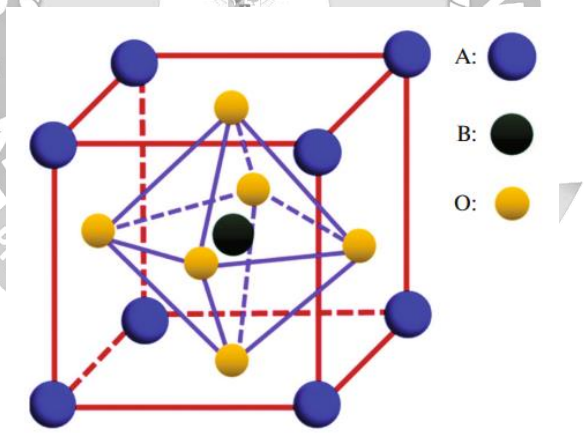
# BAB II
# TINJAUAN PUSTAKA

## 2.1 Landasan Teori

### 2.1.1 Sel Surya Perovskit

Sel surya perovskit merupakan salah satu jenis sel fotovoltaik generasi ketiga yang menjanjikan karena proses pembuatannya yang berbiaya rendah dan efisiensi tinggi. Material perovskit, yang merupakan senyawa hibrida antara unsur organik dan anorganik, berfungsi sebagai lapisan aktif penyerap cahaya dengan struktur kristal $ABX_3$, di mana A dan B adalah kation dan X adalah anion halida, seperti cesium, timbal (Pb), dan iodida ($I^-$) (Gambar 2.1).



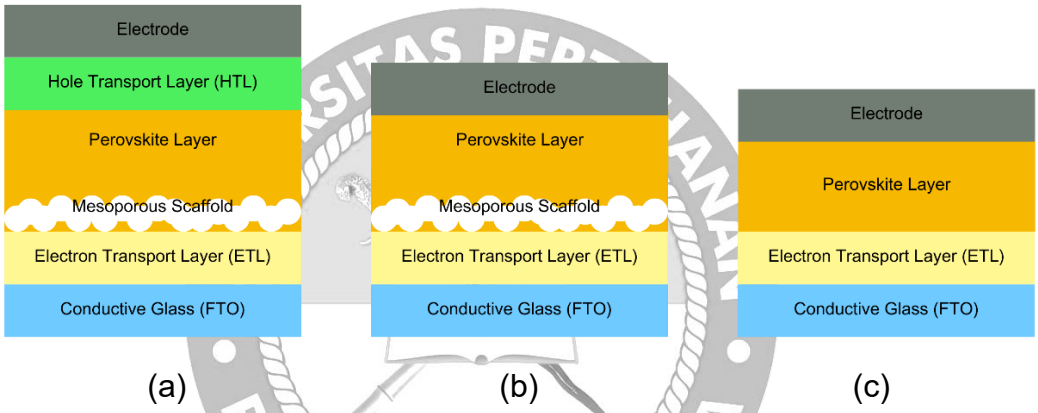

**Gambar 2.1 Struktur Kristal Perovskit**

Sumber: (Sechenykh, 2022)

Struktur ini memungkinkan konversi energi surya secara efisien dan fleksibel, bahkan dapat diaplikasikan pada permukaan kaca, dengan celah pita yang dapat disesuaikan antara 1,3 hingga 2,9 eV melalui variasi ion atau doping (Ashurov et al., 2022). Proses pembuatan sel surya perovskit relatif sederhana dan ekonomis, menggunakan metode kimia basah seperti *spin-coating* dan *screen printing* tanpa memerlukan fasilitas khusus, berbeda dengan teknologi silikon konvensional yang membutuhkan suhu tinggi dan ruang vakum (Khataee & Mansoori, 2011; Sechenykh, 2022).

