

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Perovskit Solar Cell (PSC)

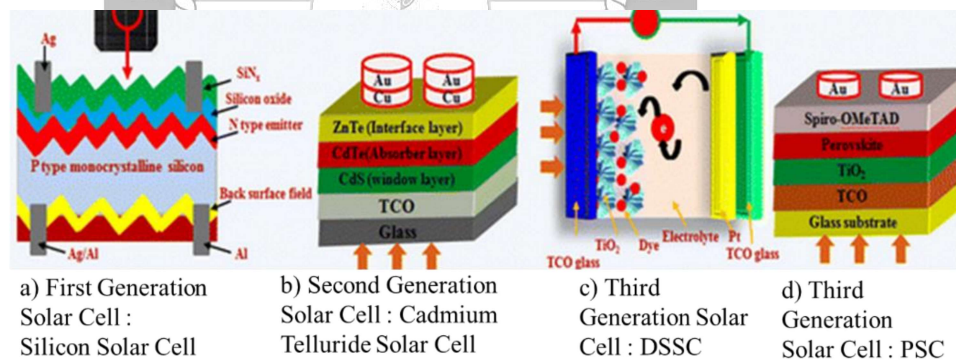
Perovskite Solar Cell (PSC) adalah salah satu teknologi sel surya generasi ketiga yang saat ini banyak diteliti karena potensinya sebagai perangkat fotovoltaik masa depan. Teknologi ini menggunakan material perovskit halida dengan struktur kristal ABX_3 sebagai lapisan penyerap cahaya. Beberapa keunggulan perovskit meliputi koefisien penyerapan yang sangat tinggi, panjang difusi muatan yang besar, serta celah pita yang dapat diatur (Lee dkk., 2022; Stranks dkk., 2013). Keunggulan ini membuka peluang untuk menghasilkan sel surya dengan efisiensi tinggi dan biaya produksi yang lebih rendah dibandingkan teknologi berbasis silikon.

Sejarah perkembangan teknologi fotovoltaik bermula dari penemuan efek fotovoltaik oleh Becquerel pada abad ke-19. Temuan ini diwujudkan lebih lanjut oleh Bell Laboratories pada tahun 1954 melalui pembuatan sel surya silikon monokristalin pertama, dengan efisiensi sekitar 6% (Budi Rudiyanto et al., 2023). Seiring waktu, teknologi ini berkembang pesat hingga mencapai efisiensi 26,81% (Green, 2023). Namun, meskipun menawarkan efisiensi tinggi, sel surya generasi pertama berbasis silikon memiliki biaya produksi yang sangat mahal dan keterbatasan material (Nursam, 2024).

Selanjutnya, generasi kedua sel surya muncul dengan menggunakan material seperti cadmium telluride (CdTe) dan copper indium gallium selenide (CIGS), yang mencapai efisiensi hingga 22,1% dan 23,4% (Nursam, 2024). Meskipun demikian, kedua material ini juga menghadapi tantangan berupa ketersediaan bahan baku yang terbatas dan isu lingkungan.

Momentum besar terjadi dengan lahirnya sel surya generasi ketiga, diawali oleh pengembangan dye-sensitized solar cell (DSSC) oleh Brian O'Regan dan Michael Grätzel pada tahun 1991. DSSC memperkenalkan konsep material hibrida dan berhasil mencapai efisiensi 7,1% (Michael Grätzel, 2001), kemudian terus berkembang hingga mencapai 15,20% (Rendek, 2023).

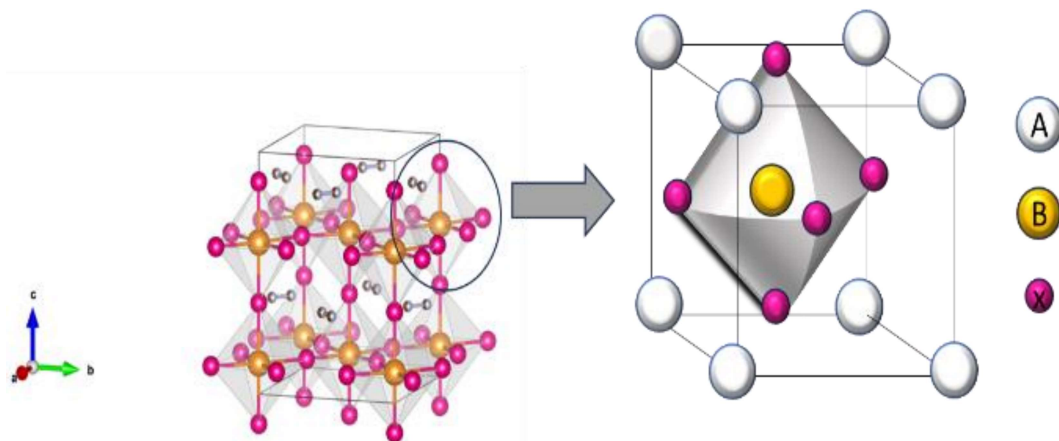
Perkembangan selanjutnya yang revolusioner adalah pengenalan material perovskit oleh Kojima et al. (2009) sebagai absorber pada sel surya, dengan efisiensi awal sebesar 3,8%. Hanya dalam waktu satu dekade, efisiensinya meningkat pesat hingga mencapai 25,73% (Park dkk., 2023). Struktur dan kemajuan ketiga generasi sel surya dapat dilihat secara visual pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 menunjukkan evolusi dari sel surya silikon (generasi pertama), CdTe dan CIGS (generasi kedua), hingga DSSC dan PSC (generasi ketiga

Sumber: (Suthar dkk., 2022)

Perovskit sendiri memiliki sifat optoelektronik yang luar biasa, termasuk koefisien serapan tinggi, stabilitas relatif, dan ketahanan terhadap cacat struktural (W. Li et al., 2022). Struktur ABX_3 terdiri dari kation organik (seperti Cs^+ , metilamonium, atau formamidinium) di situs A, kation logam (seperti Pb^{2+} atau Sn^{2+}) di situs B, dan anion halida (seperti I^- , Cl^- , atau Br^-) di situs X (Watthage dkk., 2018). Struktur detailnya dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Struktur Perovskit

Sumber: (Watthage dkk., 2018).

Dalam mekanisme kerja PSC, perovskit berfungsi sebagai lapisan absorber, sedangkan elektron dan lubang hasil eksitasi akan ditransfer masing-masing menuju electron transport layer (ETL) dan hole transport layer (HTL). Aliran muatan ini difasilitasi oleh perbedaan energi pita (band alignment) antar lapisan, sehingga memungkinkan pembangkitan arus listrik (Suresh Kumar & Chandra Babu Naidu, 2021).

