

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Maret hingga Juli 2025 di Laboratorium *Solar Energy Material* yang bertempat di Gedung Pasca Sarjana, Jl. Dr. Setiabudhi No. 229, Isola, Kec. Sukasari, Kota Bandung, Jawa Barat.

3.2 Metode Penelitian

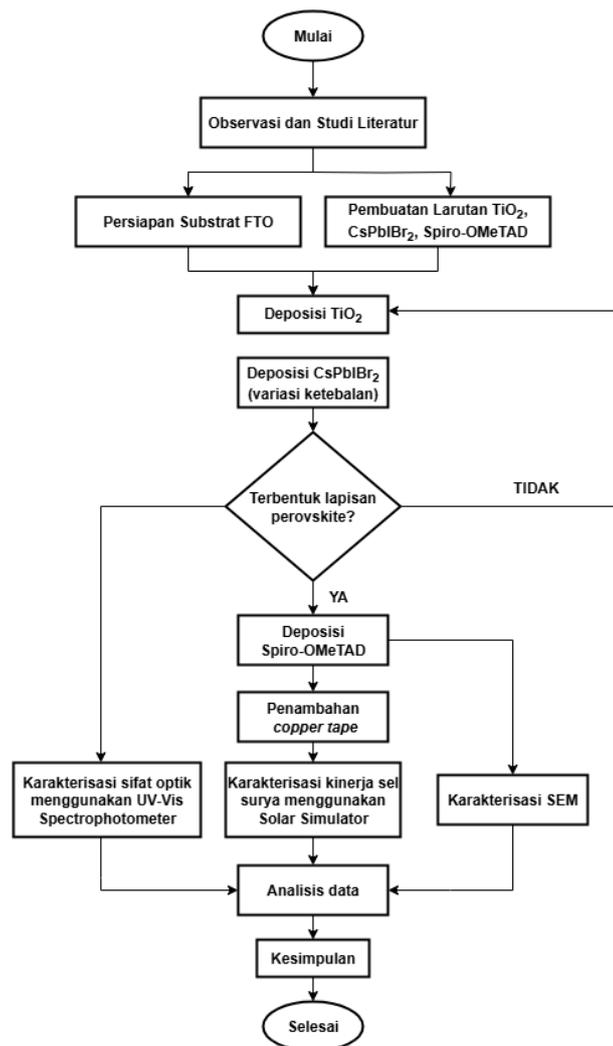
Metode yang dilakukan pada penelitian ini yaitu metode studi literatur dan eksperimen. Studi literatur dilakukan dengan memperoleh informasi terkait topik penelitian dari artikel, karya ilmiah, laporan penelitian, buku digital serta media lainnya sehingga diperoleh hasil penelitian yang sesuai. Metode eksperimen dilakukan dengan membuat perangkat *Perovskite Solar Cell* (PSC) menggunakan fotoelektroda berbahan TiO₂. Proses dimulai dengan preparasi alat dan bahan, kemudian pembuatan fotoelektroda TiO₂ dan deposisi ke atas substrat, pembuatan larutan perovskite CsPbIBr₂ deposisi perovskite pada substrat dengan variasi kecepatan *spin-coating* (untuk mengatur ketebalan), serta proses *annealing* dengan variasi waktu. Selanjutnya dilakukan penambahan lapisan *hole transport material* (HTM) berupa Spiro-OMeTAD dan penambahan elektroda balik berupa *copper tape*. Setelah perangkat PSC tersusun, dilakukan karakterisasi untuk mengetahui performa dari sel surya yang telah dibuat.