#### 2.1.1.1 Struktur perangkat Sel Surya Perovskit

Struktur umum sel surya perovskit (SSP) terdiri dari lapisan kaca konduktif transparan seperti fluorine-doped tin oxide (FTO) atau indium-doped tin oxide (ITO) sebagai elektroda depan dan jalur muatan. Lapisan perovskit terjepit di antara lapisan transpor elektron (LTE) dan lapisan transpor hole (LTH) (Lamberti, 2021).




**Gambar 2.2 Struktur (a) SSP Mesoskopik, (b) SSP Mesoskopik Bebas LTH, dan (c) SSP Planar Bebas LTH**

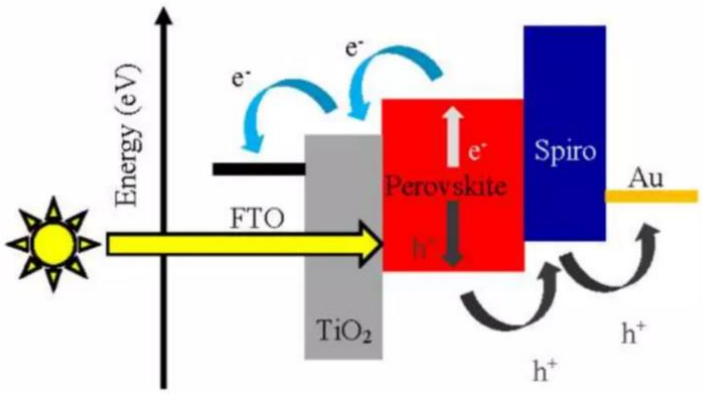
Sumber: diolah oleh peneliti

Sel surya perovskit tipe *LTH-free*, seperti pada Gambar 2.2c, menjadi fokus penelitian karena proses fabrikasinya lebih sederhana dan biaya lebih rendah. Struktur ini menggantikan material LTH mahal seperti spiro-OMeTAD dengan elektroda karbon yang berfungsi ganda sebagai LTH dan elektroda. Karbon memiliki konduktivitas baik, tahan reaksi kimia dengan perovskit, kompatibel dengan substrat fleksibel, dan mengurangi risiko degradasi dibanding elektroda logam. Selain itu, karbon mendukung sel surya yang lebih ringan, stabil, dan ramah lingkungan (Lamberti, 2021; Zhao, 2020).

#### 2.1.1.2 Prinsip Kerja Sel Surya Perovskit

Prinsip kerja sel surya perovskit dimulai saat cahaya matahari menyinari lapisan perovskit yang berfungsi sebagai bahan semikonduktor penyerap cahaya dengan *bandgap* optimal untuk spektrum cahaya tampak.

Penyerapan foton mengakibatkan eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi, membentuk pasangan elektron-hole. Pasangan muatan ini kemudian dipisahkan dan diekstraksi untuk menghasilkan arus listrik. Elektron berpindah ke pita konduksi lapisan transpor elektron, seperti $TiO_2$ (Titanium dioksida), karena posisi pita konduksi $TiO_2$ lebih rendah secara energi dibanding perovskit. Elektron bergerak melalui $TiO_2$ menuju elektroda transparan (anoda), sementara pita valensi $TiO_2$ berfungsi sebagai penghalang hole, mencegah rekombinasi muatan di antarmuka perovskit-$TiO_2$. Hole bergerak ke lapisan transpor hole seperti Spiro-OMeTAD, lalu ke elektroda belakang (katoda) (Danladi et al., 2021).



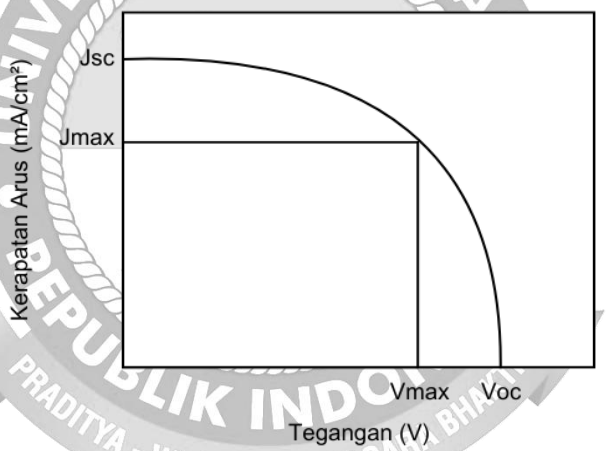

**Gambar 2.3 Prinsip Kerja Sel Surya Perovskit**

Sumber: (Danladi, 2021)