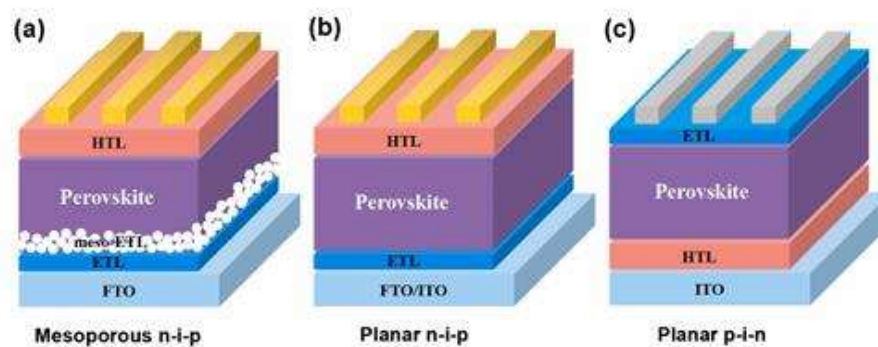
Pada desain tertentu, PSC dapat berfungsi tanpa HTL, di mana elektroda lawan seperti karbon mengambil peran dalam mengumpulkan lubang. Hal ini semakin membuka peluang untuk produksi PSC yang lebih murah dan tahan lama.

2.1.2 Mesoscopic Perovskite Solar Cells (MPSCs)

Mesoscopic Perovskite Solar Cells (MPSCs) merupakan salah satu bentuk pengembangan dari struktur dasar Perovskite Solar Cells (PSC). Dalam MPSCs, lapisan perovskit disusun di atas kerangka berpori (mesopori) yang berfungsi sebagai perancah untuk mendukung pertumbuhan dan distribusi perovskit secara optimal. Struktur ini membantu meningkatkan transportasi muatan sekaligus memperbaiki efisiensi perangkat (Snaith, 2013).

Berdasarkan struktur mikroskopisnya, sel surya perovskit dapat diklasifikasikan menjadi dua tipe utama, yaitu struktur mesoskopik

(mesoporous) dan struktur planar. Struktur planar sendiri dibagi lagi menjadi planar n-i-p dan planar p-i-n. Perbedaan antara ketiganya dapat dilihat pada Gambar 2.3, yang memperlihatkan struktur sel surya perovskit, yaitu (a) Mesoporous n-i-p, (b) Planar n-i-p, dan (c) Planar p-i-n (Qiu dkk., 2022).



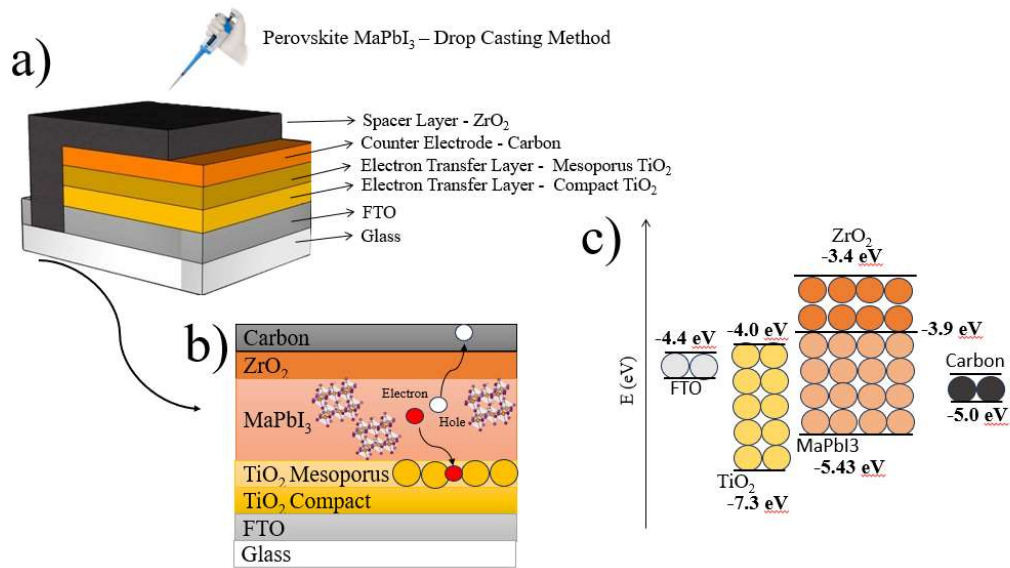
Gambar 2.3 Struktur Sel Surya Perovskit (a) Mesoporus n-i-p, (b) *Planar* n-i-p, dan (c) *Planar* p-i-n.

Sumber: (Qiu dkk., 2022)

Dalam struktur mesoskopik, metode screen printing sering digunakan untuk membentuk lapisan berpori, yang selanjutnya berfungsi sebagai tempat pertumbuhan kristal perovskit. Selain itu, elektroda lawan berbahan karbon banyak digunakan untuk menggantikan logam mulia seperti emas atau perak, dengan tujuan menekan biaya produksi dan mempercepat skala komersialisasi (Ming dkk., 2024). Material karbon dipilih karena tidak hanya murah dan melimpah di alam, tetapi juga menawarkan konduktivitas listrik yang baik serta ketahanan terhadap oksidasi, sehingga menjadi alternatif efektif untuk elektroda lawan.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa karbon sebagai elektroda lawan dalam MPSCs memiliki stabilitas yang tinggi dan dapat difabrikasi menggunakan metode berkelanjutan seperti screen printing (Chan dkk., 2016; Mei dkk., 2014; Tsai dkk., 2017). Salah satu penelitian yang cukup berpengaruh dilakukan oleh Duan et al. (2017), yang melaporkan efisiensi konversi daya sebesar 6,64% pada struktur $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2/\text{C}$. Perkembangan lebih lanjut menunjukkan bahwa PCE MPSCs berbasis karbon bahkan telah mencapai 22,22% (Ming dkk., 2024).

Struktur detail dari MPSCs ditampilkan pada Gambar 2.4, yang menggambarkan (a) struktur MPSCs sebelum proses dropcasting perovskit, (b) struktur saat cahaya masuk ke dalam perangkat, serta (c) diagram band alignment yang menunjukkan jalur pergerakan muatan dalam sel surya perovskit berbasis mesoskopik (Kajal dkk., 2021).



Gambar 2.4 (a) Struktur MPSCs Sebelum *Dropcasting* Perovskit dan (b) Struktur MPSCs Saat Cahaya Masuk, (c) Band Alignment dari MPSCs.