Kedua metode ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh suatu variabel terhadap variabel lain, sehingga diperoleh pemahaman mengenai pengaruh ketebalan lapisan perovskite dan waktu annealing terhadap kinerja PSC. Penelitian ini menggunakan tiga jenis variabel, yaitu variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol. Rincian dari masing-masing variabel terdapat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Variabel Penelitian

Variabel Bebas	Ketebalan lapisan perovskite CsPbIBr ₂
Variabel Terikat	Karakteristik optik dan kinerja sel surya perovskite
Variabel Kontrol	Struktur sel surya perovskite (FTO/ TiO ₂ / CsPbIBr ₂ / Spiro-OMeTAD/ <i>copper tape</i>)

Berikut merupakan diagram alir penelitian yang dilakukan ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Sherlla Dwinata, 2025

PENGARUH KETEBALAN LAPISAN CsPbIBr₂ TERHADAP KINERJA SEL SURYA PEROVSKITE
 Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

3.3 Alat dan Bahan yang Digunakan

Penelitian ini menggunakan berbagai peralatan laboratorium dan bahan kimia yang mendukung proses pembuatan serta karakterisasi *Perovskite Solar Cell* (PSC) berbasis CsPbIBr₂. Alat yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Alat yang digunakan

<i>Gelas beaker</i>	<i>Magnetic stirrer</i>
<i>Spatula</i>	<i>UV Ozone Cleaner</i>
<i>Hot plate</i>	<i>Ultrasonic Cleaner</i>
<i>Petri dish</i>	<i>Spin Coater</i>
<i>Pinset</i>	<i>Alumunium Foil</i>
<i>Stir bar</i>	<i>Multimeter</i>
<i>Mikropipet</i>	<i>Oven</i>
<i>Glove box</i>	<i>Hair dryer</i>
<i>Selotip anti panas</i>	<i>Penggaris</i>
<i>Furnace</i>	<i>Solar Simulator AM 1,5G Filter</i> <i>100 mWcm⁻²</i>
<i>Gunting</i>	<i>UV-Vis Spectrophotometer</i>
<i>Glass vial</i>	<i>Staining jar</i>

Bahan yang digunakan untuk membuat ETL TiO₂, perovskite CsPbIBr₂, HTL Spiro-OMeTAD dan *counter* elektroda *Conductive Tape* pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Bahan yang digunakan

<i>Cesium iodide (CsI)</i>	<i>Aceton</i>
<i>Lead (II) bromide (PbBr₂)</i>	<i>Isopropil alcohol (IPA)</i>
<i>4-tert-butilpiridina (TBP)</i>	<i>Dimetil sulfoksida (DMSO)</i>
<i>Chlorobenzene</i>	<i>FTO Glass</i>

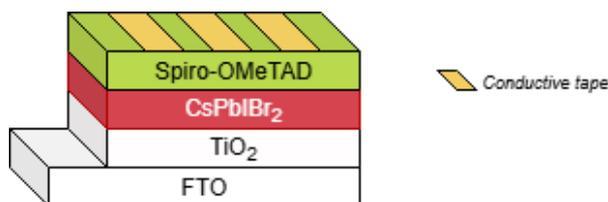
Sherlla Dwinata, 2025

PENGARUH KETEBALAN LAPISAN CsPbIBr₂ TERHADAP KINERJA SEL SURYA PEROVSKITE
Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

Spiro-OMeTAD <i>powder</i>	Aquades
Sabun pencuci piring	Dimetil formamide (DMF)
Litium bis-(trifluorometilsulfonil) imida (Li-TFSI)	Hydrochloric acid (HCl)
TiO ₂ <i>powder</i>	Triton x-100
Ethanol	<i>Copper tape</i>

3.4 Prosedur Penelitian

Penelitian dilakukan mulai dari persiapan alat dan bahan, pencucian substrat, pembuatan dan deposisi elektroda TiO₂, deposisi perovskite CsPbIBr₂, penambahan HTL Spiro-OMeTAD serta penambahan elektroda balik *copper tape* hingga *perovskite solar cell* (PSC) tersusun dan dapat dikarakterisasi. Struktur PSC pada penelitian ini terlihat seperti pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Struktur *Perovskite Solar Cell*

3.4.1. Pencucian Substrat FTO

Pencucian substrat menggunakan kaca FTO berukuran 2.5×2.5 cm². Substrat kaca FTO dicuci terlebih dahulu untuk menghilangkan kotoran, debu, dan kontaminan lain yang dapat mengganggu kualitas lapisan tipis. Proses pencucian dilakukan secara bertahap dimulai dengan merendam substrat ke dalam larutan sabun dan air ke dalam *standing jar*, kemudian dibersihkan menggunakan *ultrasonic cleaner* selama 10 menit seperti pada Gambar 3.3. Setelah itu, substrat

Sherlla Dwinata, 2025

PENGARUH KETEBALAN LAPISAN CsPbIBr₂ TERHADAP KINERJA SEL SURYA PEROVSKITE
Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

dibilas menggunakan air bersih dan direndam kembali dalam air deionisasi, lalu dibersihkan kembali menggunakan *ultrasonic cleaner* selama 10 menit.



