berhubungan dengan nilai hambatan elektron (R_e) dan hambatan transfer muatan (R_{ct}) (Liza et al., 2023).



Gambar 3.16 Proses pengambilan data karakterisasi J-V

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis Perovskite FAPbI_3 dengan penambahan Co-TFSI telah berhasil dilakukan di *Institute Micro Engineering and Nanotechnology* (IMEN) Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) pada tanggal 08 Juli 2024 – 07 Agustus 2024. Dari kegiatan penelitian bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan garam organik Co-TFSI terhadap fotolistrik perovskite FAPbI_3 . Untuk mengetahui nilai yang dihasilkan oleh sampel dapat diketahui melalui proses karakterisasi. Pada tahapan observasi dan studi literatur merupakan tahapan mempelajari tentang apa itu FAPbI_3 dan bagaimana prosedur penelitian sebelumnya. Selanjutnya, untuk tahap preparasi alat dan bahan merupakan tahapan penentu keberhasilan dari sintesis sampel perovskite FAPbI_3 .

Adapun tujuan dilakukannya tahapan preparasi alat dan bahan karena perovskite FAPbI_3 dengan penambahan Co-TFSI sangat mudah terdegradasi oleh pengaruh luar terutama debu, suhu, kelembapan dan lainnya, sehingga proses pembuatan sampel harus bersih dan steril. Oleh karena itu, Peneliti melakukan tahap preparasi pada setiap alat yang akan digunakan seperti , penjepit, botol kaca, pipet, substrat kaca ITO. Salah satu penyebab kegagalan penelitian yaitu kurang sterilnya alat yang digunakan pada proses pembuatan perovskite. Begitupun dengan preparasi pada substrat kaca ITO dibersihkan menggunakan larutan decon, etanol dan aquades supaya sampel perovskite yang dibuat tidak cacat atau berlubang saat dilapisi oleh larutan penyusun perovskite FAPbI_3 dengan penambahan Co-TFSI.

Selanjutnya, untuk tahapan penimbangan dilakukan dengan hati-hati, karena pada tahap penimbangan dilakukan didalam *Glovebox* dengan empat lapisan sarung tangan yang digunakan agar kesterilan alat tetap terjaga. Hal tersebut dapat menyebabkan keterbatasan dalam bergerak, sehingga penimbangan dilakukan dengan hati-hati karena penimbangan yang dilakukan dalam takaran yang sangat kecil. Setelah tahap penimbangan, selanjutnya dilakukan tahap lapisan dimana larutan yang

digunakan harus difilter terlebih dahulu agar lebih seteril. Sehingga sampel perovskite yang dibuat bisa dilanjutkan pada tahap thermal dan diukur melalui tahapan karakterisasi.

Dalam pembuatan perovskite FAPbI_3 , penambahan Co-TFSI dilakukan dengan variasi konsentrasi yang berbeda, yaitu 0 mg, 2 mg, 3 mg, 4 mg, dan 5 mg. Pemilihan konsentrasi ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan Co-TFSI terhadap sifat dan kinerja perovskite yang dihasilkan. Konsentrasi 1 mg tidak digunakan dalam penelitian ini karena dianggap terlalu rendah dan tidak memiliki pengaruh yang berarti secara praktis. Dengan mempertimbangkan konsentrasi perovskite yang digunakan, penambahan 1 mg diprediksi tidak akan memberikan perbedaan yang berarti dalam hasil eksperimen. Oleh karena itu, untuk menjaga fokus dan ketepatan penelitian, konsentrasi 1 mg tidak dievaluasi.

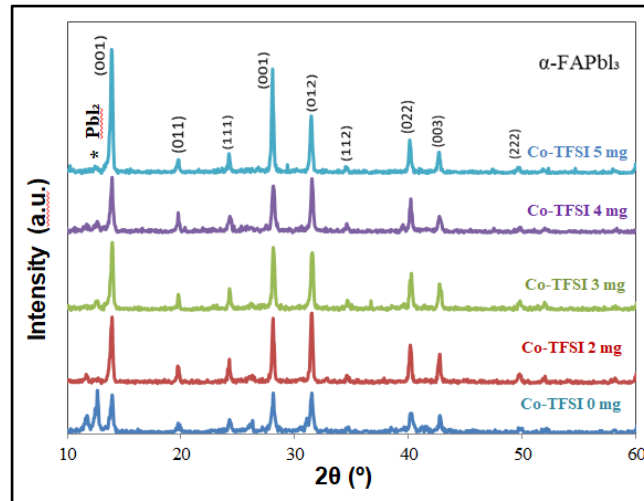
Untuk mengetahui struktur perovskite FAPbI_3 melalui karakterisasi XRD, micro strukturnya melalui karakterisasi FESEM, sifat optiknya melalui karakterisasi *Steady Photoluminescence* dan *UV-Vis Spectrophotometer*, dan yang terakhir untuk mengetahui nilai prestasi surya sel melalui Karakteristik Sifat Fotovolta (J-V Bawah Cahaya dan J-V dalam gelap) dan Dinamika cas pada antarmuka (*Electrochemical Impedance Spectroscopy*).

A. HASIL

1. Karakterisasi Dasar

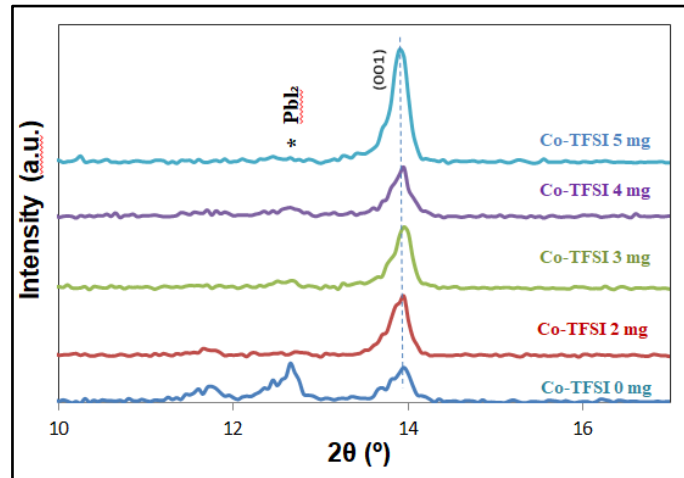
a) *Karakterisasi Fase Kristal (XRD)*

Hasil karakterisasi XRD sampel ditunjukkan pada Gambar 4.1 dari hasil karakterisasi dilakukan analisis kualitatif dengan cara pencocokan (*search match*) spektrum hasil karakterisasi X-RD dengan data JCPDS (*Joint Commite on Powder Diffraction Standard*) file no JCPDS 00-068-0701 yang berguna untuk mengetahui senyawa apa saja yang terkandung dalam *perovskite*.



Gambar 4.1 Hasil karakterisasi XRD perovskite FAPbI₃

Pada Gambar 4.1 merupakan hasil karakterisasi XRD dengan variasi 0 mg, 2 mg, 3 mg, 4 mg dan 5 mg. Pada grafik XRD, terlihat bahwa sampel perovskite FAPbI₃ dengan penambahan Co-TFSI menunjukkan puncak-puncak spektrum yang tajam pada bidang-bidang (001), (011), (111), (001), (012), (112), (022), (003), dan (222). Selain itu, terdeteksi juga puncak yang berasal dari PbI₂ yang ditandai dengan simbol bintang (*) pada spektrum dengan yang menggunakan sudut 2θ (degree) yang mana sudut difraksi yang disebut sudut theta dan diukur dalam derajat. Puncak-puncak spektrum yang tajam ini mengindikasikan kristalinitas tinggi, yang menunjukkan pembentukan struktur kristal yang baik pada material perovskite FAPbI₃.



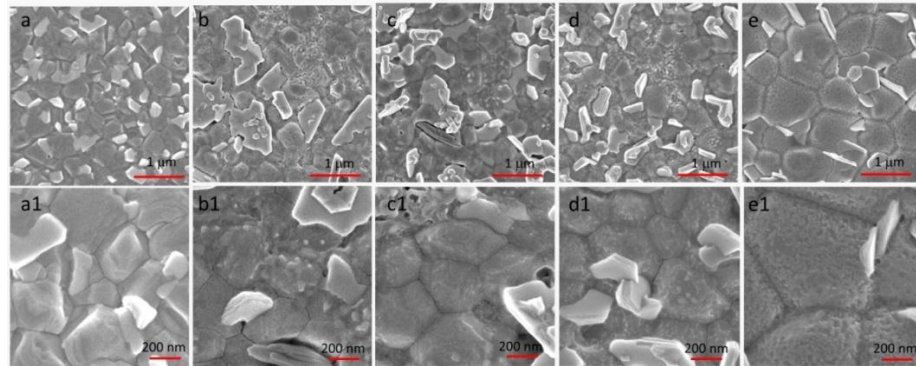
Gambar 4.2 Pembesaran Pola XRD Pada Skala 10 Hingga 16°

Gambar 4.2 menunjukkan spektrum sinar-X (XRD) yang diperbesar pada rentang sudut 2θ antara 10° hingga 16° untuk sampel perovskite FAPbI_3 dengan variasi konsentrasi Co-TFSI. Pada spektrum ini, terdapat dua puncak utama yang signifikan. Puncak yang ditandai dengan PbI_2 (ditandai dengan tanda bintang *) dan puncak yang berkaitan dengan bidang kristal (001) dari struktur perovskite FAPbI_3 .

b) Field emission scanning electron microscopy (FESEM)

Setelah dilakukan pembuatan perovskite dan juga karakterisasi fasa atau XRD pada FAPbI_3 dengan variasi 0 mg, 2 mg, 3 mg, 4 mg, dan 5 mg perovskite FAPbI_3 selanjutnya sampel dikarakterisasi menggunakan mikroskop elektron pemindai emisi (FESEM). Untuk hasil dari FESEM bertujuan melihat morfologi yang ada pada sampel perovskite FAPbI_3 . Pada Gambar 4.3 memperlihatkan hasil karakterisasi morfologi dengan menggunakan mikroskop electron pemindai emisi (FESEM) lapisan perovskite FAPbI_3 pada variasi

dengan perbesaran 10.000 kali pada baris atas dan 30.000 kali pada barisan bawah.



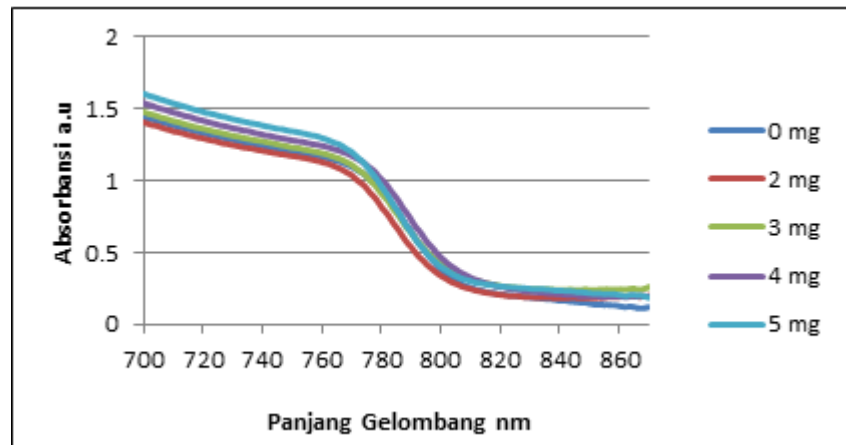
Gambar 4.3 FESEM perovskite FAPbI₃ (Scale bar Untuk a-e =1 μm dan a1-e1 =200 nm)

Pada Gambar 4.3 Hasil karakterisasi menggunakan *Field Emission Scanning Electron Microscope* (FESEM) menunjukkan morfologi permukaan film tipis perovskite FAPbI₃ dengan penambahan Co-TFSI yang ditampilkan dalam dua baris dengan skala yang berbeda. Pada baris atas a (0 mg), b (2 mg), c (3 mg), d (4 mg), dan e (5 mg) dengan scale bar 1 μm, Sementara itu, pada baris bawah (a1 (0 mg), b1 (2 mg), c1 (3 mg), d1 (4 mg), dan e1 (5 mg)) dengan scale bar 200 nm.