Sumber: (Kajal dkk., 2021)

2.1.3 Material Lapisan Pemisah

Lapisan pemisah dalam Mesoscopic Perovskite Solar Cells (MPSCs) berfungsi sebagai penghalang antara lapisan Electron Transport Layer (ETL) dan elektroda lawan berbahan karbon. Peran utamanya adalah untuk mencegah terjadinya arus pendek, yang dapat menurunkan efisiensi dan stabilitas perangkat secara keseluruhan.

Material yang umum digunakan sebagai lapisan pemisah adalah zirconium oksida (ZrO_2) atau zirkonia. Zirkonia merupakan kristal putih yang secara alami dapat muncul dalam berbagai warna seperti kuning, merah, atau coklat tergantung pada kondisi lingkungan saat pembentukannya. Material ini banyak digunakan dalam bidang optoelektronik karena memiliki

sifat fisik dan kimia yang unggul, seperti celah pita besar sekitar 5 eV yang memberikan transparansi optik sangat baik (Zhang C dkk., 2009). Selain itu, zirkonia memiliki konstanta dielektrik yang tinggi serta ketahanan terhadap suhu tinggi, menjadikannya ideal sebagai material isolator dalam perangkat sel surya (Wang X dkk., 2013).

Dalam struktur MPSCs, lapisan zirkonia biasanya diletakkan di antara lapisan ETL (seperti TiO_2) dan elektroda karbon. Konfigurasi ini bertujuan untuk menjaga stabilitas lapisan perovskit di atasnya serta menghindari kontak langsung antara elektroda karbon dengan ETL yang dapat menyebabkan korsleting.

Penelitian yang dilakukan oleh (Ku dkk., 2013) menunjukkan bahwa penggunaan pasta ZrO_2 dengan ketebalan sekitar 1 mm dapat menghasilkan perangkat dengan V_{oc} sebesar 0,878 V, J_{sc} sebesar 13,4 mA/cm^2 , fill factor 0,61, dan efisiensi konversi daya (PCE) sebesar 6,64%. Selain itu, (Liu dkk., 2019) meneliti pengaruh ukuran partikel dalam pasta zirkonia terhadap morfologi lapisan pemisah. Mereka menemukan bahwa partikel yang terlalu kecil (5–10 nm) cenderung menghasilkan lapisan yang retak, sedangkan partikel berukuran 20–60 nm menghasilkan film yang lebih seragam dan bebas cacat. Efisiensi perangkat meningkat secara signifikan ketika menggunakan partikel berukuran optimum, dengan PCE mencapai 11,86%.

Lebih lanjut, (Liu dkk., 2017) mengembangkan teknik pembuatan lapisan pemisah ultra-flat dengan menggunakan pasta $\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2$ yang sangat terdispersi. Pendekatan ini menghasilkan lapisan tanpa retakan dan meningkatkan rata-rata efisiensi perangkat dari 10,2% menjadi 12,5%, bahkan mencapai 13,8% untuk perangkat terbaik.

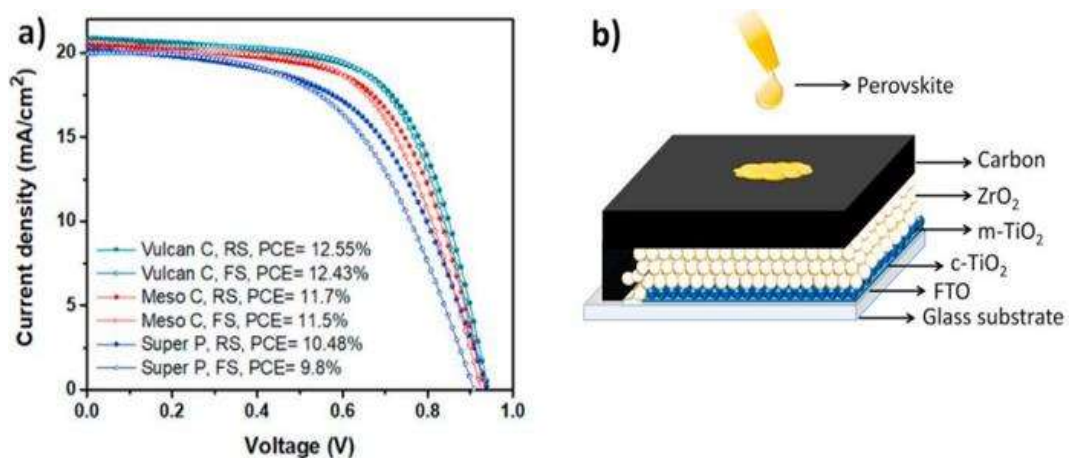
Berdasarkan berbagai studi tersebut, dapat disimpulkan bahwa kualitas morfologi dan ketebalan lapisan pemisah memainkan peran kunci dalam menentukan performa akhir perangkat MPSCs. Oleh karena itu, pemilihan material, ukuran partikel, dan metode fabrikasi menjadi faktor yang sangat penting dalam pengembangan teknologi ini.

2.1.4 Material Karbon sebagai Elektroda Lawan

Elektroda lawan dalam Mesoscopic Perovskite Solar Cells (MPSCs) berfungsi sebagai tempat pengumpulan lubang (hole) sekaligus jalur akhir bagi aliran muatan ke sirkuit eksternal. Awalnya, logam mulia seperti emas (Au) dan perak (Ag) digunakan sebagai elektroda lawan karena memiliki konduktivitas listrik yang tinggi. Namun, biaya tinggi serta kebutuhan proses fabrikasi dalam lingkungan vakum menjadi hambatan utama dalam komersialisasi teknologi ini (Hossain dkk., 2019).

Untuk mengatasi kendala tersebut, penggunaan material karbon sebagai elektroda lawan menjadi pilihan alternatif yang menarik. Karbon menawarkan berbagai keunggulan, di antaranya harga yang jauh lebih murah, ketersediaan bahan yang melimpah di alam, stabilitas elektrokimia yang tinggi, serta kemudahan dalam proses fabrikasi seperti metode cetak sederhana tanpa memerlukan vakum (Que dkk., 2021). Selain itu, penggunaan karbon memungkinkan desain perangkat tanpa lapisan hole transport layer (HTL), sehingga tidak hanya menyederhanakan struktur perangkat, tetapi juga mengurangi biaya produksi dan mempercepat proses manufaktur.