Beberapa penelitian, seperti oleh Yang (2016), mengembangkan perangkat tanpa LTH, sehingga hole langsung diangkut dari perovskit ke katoda. Pada struktur ini, perovskit berperan ganda sebagai penyerap cahaya dan konduktor hole. Posisi pita valensi $TiO_2$ yang dalam menyebabkan efek hole-blocking penting untuk menekan rekombinasi, menjaga agar hole tidak bocor ke LTE dan elektron tetap terfokus menuju anoda. $TiO_2$ hanya berfungsi sebagai jalur transportasi elektron, sedangkan hole diblokir di pita valensi. Struktur ini memungkinkan pemisahan muatan yang efisien dan konversi energi surya yang optimal. Skema prinsip kerja dan *band alignment* ditunjukkan pada Gambar 2.3.

#### 2.1.1.3 Parameter Listrik Sel Surya Perovskit

Kinerja listrik dari SSP dinilai berdasarkan pengukuran karakteristik arus-tegangan (I-V), yang menghasilkan beberapa parameter utama. Tegangan ($V_{oc}$) merupakan tegangan maksimum yang dihasilkan saat tidak ada arus yang mengalir, sedangkan ($J_{sc}$) merupakan densitas arus pada luas permukaan perangkat yang dihasilkan ketika tegangan bernilai nol. Daya maksimum ($P_{max}$) adalah daya tertinggi yang dapat dihasilkan oleh sel saat arus dan tegangan berada dalam kondisi optimum (Ramalingam, 2017).




**Gambar 2.4 Kurva I-V Sel Surya**

Sumber: diolah oleh peneliti

Semua parameter tersebut tergambarkan dalam kurva I-V yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Nilai FF didefinisikan sebagai rasio antara daya maksimum dengan hasil kali $J_{sc}$ dan $V_{oc}$ (Theristis, 2018), yang dinyatakan dalam Persamaan (2.1):

$$FF = \frac{V_{max} \times J_{max}}{V_{oc} \times J_{sc}} \tag{2.1}$$

Di mana FF merupakan faktor pengisian (%), $V_{max}$ merupakan tegangan maksimum (V), $J_{max}$ merupakan kepadatan arus maksimum (mA/cm²), $V_{oc}$ adalah tegangan rangkaian terbuka (V), serta $J_{sc}$ kepadatan arus hubung singkat (mA/cm²).

Di sisi lain, *power conversion efficiency* merepresentasikan tingkat efektivitas suatu perangkat dalam mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik. PCE dihitung sebagai perbandingan antara daya maksimum yang dihasilkan perangkat dengan daya input dari sinar matahari, sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan (2.2):

$$PCE = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \times J_{sc} \times FF}{P_{in}} \tag{2.2}$$

Di mana PCE adalah efisiensi konversi daya (%), $P_{max}$ adalah daya maksimum yang dihasilkan perangkat (W), dan $P_{in}$ merupakan daya dari cahaya yang diterima permukaan perangkat (W) (Blood, 2013).