2. Karakterisasi Sifat Optik

a) Karakterisasi UV-Vis Spectrophotometer

Pada kurva karakterisasi sinar UV-Vis Spectrophotometer perovskite FAPbI₃ dengan menggunakan doping Co-TFSI didapatkan puncak absorbansi pada rentang panjang gelombang 700-860 nm, seperti pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Spektrum Absorbansi Variasi Ketebalan Lapisan Perovskite FAPbI₃

Pada Gambar 4.4 menunjukkan spektrum absorbansi dari lapisan perovskite FAPbI₃ dengan variasi ketebalan akibat penambahan garam Co-TFSI dalam jumlah yang berbeda, yaitu 0 mg, 2 mg, 3 mg, 4 mg, dan 5 mg.

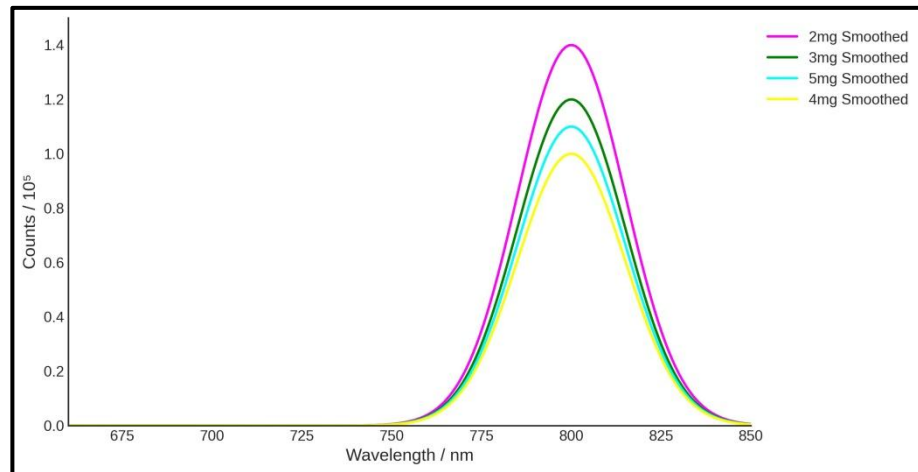
Tabel 4. 1 Nilai energi gap (bandgap) Perovskite FAPbI₃

| Konsentrasi Co-TFSI | Bandgap Energy |
|---------------------|----------------|
| 0 mg | 1,56 eV |
| 2 mg | 1,56 eV |
| 3 mg | 1,54 eV |
| 4 mg | 1,54 eV |
| 5 mg | 1,56 eV |

Pada Tabel 4.1 nilai energi gap (bandgap) dari perovskite FAPbI₃ dengan variasi konsentrasi garam Co-TFSI, yaitu 0 mg, 2 mg, 3 mg, 4 mg, dan 5 mg. Pada konsentrasi 0 mg dan 2 mg terdapat nilai energi gap 1,56 eV. Sedangkan pada konsentrasi 3 mg dan 4 mg terjadi penurunan dengan nilai energi gap 1,54 eV dan pada konsentrasi 5 mg terjadi peningkatan dengan nilai energi gap 1,56 eV.

b) *Steady Photoluminescence*

Spektrum Photoluminescence (PL) yang ditampilkan dalam Gambar 4.5 menunjukkan karakterisasi optik dari perovskite FAPbI₃ dengan penambahan doping Co-TFSI.



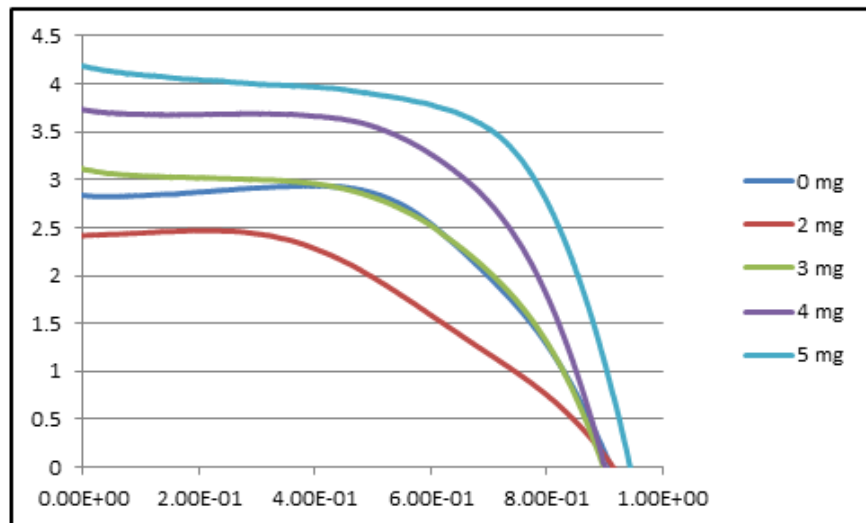
Gambar 4.5 Steady Photoluminescence Perovskite FAPbI₃

Pada Gambar 4.5 memperlihatkan 4 kurva yang berbeda-beda mulai dari 2 mg sampai dengan 5 mg. Rentang panjang gelombang yang diukur berada pada 660- 840 nm. Pada 2 mg terdapat pada puncak $1,4 \times 10^5$. Pada 3 mg terdapat pada puncak $1,1 \times 10^5$. Pada 4 mg terdapat pada puncak $0,7 \times 10^5$ dan pada 5 mg terdapat pada puncak $0,5 \times 10^5$.

3. Karakterisasi Prestasi Sel Surya

a) *Karakteristik Sifat Fotovolta (J-V Bawah Cahaya)*

Pada kurva arus dari karakterisasi pengukuran J-V dilakukan pada suhu kamar diperoleh dari divais terbaik pada variasi Co-TFSI perovskite FAPbI₃ dengan bentuk kurva yang ditunjukkan oleh Gambar 4.6.



Gambar 4.6 J-V Dibawah Cahaya Perovskite FAPbI₃

Pada gambar 4.6 kurva yang dihasilkan dari karakterisasi rapat arus-tegangan (J-V) perovskite FAPbI₃ dengan penambahan doping Co-TFSI untuk variasi 0 mg, 2 mg, 3 mg, 4 mg dan 5 mg diambil dari data divais terbaik dari beberapa sampel yang diujikan yakni pada perovskite FAPbI₃ dengan penambahan doping Co-TFSI, data yang diambil tersebut adalah sampel 0 device 2 pada 0 mg, sampel 2 device 2 pada 2 mg, sampel 3 device 3 pada 3 mg, sampel 4 device 2 pada 4 mg dan sampel 5 device 3 pada 5 mg. Kurva pada Gambar 4.6 memperlihatkan bahwasanya karakteristik J-V sangat mempengaruhi jumlah volume larutan Co-TFSI.

Begitupun tahapan anil pada setiap lapisannya, untuk nilai dari rapat arus hubungan singkat (J_{sc}), factor pengisi atau fill factor (FF), V_{oc} atau nilai tegangan hubungan terbuka dan efisiensi konversi daya (PCE) menunjukkan bahwasanya variasi 5 merupakan variasi Co-TFSI optimum atau variasi terbaik yang nampak jelas pada grafik J-V pada Gambar 4.5 sedangkan pada variasi 3 mg dan 4 mg mengalami

penurunan dibandingkan dengan 5 mg sedangkan variasi 2 mg menunjukkan peningkatan dibandingkan dengan 0 mg.

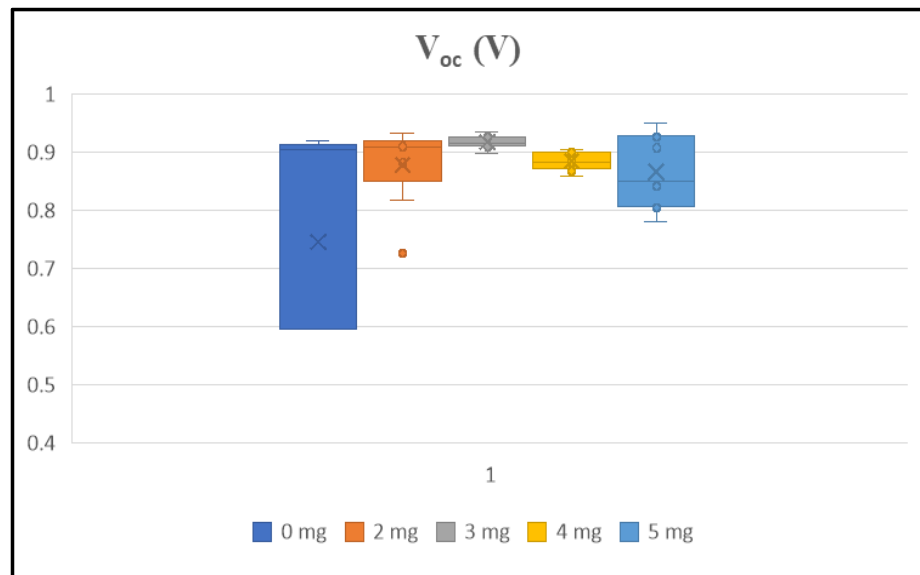
Pada karakterisasi J-V yaitu pengukuran arus dan tegangan menggunakan alat power gamry yang dihubungkan dengan lampu xenon dengan intensitas cahaya 1000w/m^2 . Sampel perovskite FAPbI_3 dengan penambahan doping Co-TFSI dengan variasi 0 mg, 2 mg, 3 mg, 4 mg dan 5 mg. Ada beberapa parameter yang diukur yaitu V_{oc} , J_{sc} , FF dan PCE. Data perovskite diambil dengan menggunakan Gamry Instrumen. Untuk karakterisasi J-V kita akan mengetahui nilai V_{oc} dari setiap sampel dan juga average serta standard deviation (sd), nilai J_{sc} , nilai FF, dan juga nilai efisiensi dari sel surya (PCE) dari setiap sampel yaitu sampel 0 mg, 2 mg, 3 mg, 4 mg dan 5 mg.

Tabel 4.2 Data nilai karakterisasi J-V perovskite FAPbI_3

| Sampel | V_{oc} (V) Max (avg \pm sd) | J_{sc} (mA/cm ²) Max (avg \pm sd) | FF Max (avg \pm sd) | PCE % Max (avg \pm sd) |
|--------|------------------------------------|--|--------------------------|-----------------------------|
| 0 mg | 0.91 (0.74 \pm 0.34) | 2.83 (2.19 \pm 1.07) | 0.59 (0.44 \pm 0.13) | 1.52 (0.96 \pm 0.66) |
| 2 mg | 0.91 (0.87 \pm 0.06) | 2.41 (1.40 \pm 0.52) | 0.44 (0.44 \pm 0.08) | 0.99 (0.56 \pm 0.26) |
| 3 mg | 0.89 (0.91 \pm 0.01) | 3.11 (1.60 \pm 0.80) | 0.54 (0.52 \pm 0.02) | 1.51 (0.77 \pm 0.40) |
| 4 mg | 0.90 (0.88 \pm 0.01) | 3.73 (2.27 \pm 0.73) | 0.59 (0.48 \pm 0.09) | 1.98 (1.02 \pm 0.52) |
| 5 mg | 0.77 (0.86 \pm 0.06) | 4.09 (2.58 \pm 0.87) | 0.62 (0.56 \pm 0.05) | 1.98 (1.26 \pm 0.44) |

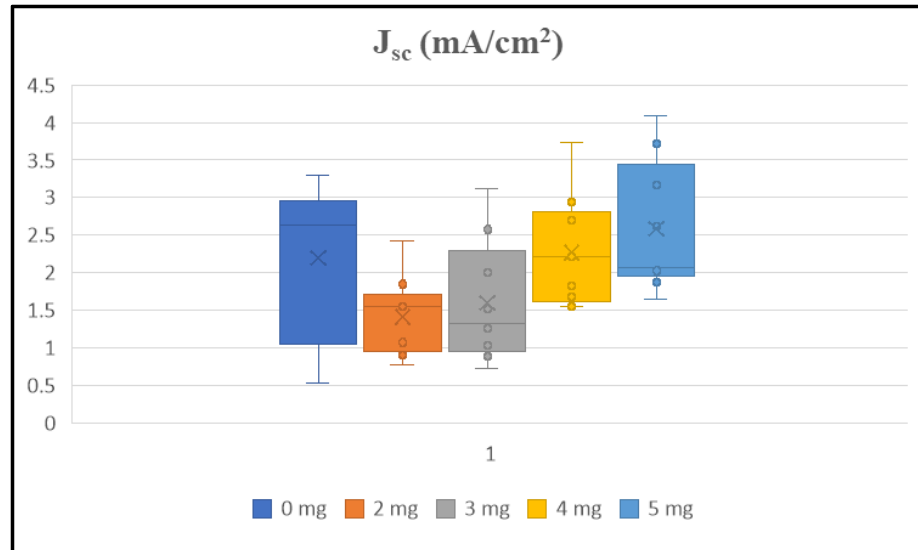
Berdasarkan Tabel 4.2 menjelaskan bahwa ada 5 sampel perovskite FAPbI_3 yang diujikan dengan penambahan doping Co-TFSI dengan variasi yaitu 0 mg, 2 mg, 3 mg, 4 mg dan 5 mg dengan menggunakan karakterisasi J-V. Pada tabel 4.2 terdapat nilai rata-rata atau average dari sampel perovskite yang dibuat selain itu juga ada nilai standard deviation (sd) atau biasa disebut dengan simpangan

baku atau deviasi standar yang merupakan ukuran sebaran statistik yang paling lazim digunakan. Maksudnya nilai dari data per divais perovskite diukur pada Tabel 4.2 merupakan kesimpulan dari data yang diukur pada penelitian yang dilakukan. Selanjutnya, data tersebut diolah menggunakan Microsoft Excel untuk mengetahui nilai-nilai parameter V_{oc} (tegangan rangkaian terbuka), J_{sc} (kerapatan arus listrik), FF (faktor pengisian) dan PCE (power conversion efisiensi).