Penelitian oleh (Kajal dkk., 2021) menunjukkan bahwa variasi komposisi pasta karbon berpengaruh besar terhadap performa MPSCs. Dalam studi tersebut, tiga jenis elektroda karbon, yaitu VC, MC, dan SP, diuji dengan hasil efisiensi konversi daya (PCE) masing-masing sebesar 12,55% untuk VC, 11,76% untuk MC, dan 10,48% untuk SP. Grafik hubungan arus terhadap tegangan ($J-V$) untuk ketiga jenis karbon tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.5(a), sedangkan struktur perangkat MPSCs yang digunakan dalam penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 2.5(b) (Kajal dkk., 2021).



Gambar 2.5 (a) Gravitik J-V dan (b) Struktur MPSCs penelitian yang dilakukan Kaja.

Sumber: (Kaja dkk., 2021)

Selain itu, Ku et al. (2013b) melaporkan efisiensi sebesar 6,6% hanya dengan menggunakan elektroda karbon sederhana. Dengan pengembangan metode doctor-blading, efisiensi perangkat berbasis karbon kemudian meningkat hingga 8,31% dan 9% pada penelitian selanjutnya (Ku dkk., 2013; Xiang dkk., 2023). Perkembangan terbaru menunjukkan bahwa perangkat MPSCs berbasis karbon kini mampu mencapai efisiensi konversi daya hingga 19,2% (Zhang dkk., 2018).

Keberhasilan ini menunjukkan bahwa material karbon tidak hanya menjadi alternatif yang lebih ekonomis dibandingkan logam mulia, tetapi juga mampu menawarkan performa kompetitif. Hal ini memperkuat potensi teknologi MPSCs berbasis karbon dalam mendukung produksi energi terbarukan yang berkelanjutan.

2.1.5 Karakterisasi Arus dan Tegangan (J-V)

Karakterisasi arus-tegangan (J-V) merupakan metode utama untuk mengevaluasi kinerja perangkat sel surya, termasuk Mesoscopic Perovskite Solar Cells (MPSCs). Pengujian ini bertujuan untuk menggambarkan hubungan antara arus (J) yang dihasilkan oleh perangkat terhadap tegangan (V) yang diberikan, sehingga dapat menentukan

parameter-parameter kunci dalam menilai performa sel surya (Dharmadasa dkk., 2019).

Dalam karakterisasi J–V, terdapat beberapa parameter penting yang dianalisis. Short-circuit current density (J_{sc}) mengukur arus maksimum yang dihasilkan saat kedua elektroda dihubungkan langsung tanpa hambatan. Nilai J_{sc} secara teoretis dapat dihitung melalui hubungan integral antara spektrum cahaya yang masuk dan efisiensi kuantum eksternal sebagai berikut:

$$J_{sc} = \int_{\lambda} \phi(\lambda) \times EQE(\lambda) d\lambda \quad (2.1)$$

$EQE(\lambda)$ adalah efisiensi kuantum eksternal (Konrad Mertens, 2015).

Open-circuit voltage (V_{oc}) menunjukkan tegangan maksimum yang dapat diperoleh ketika tidak ada arus yang mengalir, mencerminkan perbedaan tingkat energi antara lapisan pembawa muatan di dalam perangkat. V_{oc} secara teoretis dihitung melalui persamaan:

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{I_0} + 1\right) \quad (2.2)$$

dengan n adalah faktor idealitas, k adalah konstanta Boltzmann, T adalah suhu mutlak, q adalah muatan elektron, I adalah arus yang dihasilkan oleh cahaya, dan I_0 adalah arus saturasi balik dari perangkat (Konrad Mertens, 2015).

Fill factor (FF) menggambarkan rasio antara daya maksimum yang dapat dihasilkan dengan hasil perkalian J_{sc} dan V_{oc} . Nilai FF dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$FF = \frac{V_{mpp} \times J_{mpp}}{V_{oc} \times J_{sc}} \quad (2.3)$$

masing-masing merupakan tegangan dan arus pada titik daya maksimum (Politeknik & Lhokseumawe, 2019).

Parameter yang paling mencerminkan efisiensi konversi perangkat adalah power conversion efficiency (PCE). Nilai PCE dihitung dengan membandingkan daya maksimum perangkat terhadap daya sumber cahaya yang digunakan melalui persamaan:

$$\eta \text{ (PCE)} = \frac{P_{\max}}{P_{\text{source}}} \quad (2.4)$$

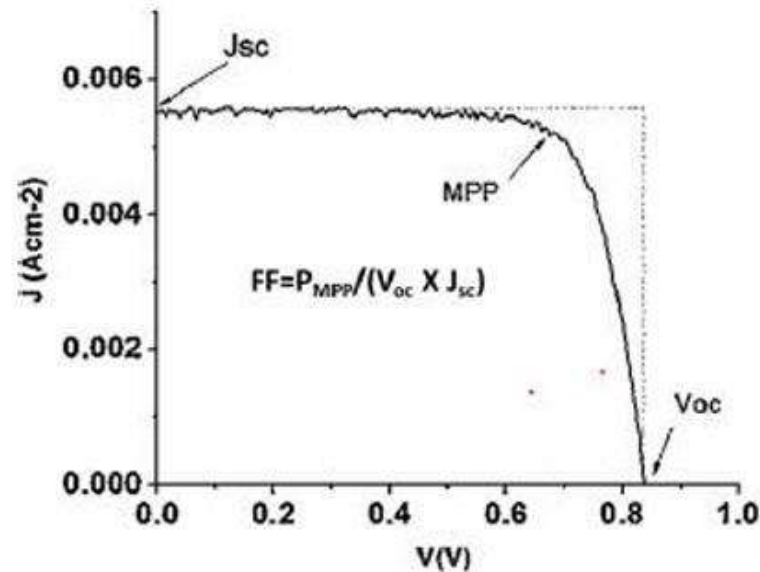
atau, dengan memasukkan nilai J_{sc} , V_{oc} , dan FF, dirumuskan sebagai:

$$\eta \text{ (PCE)} = \frac{J_{\text{sc}} \times V_{\text{oc}} \times \text{FF}}{P_{\text{source}}} \quad (2.5)$$

(Konrad Mertens, 2015)

Pengukuran J-V menghasilkan grafik hubungan arus terhadap tegangan. Bentuk kurva ini memberikan informasi penting tentang kualitas dan kinerja perangkat. Kurva J-V yang berbentuk lebih kotak menunjukkan bahwa perangkat memiliki fill factor yang tinggi dan performa konversi energi yang lebih baik. Sebaliknya, kurva yang lebih melengkung menunjukkan adanya resistansi internal tinggi atau masalah rekombinasi muatan yang signifikan. Gambar 2.6 memperlihatkan bentuk umum dari kurva J-V pada perangkat sel surya, yang mencakup titik-titik penting seperti short-circuit current density (J_{sc}), open-circuit voltage (V_{oc}), dan titik daya maksimum ($P_{\max}$) (Pazoki dkk., 2017).