Gambar 3.3 Pembersihan Substrat FTO

Proses selanjutnya adalah pencucian menggunakan acetone dan terakhir menggunakan isopropanol (IPA), diikuti dengan pembersihan kembali menggunakan *ultrasonic cleaner* selama 10 menit. Setelah proses pencucian selesai, substrat dikeringkan menggunakan oven dengan suhu 100°C selama 10 menit. Setelah dikeringkan menggunakan oven, substrat kemudian dimasukkan ke dalam oven ozon (*UV-Ozone Cleaner*) selama 15 menit untuk menghilangkan sisa-sisa kontaminan organik.

3.3.2 Pembuatan Larutan TiO_2 (ETL)

Larutan TiO_2 dibuat dengan mencampurkan secara langsung 0,3 gram serbuk titanium dioksida (TiO_2), 1,5 mL etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), dan $25\ \mu\text{L}$ Triton X-100 ke dalam vial. Campuran tersebut kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* pada suhu 50°C dengan kecepatan 500 rpm selama 1 jam hingga diperoleh larutan yang homogen. Penggunaan etanol berfungsi sebagai pelarut yang mempermudah dispersi partikel TiO_2 , sedangkan penambahan Triton X-100 berperan sebagai surfaktan untuk meningkatkan kestabilan suspensi dan mencegah terjadinya aglomerasi partikel.



Gambar 3.4 TiO₂ Powder

Aglomerasi merupakan proses penggumpalan partikel-partikel kecil menjadi gumpalan yang lebih besar, sehingga dapat menyebabkan larutan tidak homogen dan menghasilkan lapisan tipis yang kurang rata. Serbuk titanium dioksida yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.4, dimana tampak bahwa bubuk TiO₂ memiliki bentuk serbuk halus berwarna putih. Keberadaan partikel dalam bentuk serbuk halus ini mempermudah proses pencampuran sehingga larutan TiO₂ yang dihasilkan dapat tersebar secara merata dan siap digunakan pada tahap fabrikasi lapisan tipis berikutnya.

3.3.3 Deposisi *Electron Transport Layer* TiO₂

Lapisan TiO₂ dideposisikan pada substrat FTO yang telah dibersihkan dan diproses dengan *oven ozon*. Larutan TiO₂ yang telah disiapkan kemudian diteteskan sebanyak 80 μ L menggunakan metode *spin coating* dua tahap. Tahap pertama dilakukan dengan kecepatan 1000 rpm selama 10 detik, sedangkan tahap kedua dilakukan dengan kecepatan 3000 rpm selama 30 detik. Tahapan proses tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.5, di mana pada gambar pertama terlihat proses *spin coating* menggunakan alat spin coater untuk memperoleh lapisan tipis TiO₂ yang merata pada permukaan substrat. Selanjutnya, gambar kedua memperlihatkan tahap *annealing* di dalam furnace pada suhu 450°C selama 2 jam, yang berfungsi untuk mengkristalkan lapisan TiO₂ sehingga lebih stabil secara struktural. Pada gambar ketiga ditunjukkan hasil akhir berupa substrat FTO yang telah dilapisi TiO₂ dengan permukaan berwarna putih susu yang menandakan terbentuknya lapisan TiO₂ yang homogen.