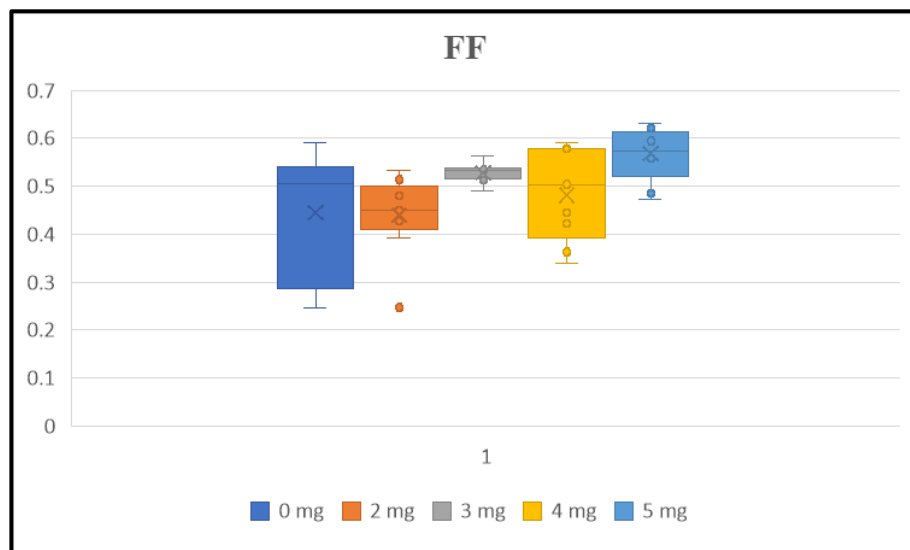
Gambar 4.7 Parameter V_{oc} Perovskite FAPbI₃

Pada Gambar 4.7 menunjukkan hubungan antara konsentrasi zat aditif (dalam mg) dan tegangan open-circuit (V_{oc}) pada perangkat berbasis perovskite. Pada konsentrasi 0 mg di tandai dengan warna (biru tua), 2 mg (orange), 3 mg (abu-abu), 4 mg (kuning) dan 5 mg (biru muda).



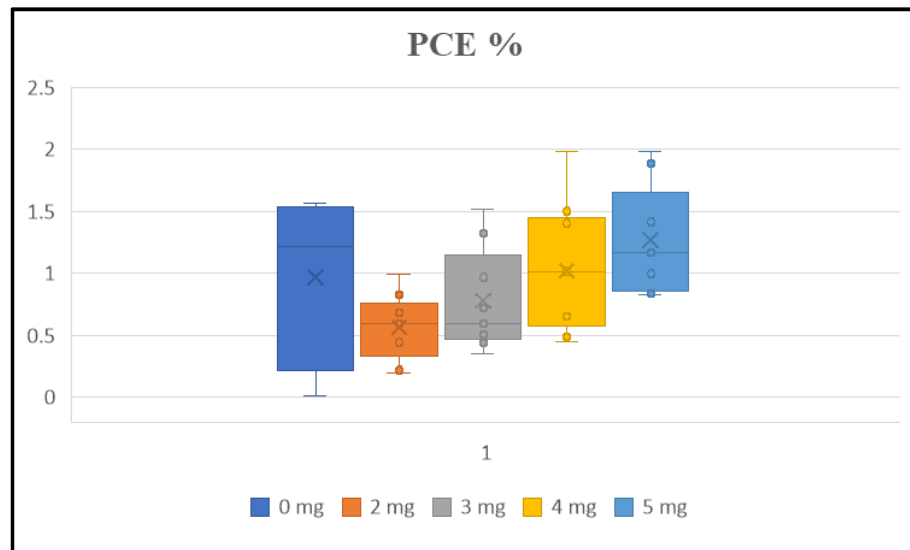
Gambar 4.8 Parameter J_{sc} Perovskite FAPbI₃

Pada Gambar 4.8 dapat menunjukkan hubungan antara konsentrasi doping Co-TFSI dengan densitas arus hubung singkat *short-circuit current density* (J_{sc}) dalam material perovskite. Pada konsentrasi 0 mg di tandai dengan warna (biru tua), 2 mg (orange), 3 mg (abu-abu), 4 mg (kuning) dan 5 mg (biru muda).



Gambar 4.9 Parameter FF Perovskite FAPbI₃

Pada gambar 4.9 menunjukkan distribusi nilai faktor pengisian Fill Factor (FF) perovskite FAPbI_3 dengan penambahan garam Co-TFSI pada berbagai konsentrasi (0 mg hingga 5 mg). Pada konsentrasi 0 mg di tandai dengan warna (biru tua), 2 mg (orange), 3 mg (abu-abu), 4 mg (kuning) dan 5 mg (biru muda).

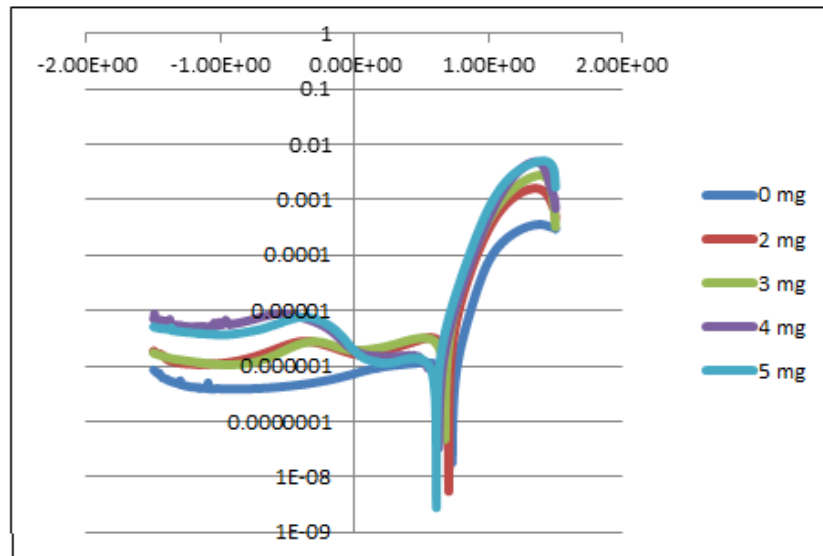


Gambar 4.10 Parameter PCE Perovskite FAPbI_3

Gambar 4.10 menunjukkan distribusi efisiensi konversi daya (Power Conversion Efficiency, PCE) dari perovskite FAPbI_3 dengan penambahan garam Co-TFSI pada berbagai konsentrasi (0 mg hingga 5 mg). Pada konsentrasi 0 mg di tandai dengan warna (biru tua), 2 mg (orange), 3 mg (abu-abu), 4 mg (kuning) dan 5 mg (biru muda).

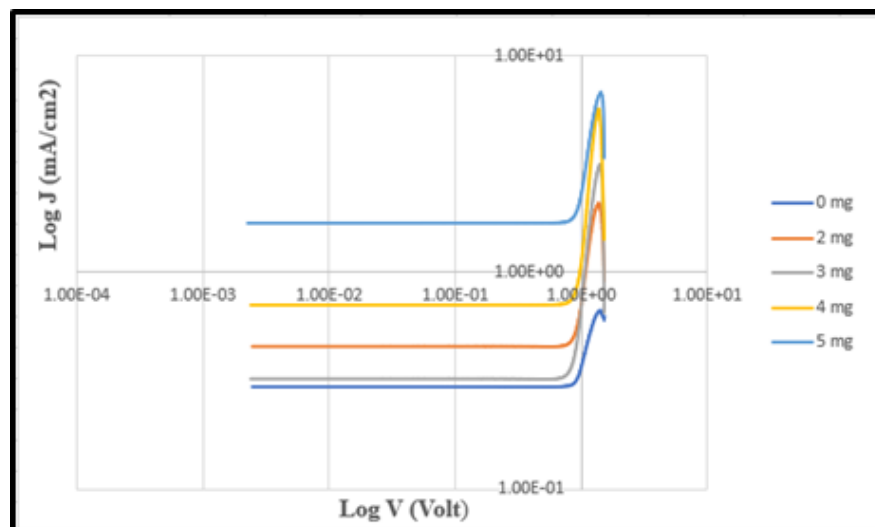
b) Karakteristik Sifat Arus Bocor (J-V Dalam Gelap)

Pada karakterisasi J-V dalam gelap pada perovskite FAPbI_3 dengan penambahan doping Co-TFSI dengan konsentrasi 0 mg, 2 mg, 3 mg, 4 mg, dan 5 mg didapatkan kurva arus-tegangan yang diukur dalam kondisi gelap seperti pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Semi Log J-V dalam Gelap Perovskite FAPbI₃

Pada Gambar 4.11, ditampilkan grafik Semi Log J-V dalam kondisi gelap yang menggambarkan hubungan antara arus (J) dan tegangan (V) pada material perovskite FAPbI₃ dengan berbagai konsentrasi garam Co-TFSI, mulai dari 0 mg hingga 5 mg.



Gambar 4.12 Double Log J-V dalam Gelap Perovskite FAPbI₃

Pada Gambar 4.12 menunjukkan kurva Double Logarithmic J-V (densitas arus terhadap tegangan) dalam kondisi gelap untuk perovskite FAPbI₃ dengan penambahan garam Co-TFSI pada berbagai konsentrasi (0 mg, 2 mg, 3 mg, 4 mg, dan 5 mg).

Melalui Gambar 4.12 didapatkan nilai V_{TFL} untuk menentukan *Carrier Mobility* dan *Trap Density* dengan melalui rumus 3.2 dan 3.3 yang dituliskan pada Tabel 4.3.

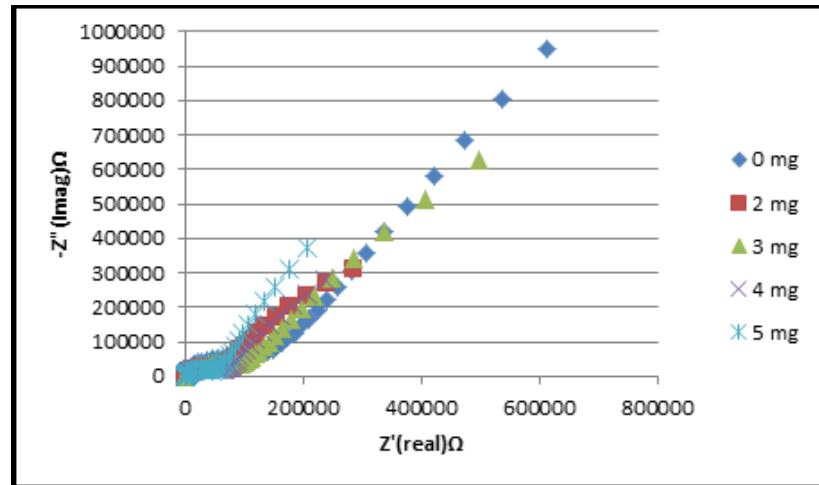
Tabel 4.3 *Carrier Mobility* dan *Trap Density* perovskite FAPbI₃

| Konsentrasi Co-TFSI | Carrier Mobility | Trap Density |
|----------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 0 mg | $9,86 \times 10^{-10}$ | $9,17 \times 10^{21}$ |
| 2 mg | $1,24 \times 10^{-10}$ | $9,46 \times 10^{21}$ |
| 3 mg | $5,85 \times 10^{-8}$ | $9,46 \times 10^{21}$ |
| 4 mg | $9,78 \times 10^{-7}$ | $9,56 \times 10^{21}$ |
| 5 mg | $1,61 \times 10^{-6}$ | $9,56 \times 10^{21}$ |

Pada Tabel 4.3 menunjukkan pengaruh konsentrasi garam Co-TFSI terhadap mobilitas pembawa muatan dan kepadatan perangkap dalam perovskite FAPbI₃ dengan variasi 0 mg sampai dengan 5 mg.

c) *Dinamika cas pada antarmuka (Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS))*

Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) merupakan salah satu karakterisasi untuk melihat prestasi solar sel perovskite. Teknik ini dapat mengidentifikasi *bottleneck* dalam transport muatan dan mengungkap mekanisme degradasi material. Misalnya, peningkatan resistansi antarmuka yang terdeteksi melalui EIS dapat mengindikasikan terjadinya degradasi atau pembentukan lapisan isolasi yang menghambat efisiensi perangkat.