Dengan demikian, melalui analisis karakterisasi J–V, dapat diperoleh informasi komprehensif mengenai performa keseluruhan perangkat sel surya. Pengujian ini menjadi landasan penting dalam mengevaluasi keberhasilan fabrikasi, mengidentifikasi masalah teknis, serta mengoptimasi desain struktur MPSCs.



Gambar 2.6 Karakterisasi J-V.

Sumber: (Pazoki dkk., 2017)

2.1.6 Karakterisasi IPCE

Karakterisasi *Incident Photon-to-Current Efficiency* (IPCE) adalah metode penting dalam menganalisis kinerja perangkat sel surya. IPCE mengukur seberapa efektif perangkat mengubah foton yang jatuh ke permukaannya menjadi arus listrik pada panjang gelombang tertentu (Chen dkk., 2013).

Dalam prinsip dasarnya, IPCE menunjukkan rasio antara jumlah elektron yang dihasilkan dengan jumlah foton yang diserap. Semakin tinggi nilai IPCE pada panjang gelombang tertentu, semakin efektif perangkat tersebut dalam menangkap energi cahaya pada rentang spektrum tersebut.

Dalam pengujian, arus foto dari perangkat diukur seiring perubahan panjang gelombang cahaya yang jatuh. Nilai IPCE dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{IPCE}(\lambda) = \eta_{lh}(\lambda) \eta_{inj}(\lambda) \eta_{col}(\lambda) \quad (2.6)$$

Keterangan :

$\eta_{lh}(\lambda)$: Efisiensi penyerapan cahaya (Light Harvesting Efficiency)

$\eta_{inj}(\lambda)$: Efisiensi injeksi muatan (Charge Injection Efficiency)

$\eta_{col}(\lambda)$: Efisiensi pengumpulan muatan (Charge Collection Efficiency)

Selain mengukur efisiensi perangkat secara spektral, IPCE juga sering digunakan untuk memperkirakan nilai celah pita (*band gap*) dari material perovskit. Celah pita yang diperoleh dari pengukuran IPCE biasanya lebih akurat dibandingkan metode spektroskopi biasa (Chen dkk., 2013).

Grafik hasil pengukuran IPCE biasanya menunjukkan kurva efisiensi terhadap panjang gelombang, memberikan informasi mengenai rentang spektral di mana perangkat bekerja paling optimal.

Dengan demikian, karakterisasi IPCE menjadi alat penting untuk memahami tidak hanya seberapa efisien perangkat menangkap cahaya, tetapi juga kualitas spektral respons perangkat terhadap sumber cahaya alami seperti matahari.

2.1.7 Karakterisasi Four Point Probe (FPP)

Four Point Probe (FPP) merupakan metode yang digunakan untuk mengukur resistivitas listrik suatu material, khususnya material tipis seperti film semikonduktor, logam tipis, atau elektroda karbon (Warembra & Betaubun, 2018). Teknik ini sangat penting dalam penelitian Mesoscopic Perovskite Solar Cells (MPSCs) karena dapat memberikan informasi mengenai kualitas penghantaran listrik pada lapisan elektroda yang digunakan. Prinsip dasar dari FPP melibatkan empat buah jarum probe kecil yang disusun sejajar dan diletakkan secara langsung di atas permukaan sampel. Dalam proses pengujian, dua probe yang berada di bagian luar digunakan untuk mengalirkan arus listrik ke dalam material, sedangkan dua probe di bagian dalam berfungsi untuk mengukur beda potensial (tegangan) yang timbul akibat aliran arus tersebut. Penggunaan empat probe secara terpisah ini bertujuan untuk mengeliminasi pengaruh resistansi kontak antara probe dan sampel, sehingga hasil pengukuran resistivitas yang diperoleh menjadi lebih akurat dan representatif terhadap sifat intrinsik material.

Persamaan dasar untuk menghitung resistivitas (ρ) pada material bulk (sampel tebal) adalah:

$$\rho = 2\phi s \frac{V}{I} \quad (2.7)$$

Keterangan:

ρ = Resistivitas material ($\Omega \cdot \text{cm}$),

ϕs = Jarak antar probe,

V = Tegangan terukur,

I = Arus yang dialirkan.

Untuk material film tipis (thin sheet) di mana ketebalan lebih kecil dari jarak antar probe, digunakan koreksi tertentu sehingga rumus menjadi:

$$\rho = \left(\frac{\phi t}{\ln 2} \right) \left(\frac{V}{I} \right) \quad (2.8)$$

dengan ϕt sebagai ketebalan lapisan.

Dari resistivitas (ρ), konduktivitas (σ) dapat dihitung dengan persamaan:

$$\sigma = \left(\frac{1}{\rho} \right) \quad (2.9)$$

Pengukuran FPP sangat berguna dalam karakterisasi lapisan karbon di MPSCs. Dengan mengetahui resistivitas atau konduktivitas lapisan elektroda, dapat diprediksi bagaimana kemampuan material dalam mengalirkan arus listrik, yang tentunya berpengaruh terhadap efisiensi keseluruhan perangkat.

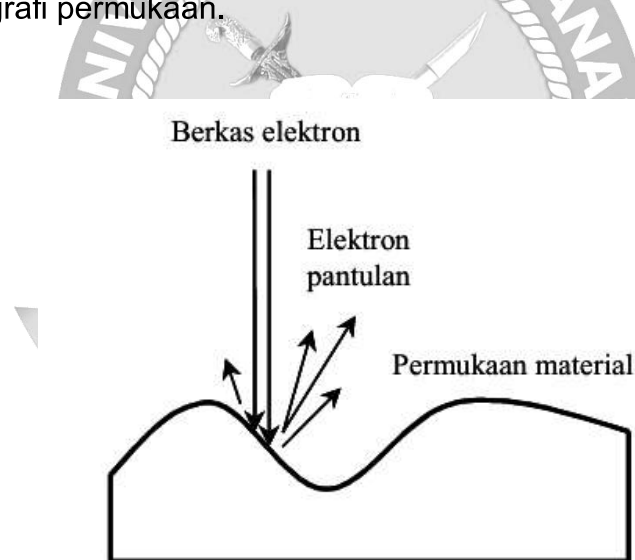
Proses pengukuran dilakukan dengan meletakkan probe secara hati-hati di atas permukaan material, kemudian mengalirkan arus konstan dan mencatat nilai tegangan yang muncul. Hasil perhitungan ini kemudian digunakan untuk mengevaluasi kualitas material karbon atau lapisan konduktif lainnya.