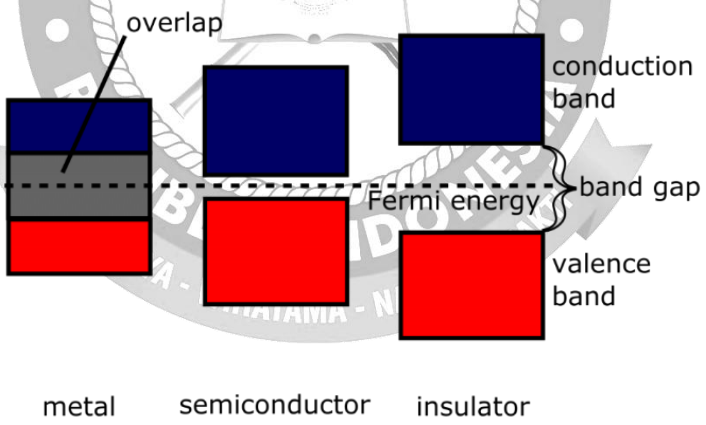
### 2.1.2 Lapisan Transpor Elektron

Lapisan Transpor Elektron (LTE) dalam sel surya, seperti $SnO_2$, bekerja berdasarkan prinsip semikonduktor yang memungkinkan transportasi elektron dari lapisan aktif, seperti perovskit, menuju elektroda. LTE berfungsi sebagai jembatan yang mendukung aliran elektron sambil meminimalkan rekombinasi dan kehilangan energi. Ketika cahaya mengenai lapisan aktif perovskit, elektron yang tereksitasi harus melewati LTE untuk kemudian dikumpulkan oleh elektroda (Chen, 2019).

Karakteristik optik dari LTE dapat dianalisis melalui pengukuran UV-Vis yang sangat berkaitan dengan kinerja lapisan ini. Spektroskopi UV-Vis digunakan untuk mengukur seberapa banyak cahaya yang diserap atau ditransmisikan oleh material LTE pada berbagai panjang gelombang. Dalam konteks LTE, transmitansi menggambarkan kemampuan cahaya untuk menembus LTE dan mencapai lapisan aktif, sedangkan absorbansi menunjukkan jumlah cahaya yang diserap oleh LTE itu sendiri. LTE yang ideal seharusnya memiliki transparansi tinggi di wilayah cahaya tampak sehingga memungkinkan cahaya mencapai lapisan aktif, serta absorbansi rendah agar tidak menyerap cahaya yang seharusnya dikonversi menjadi energi. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan *power conversion efficiency* (Chen, 2019).

### 2.1.3 Semikonduktor

Semikonduktor adalah material dengan sifat listrik yang berada di antara konduktor dan isolator, memungkinkan pengendalian aliran listrik sehingga menjadi dasar bagi berbagai teknologi seperti transistor, dioda, dan sel surya. Secara struktural, semikonduktor memiliki celah pita energi (*band gap*) yang mengatur kemampuan menghantarkan listrik, elektron dapat mengalami transisi dari pita valensi ke pita konduksi apabila menyerap energi yang memadai, misalnya dari panas atau cahaya. Besarnya celah pita ini menentukan sifat material sebagai isolator, semikonduktor, atau konduktor, dengan daerah terlarang yang memisahkan pita valensi dan pita konduksi pada isolator dan semikonduktor, sedangkan pada konduktor kedua pita ini saling berimpit (Hümmelgen, 2012).




**Gambar 2.5 Diagram Pita Energi**

Sumber: (Hümmelgen, 2012)

Dalam sel surya perovskit, $CsPbBr_3$ merupakan bahan semikonduktor utama dengan *bandgap* langsung sekitar 2,3 eV yang efektif menyerap cahaya tampak untuk menghasilkan pasangan elektron-hole. Sedangkan $SnO_2$, yang digunakan sebagai lapisan transpor elektron, memiliki *bandgap* lebih besar sekitar 3,6 eV sehingga transparan terhadap cahaya tampak dan tidak menghalangi penyerapan oleh perovskit. Posisi pita valensi $SnO_2$ yang rendah berfungsi sebagai penghalang hole, mencegah rekombinasi

muatan di antarmuka dan meningkatkan efisiensi pemisahan muatan (S. Sharma, 2015; Y. Zhao, 2020).