Gambar 4.13 EIS Perovskite FAPbI₃

Pada Gambar 4.13 menunjukkan hasil pengukuran EIS dari material perovskite FAPbI₃ dengan variasi penambahan garam Co-TFSI dari 0 mg hingga 5 mg. Nilai dari Gambar 4.12 dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil EIS Perovskite FAPbI₃ Dengan Penambahan Co-TFSI

| Konsentrasi Co-TFSI | Nilai |
|---------------------|-----------------------|
| 0 mg | $1,2 \times 10^5$ Ohm |
| 2 mg | $0,7 \times 10^5$ Ohm |
| 3 mg | $1,2 \times 10^5$ Ohm |
| 4 mg | $0,5 \times 10^5$ Ohm |
| 5 mg | $0,4 \times 10^5$ Ohm |

Tabel 4.4 menyajikan analisis EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy) pada material perovskite FAPbI₃ dengan variasi penambahan garam Co-TFSI.

B. PEMBAHASAN

1. Karakterisasi Dasar

a) Karakterisasi Fase Kristal (XRD)

XRD (*X-Ray Diffraction*) adalah teknik analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi dan mengkarakterisasi struktur kristal suatu material. Teknik ini bekerja dengan menembakkan sinar-X pada sampel material, kemudian sinar tersebut akan terdifraksi oleh struktur kristal material dan menghasilkan pola difraksi yang spesifik. Pola difraksi ini dapat memberikan informasi tentang struktur kristal, ukuran kristal, dan parameter kisi dari material yang dianalisis. Parameter penting yang dapat diperoleh meliputi ukuran kristal yang dapat dihitung menggunakan persamaan Scherrer, regangan kisi yang dapat dianalisis dari pergeseran puncak difraksi, serta tingkat kristalinitas material yang tercermin dari intensitas dan ketajaman puncak (Cullity, B.D., & Stock, 2014)

Pada Gambar 4.1 Puncak-puncak spektrum yang tajam mengindikasikan kristalinitas tinggi, yang menunjukkan pembentukan struktur kristal yang baik pada material perovskite FAPbI₃. Penelitian terkait menunjukkan bahwa ion tertentu dapat membantu memperbaiki kristalinitas dalam struktur perovskite. Penambahan garam organik, seperti Co-TFSI dalam penelitian ini, tampaknya membantu dalam stabilisasi fase α -FAPbI₃, yang sesuai dengan temuan (A. Ali Umar et al., 2024), yang mengkaji peningkatan kristalinitas perovskite melalui penambahan molekul garam organik.

Peningkatan intensitas puncak XRD pada bidang (001) saat konsentrasi Co-TFSI meningkat dari 1 mg hingga 5 mg menunjukkan bahwa Co-TFSI mempengaruhi kristalinitas fase α -FAPbI₃. Studi sebelumnya telah menunjukkan bahwa aditif organik, termasuk molekul bermuatan ionik, dapat membantu dalam memperbaiki

orientasi kristal dan mengurangi cacat kristal pada struktur perovskite. Hal ini mendukung stabilitas dan performa perovskite pada aplikasi optoelektronik, sesuai dengan penelitian serupa di mana molekul garam organik digunakan untuk meningkatkan orientasi dan kualitas Kristal (Zhao et al., 2021).

Pada Gambar 4.2 Grafik XRD menunjukkan pola difraksi untuk sampel Co-TFSI dengan variasi konsentrasi dari 0 mg hingga 5 mg. Puncak utama terlihat pada sudut 2θ sekitar 14° , dengan intensitas yang meningkat seiring bertambahnya konsentrasi Co-TFSI. Hal ini mengindikasikan bahwa kristalinitasnya semakin baik dengan penambahan konsentrasi.

Pada konsentrasi Co-TFSI 0 mg terlihat puncak difraksi pada sudut 2θ sekitar 14° dengan intensitas yang relatif rendah. Puncak yang muncul cenderung lebar (broad peak), mengindikasikan kristalinitas yang kurang baik dan ukuran kristal yang relatif kecil. Karakteristik ini menunjukkan bahwa tanpa penambahan Co-TFSI, struktur kristal material belum terbentuk dengan optimal. Penambahan Co-TFSI menjadi 2 mg menunjukkan peningkatan intensitas puncak dibandingkan 0 mg. Puncak difraksi mulai bergeser ke kanan, menandakan mulai terjadinya peregangan kisi kristal. Bentuk puncak menjadi lebih jelas meskipun masih relatif lebar, mengindikasikan proses kristalisasi yang mulai membaik.

Peningkatan konsentrasi menjadi 3 mg menghasilkan intensitas puncak yang semakin tinggi dan puncak difraksi yang semakin bergeser ke kanan. Perubahan ini menandakan peregangan kisi yang semakin besar dan kristalinitas yang meningkat. Bentuk puncak yang dihasilkan mulai menunjukkan kecenderungan yang lebih tajam, mengindikasikan ukuran kristal yang semakin seragam. Pada konsentrasi 4 mg, puncak difraksi menunjukkan intensitas yang lebih

tinggi dibanding sampel sebelumnya. Pergeseran ke kanan semakin jelas terlihat, mengindikasikan peregangan kisi yang semakin optimal. Puncak yang dihasilkan lebih tajam, menunjukkan peningkatan kristalinitas yang semakin baik.

Pada konsentrasi tertinggi 5 mg menunjukkan karakteristik terbaik dengan intensitas puncak paling tinggi di antara semua sampel, puncak difraksi yang paling tajam (sharp peak), dan pergeseran ke kanan yang paling maksimal. Karakteristik ini mengindikasikan kristalinitas tertinggi, ukuran kristal yang optimal, dan peregangan kisi yang paling baik untuk aplikasi material ini. Pergeseran puncak ke arah sudut yang lebih besar (kanan) mengindikasikan berkurangnya jarak antar bidang kristal (d-spacing) sesuai dengan hukum Bragg ($n\lambda = 2d \sin \theta$). Fenomena ini menunjukkan bahwa penambahan Co-TFSI menyebabkan struktur kristal menjadi lebih kompak dan rapat, yang dapat mempengaruhi sifat elektronik dan ionik material (Z. Wang, Y., 2020). Hal ini senada dengan hasil karakterisasi FESEM, UV-Vis Spectrophotometer, PL, J-V dalam gelap dan EIS.

b) *Field emission scanning electron microscopy* (FESEM)

Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) menggunakan berkas elektron yang dipancarkan melalui emisi medan untuk menghasilkan gambar topografi permukaan dengan resolusi tinggi. Teknik ini memungkinkan pengamatan morfologi, ukuran partikel, dan distribusi material pada skala nanometer (Ghina Afrilia, 2019).

Pada Gambar 4.3 ditampilkan hasil karakterisasi mikrostruktur lapisan perovskite FAPbI₃ dengan penambahan garam Co-TFSI. Pada Gambar (a = 1 μm) 0 mg morfologi permukaan film menunjukkan butiran kecil yang tidak merata dan kurang terhubung dengan baik.

Terdapat banyak celah antarbutir, yang mengindikasikan bahwa pertumbuhan kristal tidak berlangsung secara optimal. Pada Gambar (a1 = 200 nm) batas butir terlihat lebih tajam, menunjukkan adanya ketidaksempurnaan dalam penyebaran material.

Pada Gambar (b = 1 μm) dengan penambahan 2 mg morfologi permukaan mulai menunjukkan perbaikan. Ukuran butiran menjadi lebih besar dibandingkan dengan kondisi awal (0 mg). Konektivitas antarbutir meningkat, meskipun masih terdapat beberapa area yang tidak merata. Pada Gambar (b1 = 200 nm) butiran mulai terlihat bergabung, tetapi masih ada beberapa area kosong atau retakan kecil. Pada Gambar (c = 1 μm) dengan penambahan 3 mg permukaan film tampak lebih homogen dan padat, dengan celah antarbutir yang semakin sedikit. Pada Gambar (c1 = 200 nm) ukuran butiran terlihat lebih besar dan batas butir menjadi lebih halus.

Pada Gambar (d = 1 μm) dengan penambahan 4 mg, struktur morfologi menjadi lebih teratur dengan ukuran butiran bertambah lebih besar dan celah antarbutir hampir tidak terlihat serta permukaannya terlihat lebih halus dan padat. Pada Gambar (d1 = 200 nm), batas butir semakin sulit terlihat, menunjukkan penggabungan butir yang lebih efektif. Pada Gambar (e = 1 μm) dengan penambahan 5 mg permukaan film menunjukkan kualitas yang paling optimal. Butiran berukuran besar dengan permukaan yang sangat padat dan seragam. Hampir tidak ada celah antarbutir yang terlihat, menandakan film berkualitas tinggi dengan tingkat kristalinitas yang sangat baik. Pada Gambar (e1 = 200 nm) terlihat bahwa butiran telah bergabung sepenuhnya dengan batas butir yang hampir tidak terlihat. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan Co-TFSI dapat meningkatkan kualitas film dengan memperbaiki kristalinitas dan mengurangi cacat pada permukaan.

Dari hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa morfologi pada sampel dengan penambahan 5 mg garam Co-TFSI menunjukkan kualitas film yang paling optimal dibandingkan dengan variasi lainnya, seperti 0 mg, 2 mg, 3 mg, dan 4 mg. Hal ini sejalan dengan penelitian oleh (Liu, Y., 2019), yang membahas bagaimana morfologi film tipis dipengaruhi oleh konsentrasi aditif. Mereka menunjukkan bahwa penambahan aditif dalam jumlah yang tepat dapat menghasilkan butiran yang lebih besar dan lebih seragam. Dalam studi tersebut, ditemukan bahwa peningkatan konsentrasi aditif tidak selalu berbanding lurus dengan perbaikan morfologi. Sebaliknya, ada titik optimal di mana ukuran butiran dan distribusi permukaan mencapai kualitas terbaik.

Hal ini konsisten dengan hasil penelitian ini, yang menunjukkan bahwa penambahan 5 mg garam Co-TFSI menghasilkan film dengan morfologi yang sangat baik, di mana butiran terlihat lebih besar dan lebih seragam, serta hampir tidak ada celah antarbutir. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan Co-TFSI tidak hanya meningkatkan kualitas film secara keseluruhan, tetapi juga berkontribusi pada peningkatan kristalinitas dan pengurangan cacat permukaan, yang sangat penting untuk aplikasi teknologi tinggi.

2. Karakterisasi Sifat Optik

a) Karakterisasi UV-Vis Spectrophotometer

Karakterisasi sifat optik dengan UV-Vis Spectrophotometer bertujuan untuk menentukan koefisien serapan optik dan celah energi (bandgap) material. Teknik ini bekerja berdasarkan prinsip absorpsi dan transmisi cahaya dalam rentang panjang gelombang ultraviolet hingga tampak. Data spektrum yang diperoleh dapat digunakan untuk menghitung bandgap dengan metode Tauc Plot yang penting dalam

memahami efisiensi penyerapan cahaya suatu material semikonduktor dalam sel surya (Sungkawa & Ladika, 2018).