2.1.8 Karakterisasi SEM (Scanning Electron Microscopy)

Scanning Electron Microscopy (SEM) adalah teknik karakterisasi material yang digunakan untuk mengamati morfologi permukaan dengan resolusi sangat tinggi. Dalam konteks Mesoscopic Perovskite Solar Cells

(MPSCs), SEM sangat penting untuk menganalisis kualitas lapisan-lapisan seperti lapisan separator maupun elektroda karbon.

Prinsip kerja SEM melibatkan penembakan berkas elektron berenergi tinggi ke permukaan sampel. Ketika berkas ini mengenai permukaan, berbagai jenis sinyal dihasilkan, termasuk elektron sekunder dan elektron balik, yang kemudian digunakan untuk membentuk citra detail dari permukaan material (Mikrajuddin Abdullah & Khairurrijal, 2009). Gambar 2.7 menunjukkan prinsip dasar bagaimana SEM bekerja, di mana intensitas sinyal dikumpulkan untuk membangun representasi tiga dimensi dari topografi permukaan.



Gambar 2.7 Prinsip Kerja SEM.

Sumber: (Mikrajuddin Abdullah & Khairurrijal, 2009)

Beberapa keunggulan utama Scanning Electron Microscopy (SEM) dibandingkan dengan mikroskop optik biasa terletak pada kemampuannya menghasilkan citra dengan resolusi yang sangat tinggi. Hal ini dimungkinkan karena SEM memanfaatkan panjang gelombang elektron yang jauh lebih pendek dibandingkan cahaya tampak. Selain itu, SEM memiliki kedalaman fokus yang lebih baik, sehingga mampu menghasilkan gambar yang lebih tajam, terutama pada permukaan yang tidak rata.. Meski demikian, untuk mendapatkan citra yang optimal, khususnya pada material non-konduktif, permukaan sampel umumnya perlu dilapisi dengan bahan

konduktif seperti emas atau karbon tipis. Lapisan ini berfungsi mencegah akumulasi muatan listrik di permukaan yang dapat mengganggu hasil pencitraan. Dalam penelitian ini, karakterisasi SEM digunakan untuk menganalisis ketebalan dan kerapatan lapisan separator, mengamati tekstur serta homogenitas lapisan elektroda karbon, serta menilai keberadaan retakan atau porositas yang dapat memengaruhi performa perangkat. Melalui pendekatan ini, diperoleh pemahaman visual yang mendalam mengenai kualitas struktur mikro dari perangkat Mesoscopic Perovskite Solar Cells (MPSCs) yang dikembangkan.

2.1.9 Karakterisasi XRD

X-ray Diffraction (XRD) merupakan metode karakterisasi material yang digunakan untuk menganalisis struktur kristal, mengidentifikasi fasa, menentukan orientasi kristal, dan menghitung ukuran kristalit suatu bahan. Dalam penelitian Mesoscopic Perovskite Solar Cells (MPSCs), XRD sangat penting untuk memastikan pembentukan kristal perovskit yang baik serta untuk mengevaluasi kualitas lapisan lainnya seperti ZrO_2 .

Prinsip kerja XRD didasarkan pada hukum Bragg, yang menyatakan bahwa difraksi terjadi ketika sinar-X mengenai bidang-bidang kristal dengan sudut tertentu sehingga terjadi interferensi konstruktif. Hubungan ini dinyatakan dalam persamaan:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (2.10)$$

di mana:

n = orde difraksi,

λ = panjang gelombang sinar-X,

d = jarak antar bidang kristal,

θ = sudut difraksi (Fatimah dkk., 2021).

Setiap material kristalin memiliki pola difraksi unik, yang dikenal sebagai *fingerprint*. Puncak-puncak pada pola XRD diidentifikasi berdasarkan indeks Miller (hkl), yang menunjukkan orientasi bidang kristal tertentu. Identifikasi ini biasanya dibandingkan dengan basis data seperti JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards).

Dalam analisis X-ray Diffraction (XRD), terdapat beberapa aspek utama yang menjadi perhatian. Pertama, identifikasi fasa dilakukan dengan mencocokkan posisi dan intensitas puncak difraksi untuk menentukan jenis fasa kristal yang terbentuk dalam sampel. Selanjutnya, kristalinitas material dapat diinterpretasikan dari bentuk puncak difraksi; puncak yang tajam menunjukkan tingkat kristalinitas yang tinggi, sementara puncak yang melebar menandakan keberadaan material amorf atau kristalit dengan ukuran yang sangat kecil (Fatimah dkk., 2021). Selain itu, ukuran kristalit juga dapat dihitung secara kuantitatif menggunakan persamaan Scherrer, yang menghubungkan lebar puncak difraksi dengan dimensi rata-rata kristalit.

$$D = \left(\frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \right) \quad (2.11)$$

di mana:

D = ukuran kristalit,

K = konstanta Scherrer (sekitar 0,9),

λ = panjang gelombang sinar-X,

β = lebar puncak pada setengah intensitas maksimum (FWHM) dalam radian,

θ = sudut difraksi.

Melalui karakterisasi XRD, informasi struktural yang diperoleh akan membantu memastikan bahwa material yang digunakan dalam MPSCs telah membentuk fasa dan ukuran kristal yang optimal untuk mendukung performa perangkat.

2.2 Hasil Penelitian Terdahulu

Pada subbab ini akan dijabarkan lima penelitian terdahulu yang menjadi referensi dalam pembuatan MPSCs, dimana dalam penelitian ini akan melakukan fabrikasi MPSCs dengan variasi *spacer layer* dan variasi pasta karbon disertai karakterisasi material dan performanya yang sangat memerlukan referensi penelitian sebelumnya mengenai penelitian-penelitian terkait struktur MPSCs, metode deposisi dan ukuran lapisan pemisah ZrO_2 , pelapisan c-TiO_2 , penggunaan karbon sebagai elektroda lawan pada MPSCs, serta penelitian terkait lainnya yang dapat dilihat lebih rinci pada tabel 2.1

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

Referensi	Metode	Keterangan	Hasil	Korelasi dengan Penelitian
(Dileep dkk., 2019)	Melakukan eksperimen dengan penyajian karbon pasta dan ZrO_2 yang dikomposisikan sendiri yang dilanjutkan dengan fabrikasi device PSC dan diakhiri pengukuran karakterisasi FE-SEM, FPP, XRD, dan BET.	Penggunaan karbon sebagai elektroda lawan untuk tanpa dengan berat 3:7 antara karbon dan grafit yang dipakai untuk karbon.	- Penggunaan PSC menggunakan elektroda karbon menunjukkan performa yang baik pada nilai V_{oc} dan J_{sc} dibandingkan PSC konvensional. - Penggunaan elektroda karbon pada PSC menunjukkan stabilitas yang lebih baik dibandingkan PSC konvensional. - Nilai R_s pada <i>Carbon-based</i> PSC menjadi yang tertinggi dengan nilai 384.1Ω dibandingkan dengan PSC konvensional 86.3Ω.	Pada penelitian ini memiliki pemahaman tentang komposisi dan stabilitas elektroda karbon, sehingga dapat mendorong desain PSC karbon yang lebih optimal pada pembuatan MPSCs yang akan dilakukan.