Sherlla Dwinata, 2025

PENGARUH KETEBALAN LAPISAN CsPbIBr₂ TERHADAP KINERJA SEL SURYA PEROVSKITE
Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

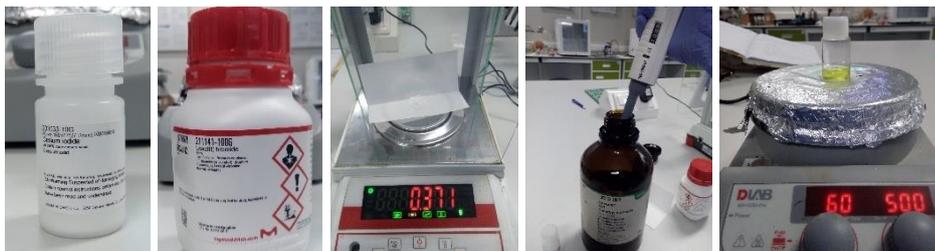


Gambar 3.5 Proses Deposisi TiO_2

Setelah proses spin coating, substrat kemudian dikeringkan menggunakan *hotplate* pada suhu 80°C selama 10 menit, lalu dilakukan proses *annealing* pada suhu 450°C selama 2 jam untuk mengkristalkan lapisan TiO_2 . Setelah pendinginan, substrat disimpan di dalam *dry box* hingga digunakan pada tahap selanjutnya.

3.3.4 Pembuatan Larutan Perovskite CsPbIBr_2

Larutan perovskite dibuat dengan melarutkan 0,367 g PbBr_2 (Sigma-Aldrich) dan 0,26 g CsI (Sigma-Aldrich) ke dalam 1 mL dimetil sulfoksida (DMSO). Campuran tersebut kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* pada suhu 60°C dengan kecepatan 500 rpm selama 3 jam hingga terbentuk larutan yang homogen dan berwarna kuning terang. Tahapan proses pembuatan larutan perovskite ini ditunjukkan pada Gambar 3.6. Pada gambar pertama dan kedua terlihat bahan utama berupa PbBr_2 dan CsI dalam bentuk serbuk putih yang ditimbang secara teliti menggunakan timbangan analitik untuk memperoleh massa yang sesuai dengan perhitungan stoikiometri. Gambar ketiga menunjukkan pelarut DMSO yang digunakan untuk melarutkan kedua garam tersebut, sedangkan gambar keempat memperlihatkan proses pengadukan larutan menggunakan *magnetic stirrer* pada suhu terkontrol sebesar 60°C . Pada gambar kelima terlihat vial berisi larutan yang ditutup rapat dengan parafilm.



Gambar 3.6 Proses Pembuatan Larutan Perovskite CsPbIBr₂

Setelah proses pengadukan selesai, larutan disimpan di dalam *glove box* dengan kondisi terkontrol untuk mencegah pengaruh kelembapan yang dapat menyebabkan degradasi pada larutan. Penyimpanan dalam vial tertutup dan dibungkus dengan aluminium foil bertujuan menjaga kestabilan larutan perovskite agar dapat digunakan pada tahap fabrikasi selanjutnya tanpa mengalami perubahan komposisi atau sifat optik.

3.3.5 Deposisi Larutan Perovskite CsPbIBr₂

Sebelum proses deposisi larutan perovskite, substrat FTO/TiO₂ terlebih dahulu dipanaskan (*pre-heating*) pada suhu 80 °C selama 10 menit. Tahap ini bertujuan untuk menghilangkan kelembapan sisa pada permukaan substrat serta meningkatkan energi permukaan, sehingga larutan perovskite yang ditetaskan dapat menyebar lebih merata dan membentuk lapisan film yang homogen. Larutan perovskite CsPbIBr₂ yang telah dibuat kemudian ditetaskan sebanyak 100 µL substrat FTO/TiO₂ menggunakan metode *spin coating* dua tahap, yaitu pada kecepatan 1000 rpm selama 10 detik, kemudian 3000 rpm selama 30 detik.