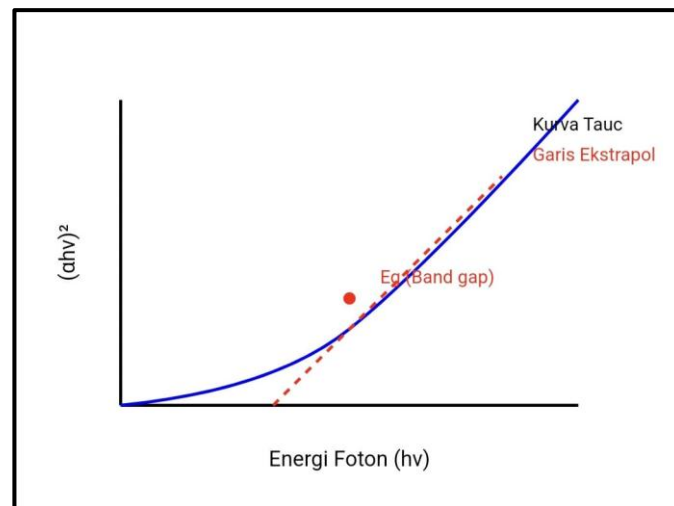
Pada Gambar 4.4 menunjukkan spektrum absorbansi dari lapisan perovskite FAPbI_3 dengan variasi ketebalan akibat penambahan garam Co-TFSI dalam jumlah yang berbeda, yaitu 0 mg, 2 mg, 3 mg, 4 mg, dan 5 mg. Absorbansi diukur dalam rentang panjang gelombang 700-860 nm. Pada 0 mg (biru) lapisan perovskite menunjukkan absorbansi tertinggi di sebagian besar rentang panjang gelombang, tetapi terdapat penurunan absorbansi yang tajam setelah 800 nm, menandakan bahwa struktur lapisan kurang stabil dan kristalisasi belum optimal.

Pada penambahan 2 mg (merah) terjadi sedikit penurunan absorbansi di sebagian besar rentang panjang gelombang. Penurunan ini mencerminkan perubahan struktur material akibat interaksi ion Co-TFSI, yang mulai meningkatkan kualitas kristal, meskipun belum optimal. Pada 3 mg (hijau) menunjukkan penurunan absorbansi menjadi lebih konsisten dan stabil, menandakan peningkatan kualitas film dengan distribusi ion yang lebih merata, meskipun optimalisasi belum sepenuhnya tercapai.

Pada 4 mg (ungu) absorbansi mulai mendekati nilai yang lebih rendah dan stabil, menunjukkan peningkatan keteraturan dalam lapisan perovskite, yang memungkinkan transmisi cahaya yang lebih baik. Pada 5 mg (biru muda) menghasilkan Karakteristik lapisan perovskite sangat baik, dengan absorbansi menunjukkan penurunan optimal dan kurva spektral yang stabil di seluruh rentang panjang gelombang. Ini menunjukkan bahwa kristalisasi dan distribusi material berada dalam kontrol yang paling baik.

Dari hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa ketebalan lapisan dengan 5 mg Co-TFSI menunjukkan kualitas terbaik untuk

aplikasi sel surya berbasis perovskite dibandingkan dengan variasi lainnya, seperti 0 mg, 2 mg, 3 mg, dan 4 mg . Absorbansi yang lebih rendah dan stabil mencerminkan peningkatan signifikan dalam efisiensi optik dan struktur material. Hal ini sejalan dengan penelitian oleh (Tonui et al., 2018), yang menekankan pentingnya kontrol kristalisasi dalam meningkatkan efisiensi sel surya perovskite, serta penelitian oleh (Saliba, M., 2016) yang menunjukkan bahwa aditif dapat meningkatkan stabilitas dan kinerja optik lapisan perovskite secara keseluruhan.



Gambar 4.14 Contoh grafik Tauc Plot

Pada Gambar 4.14 menunjukkan hubungan antara energi foton ($h\nu$) pada sumbu x dan $(\alpha h\nu)^2$ pada sumbu y, dimana α adalah koefisien absorpsi. Pada kurva Tauc (garis biru) menunjukkan bagaimana material bereaksi saat terkena cahaya dengan bentuk melengkung dari bawah ke atas. Semakin tinggi posisi garis ini maka semakin baik kemampuan material dalam menyerap cahaya. Pada garis ekstrapol (garis merah putus-putus) dibuat lurus mengikuti bagian yang naik dari garis biru, berfungsi untuk mencari titik di mana material mulai dapat menyerap cahaya, dan dibuat putus-putus agar

mudah dibedakan dari garis biru. Garis ini digunakan untuk menentukan nilai band gap material. Selanjutnya, titik band gap (titik merah) adalah titik penting yang menunjukkan kapan material mulai dapat menyerap cahaya, terletak di pertemuan garis merah dengan garis bawah, semakin kecil nilainya maka semakin mudah material menyerap cahaya.

Untuk mendapatkan nilai energi gap (bandgap) pada Tabel 4.1 menggunakan grafik Tauc Plot pada Gambar 4.14. Pada 0 mg energi gap tercatat sebesar 1,56 eV, menunjukkan bahwa perovskite memiliki struktur bandgap yang baik untuk menyerap cahaya. Namun, kualitas kristal cenderung lebih rendah, terlihat dari grafik spektrum absorbansi yang menunjukkan penurunan yang kurang stabil.

Pada 2 mg Nilai bandgap tetap pada 1,56 eV, menunjukkan bahwa struktur elektronik material belum berubah meskipun terjadi peningkatan kualitas kristal. Penambahan ini mulai memengaruhi keteraturan dalam lapisan perovskite, dengan sedikit peningkatan stabilitas pada spektrum absorbansi. Pada 3 mg nilai bandgap sedikit menurun menjadi 1,54 eV, menunjukkan peningkatan keteraturan dan kualitas kristal material, serta penyempurnaan struktur energi elektronik. Grafik spektrum absorbansi menunjukkan konsistensi yang lebih baik, mencerminkan proses penyerapan cahaya yang lebih terkontrol.

Pada 4 mg nilai Bandgap tetap pada 1,54 eV, menandakan bahwa konsentrasi garam Co-TFSI telah mencapai kondisi stabil untuk memperbaiki struktur material. Spektrum absorbansi menunjukkan kurva yang lebih stabil dibandingkan dengan konsentrasi yang lebih rendah. Pada 5 mg nilai bandgap kembali meningkat menjadi 1,56 eV, menunjukkan bahwa material perovskite telah mencapai stabilitas optimal dengan struktur kristal yang baik. Grafik spektrum absorbansi

mendukung hal ini, dengan kurva yang menunjukkan penurunan yang lebih stabil dan optimal, menandakan kualitas lapisan yang paling baik.

b) Steady Photoluminescence (PL)

Steady Photoluminescence (PL) digunakan untuk mengamati rekombinasi pembawa muatan dan kualitas optik material. Teknik ini melibatkan eksitasi sampel dengan sumber cahaya laser atau lampu dan mengukur intensitas emisi cahaya yang dipancarkan akibat rekombinasi elektron-hole. Spektrum PL memberikan informasi tentang eksitasi energi, keberadaan cacat struktural, dan efisiensi konversi energi optik, yang berperan dalam optimalisasi kinerja sel surya (Ghina Afrilia, 2019).

Pada Gambar 4.5 ditampilkan spektrum *steady-state photoluminescence (PL)* dari perovskite FAPbI₃ yang ditambahkan dengan berbagai konsentrasi garam Co-TFSI, mulai dari 2 mg hingga 5 mg. Identitas spektrumnya berkaitan dengan pengukuran optik, seperti fotoluminesensi atau spektroskopi cahaya, yang digunakan untuk menganalisis sifat material berdasarkan emisi atau serapan cahaya. Pada 2 mg (ungu) intensitas cahaya mencapai puncak tertinggi sekitar $1,4 \times 10^5$ pada panjang gelombang 820 nm, yang menunjukkan pancaran cahaya yang kuat. Namun, grafik menunjukkan sedikit ketidakstabilan yang mengindikasikan bahwa hasilnya kurang konsisten. Ketika penambahan 3 mg (hijau) intensitas cahaya menurun menjadi $1,1 \times 10^5$ lebih rendah dibandingkan dengan 2 mg. Meskipun demikian, karakteristik spektrum menjadi lebih halus dan stabil yang menunjukkan pancaran cahaya yang lebih konsisten.

Pada konsentrasi 4 mg (kuning) intensitas cahaya kembali menurun menjadi sekitar $0,7 \times 10^5$ dengan pancaran yang lebih

rendah. Namun, grafik pada konsentrasi ini menunjukkan stabilitas yang lebih baik dibandingkan dengan 2 mg dan 3 mg dengan sedikit ketidakstabilan. Pada 5 mg (biru muda) intensitas cahaya mencapai puncak terendah sekitar $0,5 \times 10^5$. Meskipun intensitasnya paling rendah, spektrum ini menunjukkan stabilitas terbaik dengan fluktuasi yang minimal dan distribusi energi yang lebih merata di seluruh rentang panjang gelombang. Hal ini menjadikannya pilihan yang paling baik untuk aplikasi yang memerlukan hasil yang konsisten, meskipun dengan pancaran cahaya yang lebih rendah.

Dari hasil penelitian *Steady Photoluminescence*, dapat disimpulkan bahwa penambahan 5 mg menghasilkan intensitas cahaya dengan puncak terendah dibandingkan dengan variasi lainnya, seperti 2 mg, 3 mg, dan 4 mg. Meskipun intensitasnya paling rendah, spektrum ini menunjukkan stabilitas terbaik dengan fluktuasi yang minimal dan distribusi energi yang lebih merata di seluruh rentang panjang gelombang. Hal ini menjadikannya pilihan yang paling baik untuk aplikasi yang memerlukan hasil yang konsisten, meskipun dengan pancaran cahaya yang lebih rendah. Hasil ini sejalan dengan penelitian oleh (Widianto et al., 2022), yang menunjukkan bahwa optimasi dalam struktur material perovskite dapat meningkatkan pancaran cahaya dan mengurangi cacat nonradiatif, sehingga meningkatkan efisiensi sel surya.

3. Karakterisasi Prestasi Sel Surya

a) Karakteristik Sifat Fotovolta (J-V Bawah Cahaya)

Ada 5 sampel perovskite FAPbI₃ dengan penambahan Co-TFSI yang diujikan pada variasi 0 mg, 2 mg, 3 mg, 4 mg dan 5 mg. Untuk karakterisasi J-V kita akan mengetahui nilai V_{oc} dari setiap sampel dan juga average serta standard deviation (sd), nilai J_{sc} , nilai FF, dan juga

nilai efisiensi dari sel surya (PCE) dari setiap sampel yaitu sampel 0 mg, 2 mg, 3 mg, 4 mg dan 5 mg.

Pada Gambar 4.7 menunjukkan hubungan antara konsentrasi zat aditif (dalam mg) dan tegangan *open-circuit* (V_{oc}) pada perangkat berbasis perovskite. Pada 0 mg nilai V_{oc} menunjukkan variasi yang dengan rata-rata mencapai 0,74 volt meskipun nilai maksimum 0,91 volt. Variasi ini menunjukkan ketidakstabilan tegangan tanpa adanya penambahan Co-TFSI. Dengan penambahan 2 mg, rata-rata V_{oc} meningkat menjadi sekitar 0,87 volt dengan distribusi data yang lebih stabil, meskipun nilai maksimumnya tetap berada di 0,91 volt. Penambahan 3 mg menghasilkan rata-rata V_{oc} tertinggi sekitar 0,91 volt dengan distribusi nilai yang lebih sempit, meskipun nilai maksimum sedikit menurun menjadi 0,89 volt. Hal ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi 3 mg, kestabilan dan konsistensi tegangan mencapai tingkat yang optimal.

Pada konsentrasi 4 mg rata-rata V_{oc} sedikit menurun menjadi 0,88 volt, tetapi nilai maksimum tetap pada 0,90 volt. Hal ini menunjukkan kestabilan yang masih baik, meskipun peningkatan V_{oc} tidak sebaik pada 3 mg. Pada konsentrasi 5 mg rata-rata V_{oc} menurun menjadi 0,86 volt lebih rendah dibandingkan dengan 3 mg dan 4 mg, tetapi dengan distribusi nilai yang lebih lebar. Secara umum nilai V_{oc} untuk perovskite jika kurang 1 atau mendekati 1 itu sudah bagus karena nilai tersebut sudah setara dengan kristal silicon dengan biaya produksi yang mahal (Wei et al., 2021).