(Liu dkk., 2019)	Melakukan pengujian lapisan pemisah ZrO_2 dengan rata-rata ukuran yang berbeda, terdiri dari ukuran 5nm, 10nm, 20nm, 60nm, dan 100nm untuk dilakukan karakterisasi SEM, TEM, dan XRD dan juga diterapkan pada PSC untuk melihat pengaruhnya atas diterapkan pada PSC.	Melihat karakterisasi material pemisah ZrO_2 dengan 5 variasi ukuran yang berbeda dan juga melihat pengaruhnya pada PSC.	• Pada hasil SEM yang dilakukan diketahui bahwa pada ZrO_2 berukuran 20nm dan 60nm memiliki ukuran yang seragam. Sedangkan yang berukuran 5nm, 10nm, dan 100nm memiliki retak pada strukturnya . • Pada hasil XRD diketahui ukuran perovskit pada masing-masing uuran secara berturut turut dari yang terkecil hingga terbesar yaitu 4.3 nm, 3.9 nm, 6.2 nm, 11.5 nm, and 12.6 nm. • Pada penerapan pemisah pada PSC diketahui bahwa PSC yang menggunakan lapisan pemisah berukuran 20 nm memiliki PCE terbaik dengan persentase 11.86% yang bila dibandingkan tanpa lapisan pemisah memiliki persentase 6.52%.	Penelitian ini memberikan data penting tentang ukuran partikel ZrO_2 yang optimal dalam fokus variasi jenis material pemisah fabrikasi MPSCs. Penelitian ini juga menunjukkan lapisan pemisah dengan ZrO_2 dapat meningkatkan efisiensi PSC.
------------------	--	---	---	---

(Ku dkk., 2013)	Melakukan fabrikasi pada Mesoskopik PSC tanpa HTL dengan struktur FTO/TiO ₂ /ZrO ₂ /Carbon/M APBI ₃ .	Pembuatan PSC mesoskopik tanpa HTL pertama kali.	• Didapat nilai PCE dari Mesoscopic PSC dengan struktur tersebut sebesar 6.64% • Penggunaan Mesoskopik PSC tanpa menggunakan HTL yang langsung dilapisi karbon terbukti dapat diterapkan. • Dengan membandingkan PSC jenis grafit yang berbeda pada karbonnya yaitu <i>flaky graphite</i> dan <i>spheroidal graphite</i> ditemukan bahwa <i>spheroidal graphite</i> lebih baik dari segi performa dan nilai IPCE-nya.	Penelitian ini menunjukkan bahwa jenis dan rasio material elektroda karbon sangat mempengaruhi performa PSC dan membuktikan potensi struktur PSC tanpa HTL dengan lapisan pemisah berbasis ZrO₂. Bahwa dengan menghilangkan HTL dapat meningkatkan stabilitas perangkat. Hal ini yang akan diterapkan pada pembuatan MPSCs.
-----------------	--	--	---	---

(Verma dkk., 2020)	Melakukan MPSCs dengan <i>design</i> yang diinginkan menggunakan teknik <i>inkjet</i> dan <i>screen-printing</i> .	Melakukan teknik <i>inkjet printing</i> pada MAPI dan material metal oxide, seperti TiO_2 dan ZrO_2 , serta menggabungkan nnya dengan teknik <i>screen printing</i> pada lapisan electrode karbon.	• Telah berhasil diterapkan metode deposisi <i>inkjet</i> pada MPSCs pada empat dari lima lapisan pada strukturnya, yaitu c-TiO_2, m-TiO_2, m-ZrO_2, dan MAPI. • Didapat hasil PCE dari perangkat sebesar 9,1%. • Keberhasilan dari perangkat ini tak lepas dari peran karbon yang diterapkan menggunakan karbon pasta dengan campuran 25% karbon nanopartikel dan <i>graphite flakes</i>.	Pada penelitian ini menggunakan <i>inkjet printing</i> pada seluruh deposisi lapisan, kecuali karbon yang masih menggunakan teknik <i>printing</i> . Penelitian ini juga memanfaatkan karbon sebagai elektroda lawan dengan mencampur karbon dan <i>graphite flakes</i> . Hal ini dapat menjadi evaluasi dengan membandingkannya terhadap variasi rasio CB yang akan diterapkan pada MPSCs.
--------------------	--	--	--	---

(Parida dkk., 2019)	Melakukan fabrikasi MPSCs dengan memperhatikan memvariasikannya pada lapisan TiO_2	Dilakukan fabrikasi MPSCs dengan dan tanpa lapisan c-TiO_2 untuk melihat pengaruhnya terhadap performa MPSCs.	• Didapat PCE dari MPSCs yang dibuat dengan c-TiO_2 sebesar 15,51% dan tanpa c-TiO_2 sebesar 13,21% • Lapisan c-TiO_2 terbukti sangat mempengaruhi performa dari MPSCs dikarenakan perannya yang vital dalam mentransmisikan Cahaya tampak hasil dari penyerapan dari perovskit. • Lapisan c-TiO_2 juga dapat meningkatkan resistensi rekombinasi karier dan mengurangi adanya histeris pada MPSCs.	Pada penelitian ini berfokus pada pengevaluasian struktur yang menggabungkan c-TiO_2 . Hal ini dapat diintegrasikan pada struktur MPSCs yang akan dibuat.
---------------------	---	--	---	--