Gambar 3.7 Proses Deposisi Perovskite CsPbIBr₂

Sherlla Dwinata, 2025

PENGARUH KETEBALAN LAPISAN CsPbIBr₂ TERHADAP KINERJA SEL SURYA PEROVSKITE
Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

Gambar 3.7 menunjukkan proses deposisi perovskite CsPbIBr_2 ke atas substrat FTO/ TiO_2 . Untuk membentuk film dengan ketebalan bervariasi, dilakukan metode penetasan bertahap (*layer-by-layer*), di mana satu tetes larutan ditetaskan pada awal proses spin coating, kemudian setelah proses selesai, substrat menjalani proses *annealing* satu tahap menggunakan *hotplate* pada suhu 280°C selama 10 menit untuk meningkatkan kristalisasi dan kestabilan film. Setelah itu, dilakukan penetasan ulang pada lapisan yang sama, diikuti proses spin coating dan pemanasan seperti sebelumnya. Langkah ini diulangi hingga jumlah tetesan mencapai 3, 5, 7, atau 9 tetes sesuai variasi ketebalan yang diteliti.

3.3.6 Pembuatan Larutan Spiro-OMeTAD (HTL)

Bahan utama yang digunakan dalam proses pembuatan larutan Spiro-OMeTAD, yaitu serbuk Spiro-OMeTAD, 4-tert-butylpyridine (4-TBP), dan larutan Li-TFSI seperti yang terlihat pada Gambar 3.8. Larutan Spiro-OMeTAD dengan konsentrasi $72,3\text{ mg/mL}$ dalam pelarut klorobenzena disiapkan sebagai *lapisan transport hole* (HTL). Untuk meningkatkan performa lapisan ini, ditambahkan $28,8\ \mu\text{L}$ 4-TBP sebagai aditif serta $17,5\ \mu\text{L}$ larutan Li-TFSI (520 mg/mL dalam asetonitril) sebagai dopan. Campuran tersebut kemudian dihomogenkan hingga terbentuk larutan Spiro-OMeTAD yang siap dideposisikan pada substrat.



Gambar 3.8 Larutan Spiro-OMeTAD

3.3.7 Deposisi *Hole Transport Layer* Spiro-OMeTAD

Setelah proses deposisi dan annealing lapisan perovskite CsPbIBr₂ selesai, substrat di-*aging* terlebih dahulu di dalam *glove box* selama 1 jam untuk menstabilkan permukaan film perovskite sebelum dilapisi lapisan *hole transport layer* (HTL). Larutan Spiro-OMeTAD kemudian dideposisikan di atas substrat FTO/TiO₂/CsPbIBr₂ menggunakan metode *spin coating* dua tahap, yaitu pada kecepatan 1000 rpm selama 10 detik, kemudian 3000 rpm selama 30 detik seperti pada Gambar 3.9. Pelapisan Spiro-OMeTAD dilakukan sebanyak empat kali dengan tujuan membentuk lapisan HTL yang lebih padat dan merata.



Gambar 3.9 Proses Deposisi Spiro-OMeTAD

Pelapisan bertahap ini bertujuan untuk meningkatkan kestabilan film perovskite terhadap degradasi akibat paparan udara luar, serta mengoptimalkan transportasi *hole* dengan meminimalkan rekombinasi muatan pada antarmuka. Metode ini juga berperan sebagai perlindungan awal (*encapsulation*) sebelum elektroda akhir dipasang. Setiap pelapisan dilakukan dengan kecepatan 3000 rpm selama 30 detik, kemudian dilanjutkan dengan pengeringan sementara pada hotplate suhu 60 °C selama 10 menit untuk mempercepat proses pengeringan dan pembentukan film tipis yang merata.

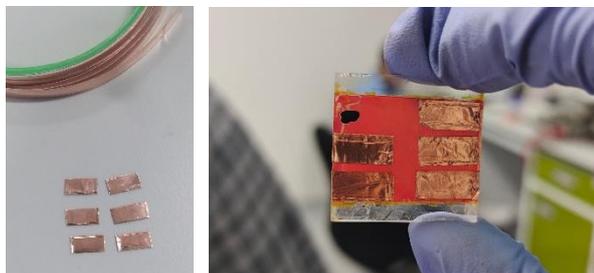
3.3.8 Pemasangan Elektroda Balik *Copper Tape*

Pemasangan elektroda balik dilakukan menggunakan *copper tape* dengan ukuran panjang 1 cm dan lebar 0,5 cm. Pada setiap substrat, *copper tape* dipotong sebanyak enam bagian kecil, kemudian ditempelkan pada enam area berbeda di permukaan substrat yang sebelumnya telah melalui proses deposisi hingga

Sherlla Dwinata, 2025

PENGARUH KETEBALAN LAPISAN CsPbIBr₂ TERHADAP KINERJA SEL SURYA PEROVSKITE
Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

membentuk lapisan spiro-OMeTAD, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.10. Pemasangan copper tape ini bertujuan untuk membentuk kontak listrik yang baik antara lapisan transport *hole* dengan elektroda balik, sehingga memungkinkan aliran muatan berlangsung secara optimal.