Pada Gambar 4.8 dapat menunjukkan hubungan antara konsentrasi doping Co-TFSI dengan densitas arus hubung singkat short-circuit current density (J_{sc}) dalam material perovskite. Pada 0 mg nilai maksimum tercatat sebesar 2,83 mA/cm² dengan rata-rata sekitar 2,19 mA/cm². Hal ini menunjukkan bahwa tanpa penambahan Co-

TFSI, arus yang dihasilkan masih cukup baik, meskipun terdapat fluktuasi yang besar. Pada penambahan 2 mg terjadi penurunan dengan nilai maksimum 2,41 mA/cm² dengan rata-rata sekitar 1,40 mA/cm² yang menunjukkan bahwa konsentrasi ini kurang optimal dalam meningkatkan arus foton yang dihasilkan. Pada penambahan 3 mg nilai J_{sc} meningkat dengan nilai maksimum mencapai 3,11 mA/cm² dan rata-rata sekitar 1,60 mA/cm². Meskipun terjadi peningkatan dibandingkan 2 mg, distribusi datanya masih cukup lebar, menunjukkan adanya variasi dalam performa perangkat. Pada penambahan 4 mg nilai maksimum meningkat menjadi 3,73 mA/cm² dengan rata-rata 2,27 mA/cm. Peningkatan ini menunjukkan bahwa dosis ini mulai memberikan dampak yang lebih baik terhadap peningkatan arus sirkuit pendek. Pada penambahan 5 mg mencapai nilai tertinggi sebesar 4,09 mA/cm² dengan nilai rata-rata 2,58 mA/cm². Ini menunjukkan bahwa penambahan 5 mg memberikan peningkatan paling optimal terhadap J_{sc} . Kenaikan ini kemungkinan disebabkan oleh perbaikan dalam transportasi muatan dan pengurangan rekombinasi elektron-hole, sehingga menghasilkan arus yang lebih besar. Oleh karena itu, berdasarkan nilai J_{sc} penambahan 5 mg merupakan paling optimal dalam meningkatkan arus sirkuit pendek pada perovskite FAPbI₃.

Pada Gambar 4.9 menunjukkan distribusi nilai faktor pengisian Fill Faktor (FF) perovskite FAPbI₃ dengan penambahan garam Co-TFSI pada berbagai konsentrasi (0 mg hingga 5 mg). Pada 0 mg nilai maksimum tercatat sebesar 0,59 % dengan rata-rata sekitar 0,44 %. Pada penambahan 2 mg terjadi penurunan dengan nilai maksimum 0,44 % dengan rata-rata sekitar 0,44 %. Pada penambahan 3 mg nilai FF meningkat dengan nilai maksimum mencapai 0,54 % dan rata-rata sekitar 0,52 %. Pada penambahan 4 mg nilai maksimum meningkat

menjadi 0,59 % dengan rata-rata 0,48 %. Pada penambahan 5 mg mencapai nilai tertinggi sebesar 0,62 % dengan nilai rata-rata sekitar 0,56 %. Semakin besar nilai fill factor suatu sampel perovskite, maka untuk kerja dari perovskite yang dibuat akan semakin baik dan sampel akan memiliki energi yang semakin tinggi.

Pada Gambar 4.10 menunjukkan distribusi efisiensi konversi daya *Power Conversion Efficiency* (PCE) dari perovskite FAPbI_3 dengan penambahan garam Co-TFSI pada berbagai konsentrasi (0 mg hingga 5 mg). Pada 0 mg nilai maksimum tercatat sebesar 1,52 % dengan rata-rata sekitar 0,96 %. Hal ini menunjukkan bahwa tanpa penambahan garam Co-TFSI, efisiensi konversi daya masih cukup baik, tetapi memiliki variasi yang cukup besar kurang stabil. Pada penambahan 2 mg terjadi penurunan dengan nilai maksimum 0,99 % dengan rata-rata sekitar 0,56 %. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan 2 mg tidak cukup untuk meningkatkan efisiensi sel surya, bahkan menyebabkan performa yang lebih rendah dibandingkan dengan 0 mg. Pada penambahan 3 mg nilai PCE meningkat dengan nilai maksimum mencapai 1,51 % dan rata-rata sekitar 0,77 %. Ini menunjukkan adanya peningkatan performa dibandingkan dengan 2 mg meskipun masih belum optimal. Pada penambahan 4 mg nilai maksimum meningkat menjadi 1,98 % dengan rata-rata 1,02 %. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan 4 mg mulai memberikan efek positif dalam meningkatkan efisiensi konversi daya, dengan distribusi data yang lebih stabil dibandingkan dengan penambahan sebelumnya. Pada penambahan 5 mg mencapai nilai tertinggi sebesar 1,98 % dengan nilai rata-rata sekitar 1,26 %. Hal ini menunjukkan bahwa 5 mg merupakan yang optimum dalam meningkatkan efisiensi perangkat. Peningkatan ini kemungkinan disebabkan oleh perbaikan dalam transportasi muatan dan pengurangan rekombinasi pembawa

muatan, yang berkontribusi pada peningkatan efisiensi sel surya perovskite FAPbI_3 . Oleh karena itu, penambahan 5 mg merupakan yang paling optimal dalam meningkatkan kinerja perangkat secara keseluruhan.

b) Karakteristik Sifat Arus Bocor (J-V Dalam Gelap)

Arus bocor (leakage current) adalah arus listrik yang mengalir melalui jalur yang tidak diinginkan atau tidak dimaksudkan dalam suatu rangkaian atau komponen elektronik. Fenomena ini terjadi karena adanya ketidaksempurnaan isolasi atau karakteristik intrinsik dari bahan semikonduktor.

Pada Gambar 4.11 ditampilkan grafik Semi Log J-V dalam kondisi gelap yang menggambarkan hubungan antara arus (J) dan tegangan (V) pada material perovskite FAPbI_3 dengan berbagai konsentrasi garam Co-TFSI, mulai dari 0 mg hingga 5 mg. Pada 0 mg, aliran arus relatif rendah, menunjukkan bahwa material perovskite FAPbI_3 kurang optimal. Dengan penambahan 2 mg densitas arus meningkat tetapi peningkatannya masih belum signifikan yang menunjukkan modifikasi terbatas pada sifat elektrik material. Ketika penambahan 3 mg terdapat peningkatan yang lebih jelas dalam densitas arus yang menandakan bahwa Co-TFSI mulai memberikan efek positif dalam pembentukan saluran muatan dan meningkatkan konduktivitas material. Pada penambahan 4 mg densitas arus meningkat tajam yang menunjukkan bahwa modifikasi struktur material telah mencapai kondisi hampir maksimal sehingga pembawa muatan lebih mudah melintasi material. Pada konsentrasi 5 mg densitas arus meningkat drastis yang menunjukkan bahwa konsentrasi ini adalah titik optimum untuk meningkatkan sifat elektrik material.

Pada Gambar 4.12 menunjukkan kurva Double Logarithmic J-V (densitas arus terhadap tegangan) dalam kondisi gelap untuk perovskite FAPbI_3 dengan penambahan garam Co-TFSI pada berbagai konsentrasi (0 mg, 2 mg, 3 mg, 4 mg, dan 5 mg). Pada 0 mg arus yang dihasilkan cenderung rendah terutama pada tegangan rendah karena tidak adanya doping yang dapat meningkatkan kinerja material perovskite. Dengan penambahan 2 mg terdapat sedikit peningkatan arus di sebagian besar rentang tegangan yang menunjukkan bahwa doping awal mulai mengurangi resistansi dan memperbaiki transfer muatan. Pada penambahan 3 mg densitas arus meningkat secara signifikan terutama pada tegangan tinggi yang menandakan optimasi yang lebih baik dalam pergerakan muatan. Ketika penambahan 4 mg kurva menunjukkan peningkatan lebih lanjut terutama pada tegangan rendah hingga menengah yang mengindikasikan peningkatan efisiensi perangkat akibat doping. Penambahan 5 mg menghasilkan nilai optimum di mana densitas arus mencapai puncaknya terutama pada tegangan tinggi. Nilai dari Gambar 4.12 dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Dari hasil penelitian Semi Log J-V dan Double Log J-V dapat disimpulkan bahwa penambahan 5 mg pada material perovskite FAPbI_3 menghasilkan kinerja terbaik dibandingkan dengan variasi 0 mg, 2 mg, 3 mg dan 4 mg. Peningkatan densitas arus yang drastis pada konsentrasi ini menandakan bahwa 5 mg merupakan titik optimum untuk meningkatkan sifat elektrik material. Hal ini sejalan dengan penelitian oleh (Zhou, Y., 2021) yang menemukan bahwa penambahan garam Co-TFSI pada konsentrasi optimal dapat memodifikasi struktur elektronik material, meningkatkan mobilitas pembawa muatan, dan mengurangi rekombinasi pada antarmuka. Dalam pendidikan hasil penelitian ini memberikan wawasan penting bagi siswa dan mahasiswa tentang bagaimana doping dapat

mempengaruhi sifat-sifat material, serta pentingnya eksperimen dalam memahami fenomena fisik dan kimia.

Dengan memahami bahwa doping Co-TFSI pada konsentrasi 5 mg tidak hanya meningkatkan densitas arus secara signifikan, tetapi juga memberikan transportasi muatan yang lebih efisien, siswa dapat belajar tentang konsep-konsep dasar dalam fisika dan teknik material, seperti rekombinasi elektron-hole dan mobilitas pembawa muatan. Penelitian ini juga mendorong siswa untuk berpikir kritis dan kreatif dalam mencari solusi untuk meningkatkan efisiensi material, yang sangat relevan dalam pengembangan teknologi energi terbarukan. Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada pengetahuan ilmiah, tetapi juga menginspirasi generasi mendatang untuk terlibat dalam inovasi dan penelitian di bidang material perovskite.

Melalui Gambar 4.12 didapatkan nilai V_{TFL} untuk menentukan *Carrier Mobility* dan *Trap Density* dengan melalui rumus 3.2 dan 3.3 yang dituliskan pada Tabel 4.3. Pada 0 mg nilai *Carrier Mobility* masih sangat rendah yaitu $9,86 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ dengan *Trap Density* $9,17 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ yang menyebabkan arus yang dihasilkan kecil terutama pada tegangan rendah. Hal ini disebabkan oleh resistansi tinggi dan kurangnya doping yang dapat meningkatkan transportasi muatan dalam material perovskite. Ketika ditambahkan menjadi 2 mg nilai *Carrier Mobility* sedikit meningkat menjadi $1,24 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ dengan *Trap Density* $9,46 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ menunjukkan bahwa resistansi mulai berkurang, dan transfer muatan menjadi lebih baik, sejalan dengan peningkatan arus pada sebagian besar rentang tegangan dalam kurva double log.

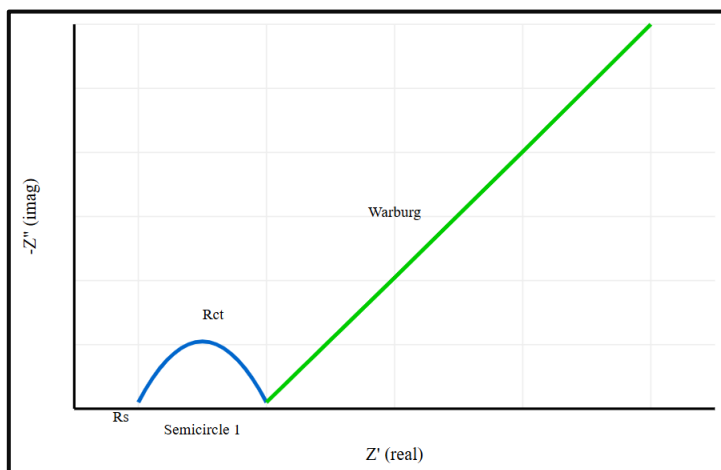
Pada penambahan 3 mg nilai *Carrier Mobility* mengalami peningkatan dratis hingga $5,85 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ dengan *Trap Density*

tetap yaitu $9,46 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ menunjukkan bahwa transportasi muatan dalam material menjadi lebih efisien, yang sesuai dengan peningkatan densitas arus terutama pada tegangan tinggi. Pada penambahan 4 mg nilai *Carrier Mobility* kembali meningkat menjadi $9,78 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ dengan *Trap Density* yaitu $9,56 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ yang menandakan peningkatan efisiensi perangkat terutama dalam rentang tegangan rendah hingga menengah. Efek doping semakin optimal dalam meningkatkan transportasi muatan yang menyebabkan peningkatan arus yang lebih baik. Sedangkan pada 5 mg nilai *Carrier Mobility* menurun menjadi $1,61 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ dengan *Trap Density* tetap yaitu $9,56 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ yang mencerminkan kondisi optimal dalam sistem ini. Sesuai dengan hasil kurva double log, densitas arus mencapai puncaknya terutama pada tegangan tinggi, menunjukkan bahwa perangkat telah mencapai performa terbaik dalam mentransfer muatan. Meskipun *trap density* cenderung stabil setelah 2 mg, peningkatan *carrier mobility* menunjukkan bahwa efek doping lebih dominan dalam meningkatkan efisiensi perangkat dibandingkan dengan pengurangan jebakan muatan. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa penambahan Co-TFSI hingga 5 mg secara signifikan meningkatkan kinerja transportasi muatan dalam perovskite FAPbI_3 , dengan mobilitas muatan yang lebih tinggi dan resistansi yang lebih rendah, sehingga memungkinkan arus yang lebih besar.

c) Dinamika cas pada antarmuka (Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS))

Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) bekerja dengan memberikan sinyal AC pada sistem elektrokimia untuk mengukur impedansi (hambatan). Dalam proses ini, R_{ct} (Resistansi transfer muatan) adalah parameter yang menunjukkan seberapa mudah elektron

dapat berpindah antara elektroda dan elektrolit. Nilai R_{ct} ini dapat dilihat dari plot Nyquist, di mana plot tersebut menampilkan hubungan antara impedansi imajiner ($-Z''$) dan impedansi nyata (Z'). Pada plot Nyquist, R_{ct} dapat diukur dari diameter semisirkel yang terbentuk - semakin besar diameternya, semakin tinggi nilai R_{ct} yang menandakan transfer elektron yang lebih lambat (Fasmin, F., & Srinivasan, 2022).