Sumber: diolah oleh peneliti

2.3 Kerangka Berpikir

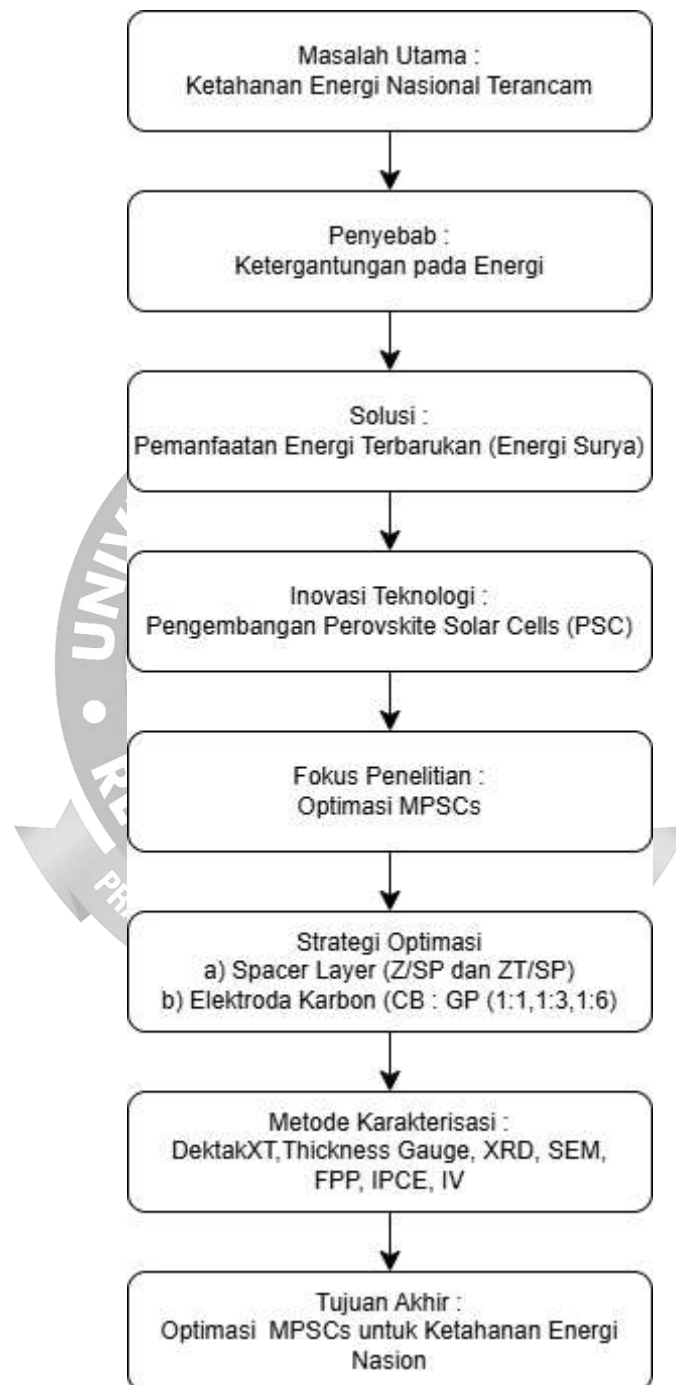
Indonesia menghadapi tantangan besar dalam mempertahankan ketahanan energi nasional akibat ketergantungan yang tinggi terhadap sumber energi fosil. Ketergantungan ini tidak hanya memperbesar risiko krisis energi, tetapi juga berdampak serius terhadap lingkungan, seperti pemanasan global dan kenaikan permukaan laut. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, transisi menuju energi terbarukan menjadi langkah strategis yang perlu segera diimplementasikan. Salah satu potensi energi terbarukan terbesar yang dimiliki Indonesia adalah energi surya, mengingat letak geografisnya yang berada di sekitar garis khatulistiwa dengan intensitas radiasi matahari yang melimpah sepanjang tahun.

Dalam upaya mendukung transisi energi tersebut, pengembangan teknologi fotovoltaik menjadi fokus utama, khususnya melalui inovasi Perovskite Solar Cells (PSC). Teknologi ini menawarkan sejumlah keunggulan, seperti efisiensi tinggi, biaya produksi rendah, serta fleksibilitas dalam struktur dan penerapannya. Penelitian ini secara khusus diarahkan pada optimalisasi performa Mesoscopic Perovskite Solar Cells (MPSCs), salah satu varian PSC yang mengandalkan struktur bertingkat untuk meningkatkan penyerapan cahaya dan mempertahankan stabilitas perangkat.

Strategi optimasi yang diterapkan dalam penelitian ini mencakup dua pendekatan utama. Pertama, melakukan variasi pada lapisan pemisah menggunakan material Zr-Nanoxide Z/SP dan Zr-Nanoxide ZT/SP, dengan tujuan meningkatkan kestabilan struktur dan mencegah kontak langsung antar lapisan yang dapat menyebabkan kebocoran arus. Kedua, mengoptimalkan komposisi elektroda karbon melalui variasi rasio carbon black (CB) dan grafit (GP), yaitu 1:1, 1:3, dan 1:6, untuk memperoleh konduktivitas dan kestabilan mekanik yang optimal.

Karakterisasi terhadap material dan performa perangkat dilakukan melalui beberapa metode, antara lain Scanning Electron Microscopy (SEM) untuk analisis morfologi, X-ray Diffraction (XRD) untuk identifikasi struktur kristal, pengukuran ketebalan untuk konsistensi lapisan, Four-Point Probe (FPP) untuk resistivitas lapisan, serta pengujian performa sel surya menggunakan current-voltage (J-V) dan incident photon-to-current efficiency (IPCE).

Seluruh alur logis penelitian ini dirangkum dalam kerangka berpikir yang ditampilkan pada Gambar 2.1, yang menggambarkan hubungan antara isu ketahanan energi nasional, potensi energi surya, inovasi teknologi PSC, hingga strategi optimasi struktur MPSCs. Dengan pendekatan ini, diharapkan dapat diperoleh konfigurasi MPSCs yang optimal dalam hal efisiensi dan stabilitas, sehingga mampu mendukung penguatan ketahanan energi nasional melalui pemanfaatan teknologi energi terbarukan.



Gambar 2.8 Kerangka Berpikir.

Sumber: diolah oleh peneliti

2.4 Hipotesis

Berikut hipotesis dalam penelitian ini :

- a) Penggunaan lapisan pemisah Zr-Nanoxide ZT/SP menghasilkan karakteristik material yang lebih baik dibandingkan Zr-Nanoxide Z/SP, sehingga mampu meningkatkan performa Mesoscopic Perovskite Solar Cells (MPSCs) yang ditinjau melalui peningkatan tegangan sirkuit terbuka (V_{oc}), kepadatan arus hubung singkat (J_{sc}), dan efisiensi konversi daya (PCE).
- b) Variasi komposisi elektroda karbon dengan rasio carbon black:grafit (CB:GP) sebesar 1:3 menghasilkan karakteristik elektroda yang lebih konduktif dan stabil dibandingkan rasio 1:1 maupun 1:6, sehingga dapat meningkatkan performa MPSCs.