LTE merupakan lapisan tipis dengan sifat elektronik khusus yang memungkinkan elektron yang dihasilkan di lapisan aktif bergerak secara efisien menuju elektroda pengumpul elektron, berkat mobilitas elektron yang tinggi. Resistansi lapisan ETL dapat dihitung dengan persamaan:

$$R = \frac{\rho L}{A} \tag{2.3}$$

Di mana $\rho$ adalah resistivitas bahan (Ω.m), $L$ adalah ketebalan lapisan (m), dan $A$ adalah luas penampang ($m^2$). Berdasarkan hukum Ohm:

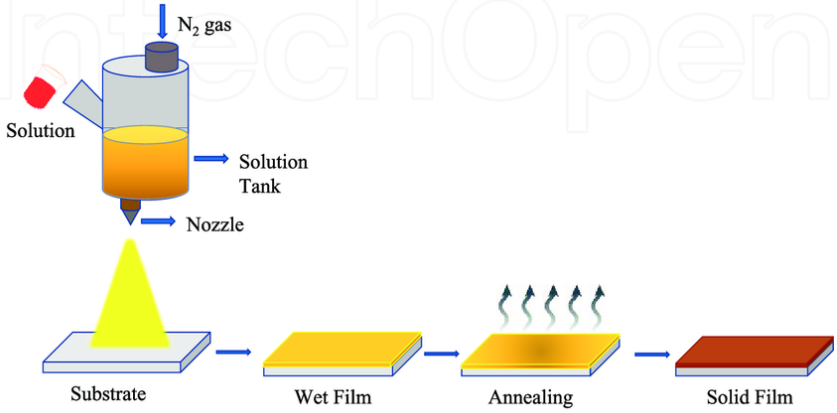
$$V = I \times R \tag{2.4}$$

Di mana $V$ adalah tegangan (V), $I$ adalah arus (A), serta R adalah hambatan (Ω). Jika arus $I$ (A) berhubungan dengan laju elektron, maka ketebalan lapisan ETL berbanding terbalik dengan laju transpor elektron. Dengan kata lain, ETL yang lebih tipis berpotensi meningkatkan kecepatan transpor elektron. Namun, ETL yang terlalu tipis dapat menyebabkan masalah seperti short circuit atau kegagalan fungsi *hole blocking* (pemblokiran lubang muatan positif), sehingga tidak efektif dalam menjaga performa perangkat (Knight, 2008).

### 2.1.4 Teknik *Spray-Coating*

Metode *spray-coating* merupakan teknik pelapisan di mana bahan pelapis diubah menjadi semprotan halus atau aerosol yang diaplikasikan ke permukaan objek (Gambar 2.6). Proses utama dalam *spray-coating* adalah atomisasi, yaitu pemecahan aliran cairan menjadi tetesan-tetesan kecil akibat interaksi fluida berkecepatan tinggi yang keluar dari *nozzle* dengan udara di sekitarnya. Kecepatan fluida yang tinggi menimbulkan gaya geser dan ketidakstabilan pada permukaan cairan sehingga melawan gaya tegangan permukaan dan menghasilkan tetesan halus. Laju aliran cairan dipengaruhi oleh luas penampang dan geometri *nozzle*, sifat fluida, serta tekanan yang diberikan. Peningkatan laju aliran gas menghasilkan droplet

yang lebih kecil, sedangkan peningkatan tekanan kerja memperlebar sudut semprotan (Ashgriz, 2011).