Gambar 4.15 Contoh grafik plot Nyquist

Pada Gambar 4.15 menunjukkan dua karakteristik utama yang penting dalam analisis elektrokimia sel surya. Bagian pertama adalah semicircle (ditunjukkan dengan warna biru) yang muncul pada frekuensi tinggi yang merepresentasikan proses transfer muatan pada antarmuka elektroda/elektrolit. Dari semicircle ini, dapat diperoleh informasi penting tentang resistansi transfer muatan (R_{ct}) yang ditunjukkan oleh diameter semicircle, dan resistansi seri (R_s) yang dapat dilihat dari titik perpotongan kurva dengan sumbu x. Semicircle yang sempurna mengindikasikan proses transfer muatan yang ideal dengan satu konstanta waktu.

Bagian kedua dari plot adalah region Warburg (ditunjukkan dengan warna hijau) yang muncul setelah semicircle pertama. Region

ini memiliki karakteristik berupa garis linear dengan kemiringan sekitar 45 derajat, yang merepresentasikan proses difusi ion dalam elektrolit. Panjang dan kemiringan garis Warburg memberikan informasi tentang koefisien difusi dan ketebalan lapisan difusi. Semakin panjang garis Warburg, semakin besar hambatan difusi dalam sistem. Karakteristik ini sangat penting dalam optimasi elektrolit dan desain elektroda untuk meningkatkan kinerja sel surya (Abdulrahim et al., 2020).

Pada Gambar 4.13 menampilkan hubungan antara impedansi real (Z') dan impedansi imajiner (Z'') untuk berbagai konsentrasi dari 0 mg hingga 5 mg. Plot ini menunjukkan adanya semicircle (setengah lingkaran) yang merepresentasikan resistansi transfer muatan (R_{ct}) pada antarmuka perovskite. Berdasarkan gambar, terlihat bahwa nilai R_{ct} mengalami perubahan seiring dengan peningkatan konsentrasi.

Pada 0 mg grafik menunjukkan diameter semicircle yang paling besar, mengindikasikan nilai R_{ct} tertinggi. Hal ini menunjukkan resistansi transfer muatan yang tinggi pada antarmuka perovskite, yang berarti transfer elektron kurang efisien. Kemiringan garis pada frekuensi rendah juga relative menurun, menandakan difusi ion yang kurang optimal. Dengan penambahan 2 mg terlihat penurunan diameter semicircle dibandingkan dengan 0 mg. Ini mengindikasikan pengurangan nilai R_{ct} , yang berarti transfer muatan mulai membaik. Kemiringan garis pada frekuensi rendah mulai menunjukkan peningkatan, menandakan peningkatan efisiensi difusi ion.

Pada penambahan 3 mg diameter semicircle semakin mengecil, menunjukkan penurunan R_{ct} yang lebih signifikan. Kemiringan garis pada frekuensi rendah menjadi lebih curam, mengindikasikan difusi ion yang semakin efisien. Ini menunjukkan optimasi yang lebih baik pada antarmuka perovskite. Penambahan 4 mg menunjukkan penurunan diameter semicircle yang lebih lanjut, mengindikasikan nilai R_{ct} yang

semakin kecil. Kemiringan garis pada frekuensi rendah menunjukkan peningkatan yang konsisten, menandakan transfer muatan yang semakin efisien.

Pada penambahan 5 mg diameter semicircle mencapai nilai terendah, menunjukkan nilai R_{ct} yang paling kecil di antara semua sampel. Kemiringan garis pada frekuensi rendah juga paling curam, mengindikasikan difusi ion yang paling efisien. Ini menunjukkan bahwa konsentrasi 5 mg memberikan kondisi optimal untuk transfer muatan pada antarmuka perovskite yang teratur dengan sifat elektronik yang optimal untuk aplikasi fotolistrik. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Liu, Y., Zhang, H., Wang, J., & Li, 2023), yang juga menunjukkan bahwa penambahan 5 mg Co-TFSI menghasilkan nilai R_{ct} yang lebih rendah, sebagaimana dibuktikan melalui analisis EIS. Selain itu, penurunan nilai R_{ct} pada konsentrasi ini menunjukkan kontribusi positif terhadap peningkatan efisiensi dan stabilitas perangkat fotolistrik. Dengan demikian, struktur kristal yang lebih teratur tidak hanya mendukung transfer muatan yang lebih baik, tetapi juga meningkatkan ketahanan material terhadap degradasi, sehingga memperpanjang umur perangkat. Nilai R_{ct} dari Gambar 4.13 dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Nilai R_{ct} (Resistansi transfer muatan) tergantung pada diameter semisirkel yang terbentuk pada plot Nyquist, semakin besar diameter semisirkel maka semakin tinggi nilai R_{ct} . Nilai R_{ct} yang tinggi menunjukkan hambatan transfer elektron yang besar, yang berarti proses transfer elektron berjalan lebih lambat. Sebaliknya, nilai R_{ct} yang rendah (diameter semisirkel kecil) menandakan hambatan transfer elektron yang kecil, sehingga proses transfer elektron berjalan lebih cepat dan efisien.

Pada Tabel 4.4 menunjukkan korelasi yang jelas dengan diameter semicircle yang terlihat pada Gambar 4.13. Pada konsentrasi 0 mg, nilai R_{ct} tercatat paling tinggi yaitu $1,2 \times 10^2$ Ohm yang sesuai dengan diameter semicircle terbesar yang terlihat pada grafik. Ketika ditambahkan sebanyak 2 mg nilai R_{ct} menurun menjadi $0,7 \times 10^2$ Ohm, yang tercermin dari pengurangan diameter semicircle pada grafik. Pada konsentrasi 3 mg terjadi peningkatan nilai R_{ct} kembali ke $1,2 \times 10^2$ Ohm, meskipun pada grafik sebelumnya menunjukkan trend penurunan diameter semicircle. Setelah itu terjadi penurunan yang konsisten pada konsentrasi 4 mg dan 5 mg dengan nilai R_{ct} masing-masing $0,5 \times 10^2$ Ohm dan $0,4 \times 10^2$ Ohm. Penurunan ini sejalan dengan pengamatan pada grafik dimana diameter semicircle semakin mengecil, yang mengindikasikan peningkatan efisiensi transfer muatan pada antarmuka perovskite. Nilai R_{ct} terendah yang dicapai pada konsentrasi 5 mg ($0,4 \times 10^2$ Ohm) mengkonfirmasi bahwa pada konsentrasi ini diperoleh kondisi optimal untuk transfer muatan yang sesuai dengan interpretasi grafik sebelumnya dimana diameter semicircle terkecil dan kemiringan garis pada frekuensi rendah paling curam ditemukan pada konsentrasi 5 mg.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian tentang Sintesis Fotolistrik Perovskite FAPbI₃ dengan Penambahan Garam Co-TFSI Organik, dapat disimpulkan bahwa:

1. Pada penambahan Co-TFSI terhadap sifat dasar perovskite FAPbI₃ pada konsentrasi 5 mg ditandai dengan puncak difraksi yang paling tajam dan intensitas tertinggi, serta kristalinitas yang optimal dengan ukuran kristal yang lebih besar pada karakterisasi XRD serta hasil FESEM dapat menunjukkan bahwa butiran berukuran besar dengan permukaan yang sangat padat dan seragam.
2. Pada penambahan Co-TFSI terhadap sifat optik perovskite FAPbI₃ pada konsentrasi 5 mg nilai bandgap meningkat menjadi 1,56 eV, menunjukkan bahwa material perovskite telah mencapai stabilitas optimal dengan struktur kristal yang baik dimana kurva menunjukkan penurunan yang lebih stabil dan optimal, menandakan kualitas lapisan yang paling baik. Serta hasil spektrum PL yang menunjukkan kondisi optimal untuk rekombinasi radiatif. Konsentrasi ini juga efektif dalam mengurangi cacat pada material, meningkatkan pancaran cahaya, dan menghasilkan kualitas film perovskite yang terbaik.
3. Pada penambahan Co-TFSI terhadap efisiensi perovskite FAPbI₃ pada konsentrasi 5 mg menghasilkan parameter terbaik dengan nilai PCE 1,26% ($V_{oc} \approx 0,86$ V, $J_{sc} = 4,09$ mA/cm², $FF = 0,56$) pada karakterisasi J-V dalam Cahaya, dan menunjukkan peningkatan mobilitas pembawa muatan hingga $1,61 \times 10^{-6}$ dan trap density yang stabil pada $9,56 \times 10^{21}$ pada karakterisasi J-V dalam gelap serta EIS menunjukkan nilai impedansi terendah sebesar $0,4 \times 10^5$ Ohm.

B. Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan, saran untuk penelitian selanjutnya adalah untuk mengkaji lebih lanjut pengaruh penambahan Co-TFSI pada perovskite FAPbI_3 dengan tambahan variasi konsentrasi mulai dari 6 mg hingga konsentrasi yang lebih tinggi, guna menentukan konsentrasi optimal yang memberikan kinerja terbaik. Penelitian ini penting untuk mengidentifikasi hubungan antara konsentrasi Co-TFSI dan peningkatan efisiensi serta stabilitas material. Dengan melakukan analisis lebih mendalam pada sifat fisik, optik, dan elektronik perovskite yang dimodifikasi, diharapkan dapat ditemukan kondisi yang paling optimal untuk aplikasi fotovoltaik, baik dari segi efisiensi konversi energi maupun ketahanan jangka panjang sel surya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul Rozak, O., Tri Mulyadi, R., & Nurfadilah, H. (2023). Analysis The Effect of Solar Radiation on The Efficiency of PV Plant 50 kWp Rooftop UNPAM Viktor. *Journal of Renewable Energy and Mechanics*, 6(02), 63–76.
- Al-Thani, N. J. (2020). Electrochemical Impedance Spectroscopy Analysis of Hole Transporting Material Free Mesoporous and Planar Perovskite Solar Cells. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 10(9).
- Ahdaliza, A. Z. (2023). Pengaruh Variasi Suhu Anealing Lapisan Mai (Metilammonium Iodide) Terhadap Kestabilan Perovskite Mapbi3. Universitas Islam Negeri Mahmud Yunus Batusangkar. In *Universitas Islam Negeri Mahmud Yunus Batusangkar*. (Vol. 13, Issue 1).
- Ali Umar, A., Devkota, N., Dai, S., Ahmed, W., Li, X., Wang, J., Yu, A., & Zhan, Y. (2024). Enhancing the Phase Crystallinity of Buried Layer Perovskites through Organic Salt Molecule- Assisted Crystal Growth. *Solar RRL*, 8.
- Ali Umar, M. I., Ahdaliza, A. Z., El-Bahy, S. M., Aliza, N., Sadikin, S. N., Ridwan, J., Ehsan, A. A., Amin, M. A., El-Bahy, Z. M., & Ali Umar, A. (2023). Optoelectrical Properties of Hexamine Doped-Methylammonium Lead Iodide Perovskite under Different Grain-Shape Crystallinity. *Nanomaterials*, 13(7).
- Alim, A., Abdillah, H., & Ramdani, S. (2022). Analisis perbandingan daya keluaran modul solar cell 50 WP terhadap penambahan reflector cermin datar.
- Amalia, Arifin, Z., & Tamamy, Jehan, A. (2018). 112-Article Text-608-1-10-20210322. 2(2), 39–48.
- Anderson, J. (2024). Advanced principles of photovoltaic energy conversion. *Renewable Energy Reviews*, 45(2), 123–145.
- Anggara, M., & Saputra, W. (2023). Analisis Kinerja Sel Surya Monocrystalline dan Polycrystalline di Kabupaten Sumbawa NTB. *Jurnal Flywheel*, 14(1), 7–12.
- Armansyah, A., Husna, J., & Harahap, K. I. (2024). Penggunaan Sistem Solar Sel Pada Rumah Sederhana Sebagai Penerangan. *JET (Journal of Electrical*