Gambar 3.10 Proses pemasangan copper tape

Setiap potongan *copper tape* ditempatkan dengan hati-hati agar menutupi area elektroda balik pada masing-masing sel uji tanpa merusak lapisan tipis di bawahnya. Dengan konfigurasi enam potongan pada satu substrat, diperoleh enam sel uji yang independen sehingga memungkinkan pengambilan enam data pengukuran terpisah dari satu sampel. Konfigurasi ini tidak hanya memaksimalkan pemanfaatan substrat, tetapi juga meningkatkan efisiensi dalam proses pengukuran performa sel surya perovskite.

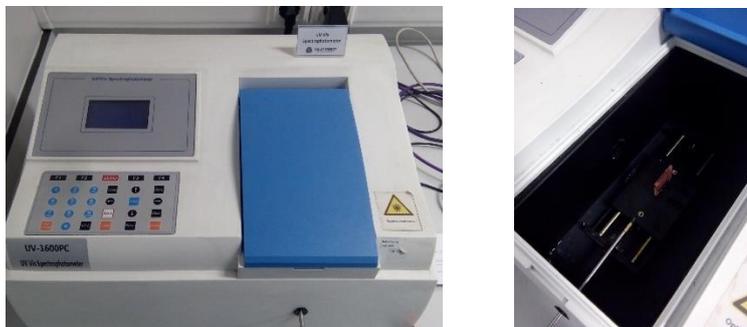
3.4 Karakterisasi

Karakterisasi dilakukan untuk mengetahui sifat optik, kinerja perangkat, dan struktur permukaan dan topografi material yang telah dibuat. Tiga metode karakterisasi yang digunakan adalah pengukuran absorbansi menggunakan Uv-Vis Spectrophotometer, pengukuran karakteristik arus-tegangan (J-V Measurements), dan karakterisasi morfologi menggunakan ZEISS Sigma *Scanning Electron Microscope* (SEM).

3.4.1 Karakterisasi UV-Vis Spectrophotometer

Pengukuran dilakukan menggunakan UV-Vis Spectrophotometer untuk memperoleh spektrum absorbansi lapisan perovskite terlihat seperti pada gambar

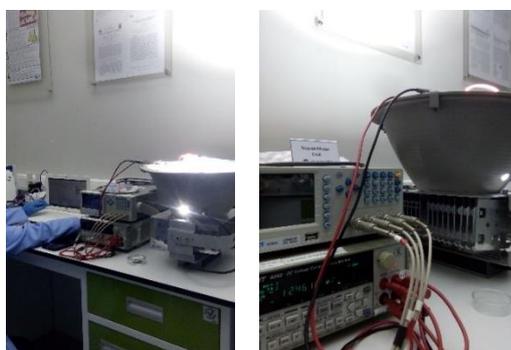
3.11. Data absorptansi digunakan untuk menentukan serapan cahaya panjang gelombang pada rentang 200-1100 nm serta mengestimasi energi celah pita (bandgap). Pengukuran ini dilakukan pada sampel yang telah dideposisikan lapisan perovskite CsPbI₂Br₂ sebelum dideposisikan HTL dan pemasangan elektroda balik.



Gambar 3.11 UV-Vis Spectrophotometer

3.4.2 Karakterisasi J-V Measurements

Pengukuran karakteristik arus-tegangan (J-V) dilakukan untuk menentukan parameter kinerja sel surya seperti tegangan sirkuit terbuka (V_{oc}), kepadatan arus *short-circuit* (J_{sc}), faktor pengisian (FF), dan efisiensi (η). Alat ukur yang digunakan untuk mengetahui kurva J-V yaitu *Solar Simulator Standard AM 1.5G* 1000 W/m² seperti yang terlihat pada gambar 3.12. Pada penelitian ini, elektroda balik menggunakan *copper tape* karena penggunaan *carbon paste* mengandung air menyebabkan degradasi lapisan perovskite.



Gambar 3.12 *Solar Simulator Standard AM 1.5G* 1000 W/m²

Sherlla Dwinata, 2025

PENGARUH KETEBALAN LAPISAN CsPbI₂Br₂ TERHADAP KINERJA SEL SURYA PEROVSKITE
Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

3.4.3 Karakterisasi *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Karakterisasi morfologi lapisan CsPbIBr₂ dilakukan menggunakan ZEISS Sigma *Scanning Electron Microscope* (SEM) seperti yang terlihat pada Gambar 3.13. Karakterisasi ini bertujuan untuk mempelajari struktur permukaan dan topografi material, sehingga dapat diketahui tingkat homogenitas, kerapatan butir, serta adanya cacat permukaan yang mungkin terbentuk selama proses deposisi. Hasil pengukuran SEM ditampilkan dalam bentuk citra 2 dimensi yang merepresentasikan kondisi morfologi lapisan secara detail. Hal ini penting untuk dianalisis karena kualitas morfologi berperan langsung terhadap sifat optik maupun elektrik dari lapisan perovskite, yang pada akhirnya akan memengaruhi kinerja sel surya perovskite secara keseluruhan.



Gambar 3.13 *Scanning Electron Microscope* (SEM)

3.5 Teknik Analisis Data

3.5.1 Analisis Sifat Optik Lapisan Perovskite CsPbIBr₂

Data yang diperoleh dari pengukuran UV-Vis dianalisis untuk menentukan serapan. Nilai serapan optik dianalisis pada rentang panjang gelombang 200–1100 nm untuk melihat sejauh mana lapisan perovskite mampu menyerap foton pada daerah spektrum cahaya tampak. Analisis ini memberikan gambaran mengenai kemampuan material dalam memanfaatkan energi cahaya matahari, khususnya pada rentang spektrum yang relevan untuk aplikasi sel surya. Selain itu, pola serapan yang dihasilkan juga dapat digunakan untuk memperkirakan *band gap*

Sherlla Dwinata, 2025

PENGARUH KETEBALAN LAPISAN CsPbIBr₂ TERHADAP KINERJA SEL SURYA PEROVSKITE
Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

optik dari material perovskite, sehingga hubungan antara ketebalan lapisan dengan sifat optik dapat dipahami lebih mendalam.

3.5.2 Analisis Kinerja Sel Surya

Pengukuran arus-tegangan (I–V) dilakukan menggunakan *solar simulator standard* AM 1.5G dengan intensitas 1000 W/m². Dari kurva I–V, diperoleh parameter kinerja utama yaitu tegangan sirkuit terbuka (Voc), kepadatan arus *short-circuit* (Jsc), faktor pengisian (FF), dan efisiensi konversi daya (PCE). Nilai efisiensi (*Power Conversion Efficiency*) dihitung menggunakan persamaan 3.1. Melalui analisis ini, performa keseluruhan sel surya perovskite dapat dievaluasi secara kuantitatif, sehingga hubungan antara variasi ketebalan lapisan aktif dengan efisiensi konversi energi dapat dipelajari lebih lanjut.

$$PCE = \frac{V_{oc} \times J_{sc} \times FF}{P_{in}} \times 100\% \quad (3.1)$$

3.5.3 Analisis *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Karakterisasi morfologi lapisan perovskite CsPbIBr₂ dilakukan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Sampel dengan variasi deposisi 3 tetes dipreparasi dalam konfigurasi *cross-sectional* untuk mengamati ketebalan lapisan, homogenitas, dan struktur antarmuka secara detail. Gambar *SEM* penampang melintang (*cross-sectional SEM*) dianalisis menggunakan perangkat lunak ImageJ untuk mengukur ketebalan lapisan. Pengukuran dilakukan pada tiga titik berbeda untuk mendapatkan nilai rata-rata.