- Technology*), 8(3), 106–111. <https://doi.org/10.30743/jet.v8i3.8802>
- Brier, J., & lia dwi jayanti. (2020). Traditional System, Ethics, Safety, Efficacy. *Http://Journal.Um-Surabaya.Ac.Id/Index.Php/JKM/Article/View/2203*, 21(1).
- Cullity, B.D., & Stock, S. . (2014). Elements of X-ray Diffraction (3rd Edition). In *Pearson Education Limited*.
- Dalimunthe, M. E., Lubis, Z., Sutejo, E., & Sari, D. P. (2023). Analisis Solar Cell Sebagai Sumber Energi Alternatif Pada Gedung I Universitas Pembangunan Panca Budi. *Seminar of Social Sciences Engineering & Humaniora SCENARIO 2023*, 89–99.
- Damanik, T., & Silaban, S. (2023). Penerapan Solar Cell 200 Wp Listrik Pada Listrik Rumah Tangga. *SINERGI POLMED: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 4(1), 8–13.
- Dwisetyowati, S. (2020). *Performa Sel Surya*. 6–53.
- Egerton, R. F. (2018). *Physical Principles of Electron Microscopy: An Introduction to TEM, SEM, and AEM*. Springer.
- Fasmin, F., & Srinivasan, R. (2022). Electrochemical Impedance Spectroscopy: Recent Applications and Future Scope. *Journal of The Electrochemical Society*, 169(4), 040502.
- Gangishetty, M. K., Scott, R. W. J., & Kelly, T. L. (2016). Effect of relative humidity on crystal growth, device performance and hysteresis in planar heterojunction perovskite solar cells. *Nanoscale*, 8(12), 6300–6307.
- Gfroerer, T. H. (2000). Photoluminescence in Analysis of Surfaces and Interfaces. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, February. <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a2510>
- Ghina Afrilia, C. (2019). Studi proses sintesis serbuk nano ZnO beserta karakterisasi. *Jurnal Ilmu Dan Inovasi Fisika*, 3(2), 105–113.
- Goldstein, J., et al. (2017). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. Springer.
- Gunawan, L. A., Agung, A. I., Widyartono, M., & Haryudo, S. I. (2021). Rancang bangun Pembangkit Listrik Tenaga Surya portable. *Jurnal Teknik Elektro*, 10(1),

65–71.

- Halliday, D., Resnick, R., & W. J. (2018). *Fundamental of physics: Extended 11th edition*.
- Hidayanti, F. (2020). Aplikasi Sel Surya. *Angewandte Chemie International Edition*, 6, 951–952.
- Huang, S., Li, H., Liu, J., & Tao, J. (2023). Study of the photovoltaic properties of Cs and Cl co-doped FAPbI₃ based on first principles. *Materials Research Express*, 10(2). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acb67f>
- Kim, J. (2024). Silicon-based photovoltaics: Current status and future prospects. *Progress in Photovoltaics*, 32(1), 15–35.
- Kumar, N. S., & Babu, K. C. (2021). A review on perovskite solar cells (PSCs), materials and applications. *Journal of Materiomics*, 7(5), 940–956.
- Lee, J. W., et al. (2021). Optimization of Additive Concentration for High-Efficiency Perovskite Solar Cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(12), 7890–7898.
- Liu, Y., Zhang, H., Wang, J., & Li, M. (2023). Cobalt-Based Dopant Engineering for Enhanced Perovskite Solar Cell Performance. *Advanced Materials*, 35(4), 2205786.
- Liu, Y., et al. (2019). Effects of additive concentration on the morphology of thin films. *Journal of Materials Science*, 54(120), 7890–7900. doi:10.1007/s10853-019-03745-6
- Liza, E. P., Humaidi, S., & Rifai, A. (2023). Manufacture of Lithium Lanthanum Titanate Active Material as a Lithium-Ion Capacitor Anode Using Solid-State Reaction Methods. *Journal of Technomaterial Physics*, 5(1), 19–23.
- Makableh, Y. F., & Dalal'ah, T. N. (2022). Investigation of the effect of the fabrication temperature on the optical, morphological and crystallinity properties of Perovskites composites. *Micro and Nanostructures*, 167, 207259.
- Masta, N. (2020). *Buku Materi Pembelajaran (BMP) Scanning electron microscopy*. Patra Widya: Seri Penerbitan Penelitian Sejarah dan Budaya.
- Moh. Irfan Ainurraziqin, Sudarlin, P. A. (2016). Kajian teoritis pengaruh gugus

- Trifenilamin dan Asam Sianoasetat pada Pelargonidin sebagai senyawa Dye Sel Surya Tersensitasi (Dssc). *Indonesian Journal of Materials Chemistry*, 1(1), 1–41.
- Noman, M., Shahzaib, M., Jan, S. T., Shah, S. N., & Khan, A. D. (2023). 26.48% efficient and stable FAPbI₃ perovskite solar cells employing SrCu₂O₂ as hole transport layer. *RSC Advances*, 13(3), 1892–1905.
- NREL. (2023). Best Research-Cell Efficiencies, National Renewable Energy Laboratory (NREL), <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>. In *National Renewable Energy Laboratory (NREL): Vol. (Issue, p.)*.
- Rizki, R. M., & Abdi Bangsa, I. (2023). Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Pada Gedung UPHB PT Pembangkit Jawa Bali Unit Muara Karang. *Aisyah Journal Of Informatics and Electrical Engineering (A.J.I.E.E)*, 5(1), 67–75. <https://doi.org/10.30604/jti.v5i1.128>
- Rodriguez, M. (2023). Modern applications of the photoelectric effect. *Applied Physics Reviews*, 10(4), 041305.
- Saifudin, M., Susilaningsih, S., & Wedi, A. (2020). Pengembangan Multimedia Interaktif Materi Sumber Energi untuk Memudahkan Belajar Siswa SD. *JKTP: Jurnal Kajian Teknologi Pendidikan*, 3(1), 68–77.
- Saliba, M., et al. (2016). High-Performance and Stable Inverted Perovskite Solar Cells. *Science*, 354((6309)), 206–209.
- Setiyawan, P., Utomo, S. B., & Nugroho, A. A. (2021). Analisa Optimasi Photovoltaic(PV) 100 W Menggunakan MPPT dengan Algoritma Perturb dan Observe. *Elektrika*, 13(1), 1. <https://doi.org/10.26623/elektrika.v13i1.2984>
- Setyawan, L. B. (2018). Perkembangan dan Prospek Sel Fotovoltaik Organik: Sebuah Telaah Ilmiah. *Techné : Jurnal Ilmiah Elektroteknika*, 17(02), 93–100.
- Shihab, M. Q. (2021). Tafsir Al-Mishbah, Pesan, Kesan, Dan Keserasian Al-Qura. *Lentera Hati*, 5, Edisi 2021.
- Skoog, D. A., & Holler, F. J. (2017). *Principles of Instrumental Analysis*. Cengage Learning.

- Stanić, D., Kojić, V., Boháč, M., Čižmar, T., Juraić, K., Rath, T., & Gajović, A. (2022). Simulation and Optimization of FAPbI₃ Perovskite Solar Cells with a BaTiO₃ Layer for Efficiency Enhancement. *Materials*, *15*(20).
- Suharti, T. 2013. (2019). Dasar - Dasar Spektrofotometri Uv-Vis Dan Spektrometri Massa Untuk Penentuan Struktur Senyawa Organik. In *Lampung: Anugrah Utama Raharja*. (Vol. 11, Issue 1, pp. 1–14).
- Sunardiyo, S., Suryanto, A., Primadiyono, Y., Sarwono, E., & Asriningati, A. (2022). Pemodelan Sistem Pembangkit Hybrid Diesel Generator-Pv Microgrid Interaktif (Kajian Smart Hybrid). *Inovasi Kimia*, *1*, 65–87.
- Sunarti, T. (2020). Usaha , Energi, dan Usaha. *Direktorat Pendidikan Menengah Kejuruan., Departemen*, 1–58.
- Sungkawa, H. B., & Ladika, A. D. (2018). Validasi spektrofotometer UV-Vis pada analisis formalin di Poltekkes Kemenkes Pontianak. *Jurnal Laboratorium Khatulistiwa*, *1*(1), 72–80.
- Tipler, P. A., & Mosca, G. (2007). *Physics for Scientists and Engineers* (Issue Bag. 133). W. H. Freeman. <https://books.google.co.id/books?id=AttDBYgLeZkC>
- Tonui, P., Oseni, S. O., Sharma, G., Yan, Q., & Tessema Mola, G. (2018). Perovskites photovoltaic solar cells: An overview of current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *91*(April), 1025–1044.
- Triandini, L. S. (2024). *Misteri Matahari : Energi, Suhu, dan Fenomena Terkait*. 8, 24243–24249.
- Triyanto, A., Hamzah, A. I., Sulkhan, A., & ... (2023). Review Peningkatan Nilai Efisiensi Sel Surya Perovskite. *OKTAL: Jurnal Ilmu ...*, *2*(2), 360–371.
- Wang, Y., & Li, X. (2024). Quantum theory of photoelectric effect: Experimental validations. *Physical Review Letters*, *132*(5), 056802.
- Wang, Y., et al. (2019). Mechanisms of Efficiency Enhancement in Perovskite Solar Cells via Additive Engineering. *Nano Energy*, *58*, 699–707.
- Wang, Y., Z. (2020). Understanding the relationship between structural changes and electrochemical performance in Co-TFSI modified materials. *Nature*

Communications, 11(1), 1–9.

- Wei, Q., Chang, D., Ye, Z., Li, X., Zan, L., Gao, L., Fu, F., & Yang, D. (2021). Giant improvement of performances of perovskite solar cells via component engineering. *Journal of Colloid and Interface Science*, 588, 393–400.
- Widianto, E., Hanifi, R., Kardiman, K., & Efelina, V. (2022). Desain dan Simulasi Sel Surya Perovskite Berbasis $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$ Menggunakan Graphene Oxide sebagai Material Pengangkut Hole. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 17(1), 161.
- Xie, Z., Li, Y., Li, X., Fang, Y., Chang, J., Yang, Q., Sun, X., Miao, C., Lu, G., Chen, Z., Li, G., Jin, Y., Wang, Z., & Li, X. (2024). High performance inverted planar perovskite solar cells enhanced by heteroatomic functionalized hole transport materials. *Materials Chemistry Frontiers*, 8(16), 2764–2774.
- Zhang, X., et al. (2020). Additive Engineering for Efficient and Stable Perovskite Solar Cells. *Advanced Materials*, 32(15), 1905766.
- Zhang, J., Hu, X. G., Ji, K., Zhao, S., Liu, D., Li, B., Hou, P. X., Liu, C., Liu, L., Stranks, S. D., Cheng, H. M., Silva, S. R. P., & Zhang, W. (2024). High-performance bifacial perovskite solar cells enabled by single-walled carbon nanotubes. *Nature Communications*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46620-1>
- Zhang, L. (2023). Historical development and modern applications of the photoelectric effect. *Reviews of Modern Physics*, 95(4), 045001.
- Zhao, Y., Zhou, W., Han, Z., Yu, D., & Zhao, Q. (2021). Effects of ion migration and improvement strategies for the operational stability of perovskite solar cells. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 23. <https://doi.org/10.1039/D0CP04418K>
- Zhou, Y., et al. (2021). Ionic Doping Strategies for Enhanced Performance in Formamidinium Lead Iodide Perovskite Solar Cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13((18)), 21345–21355.