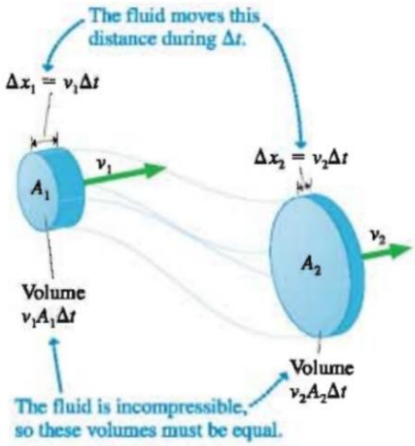

**Gambar 2.6 Proses Skematis *Spray-coating***

Sumber: (Jagdishbhai Patel, 2022)

Dalam desain *nozzle spray coating*, terdapat bagian penyempitan atau konstruksi yang menyebabkan peningkatan kecepatan fluida sesuai dengan persamaan kontinuitas. Persamaan kontinuitas ini berlaku dengan beberapa batasan, yaitu aliran bersifat non turbulen (laminar), keadaan tunak (*steady flow*), fluida inkompresibel, dan kerapatan fluida konstan di seluruh aliran. Dengan asumsi tersebut, laju aliran volumetrik $Q$ atau dapat ditulis sebagai hasil perkalian antara luas penampang $A$ dan kecepatan fluida $v$, sehingga:

$$Q = A \times v = konstan \tag{2.5}$$

Di mana $Q$ adalah laju aliran volumetrik (m³/s), $A$ adalah luas penampang (m²), dan $v$ adalah kecepatan fluida (m/s). Prinsip ini menjelaskan bahwa apabila luas penampang *nozzle* menyempit (Gambar 2.7), maka kecepatan fluida meningkat agar laju aliran volumetrik tetap konstan (Knight, 2008).



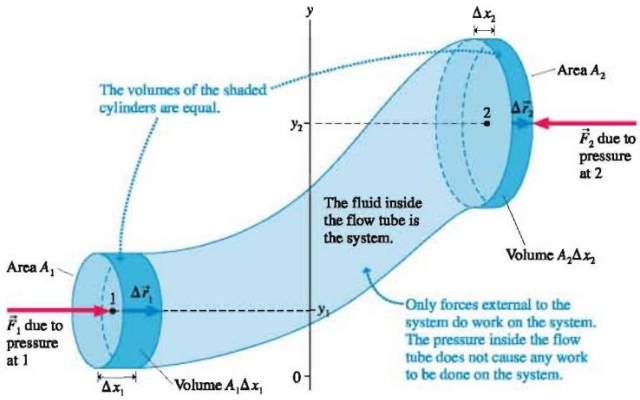

**Gambar 2.7 Tabung Aliran pada Persamaan Kontinuitas**

Sumber: (Knight, 2008)

Selain itu, prinsip Bernoulli (Gambar 2.8) menjelaskan hubungan antara tekanan, kecepatan, dan ketinggian dalam aliran fluida ideal.

$$P + \rho g y + \frac{\rho v^2}{2} = konstan \tag{2.6}$$

Di mana $P$ adalah tekanan fluida (Pa), $\rho$ adalah densitas fluida (kg/m$^3$), $g$ percepatan gravitasi (m/s$^2$), $y$ ketinggian titik pengukuran dari acuan tertentu (m), dan $v$ kecepatan fluida (m/s). Ketika fluida melewati konstriksi *nozzle*, kecepatan $v$ meningkat sehingga tekanan $P$ menurun. Penurunan tekanan ini menyebabkan atomisasi yang efektif saat cairan keluar dari *nozzle*.




**Gambar 2.8 Analisis Energi Tabung Aliran pada Persamaan Bernoulli**

Sumber: (Knight, 2008)

### 2.1.5 Teknik *Spin-Coating*

*Spin-coating* adalah metode pelapisan di mana larutan pelapis diaplikasikan pada substrat yang berputar dengan kecepatan sudut tertentu (Gambar 2.9). Pada proses ini, larutan pelapis mengalami gaya sentrifugal, yaitu gaya fiktif yang terjadi akibat rotasi substrat, yang arahnya keluar radial dari pusat rotasi. Besarnya gaya sentrifugal ini sebanding dengan massa fluida $m$, kuadrat kecepatan sudut rotasi $\omega$, dan jarak radial $r$ dari pusat rotasi, yang secara matematis dapat dituliskan sebagai:

$$F_c = m\omega^2 r \tag{2.7}$$

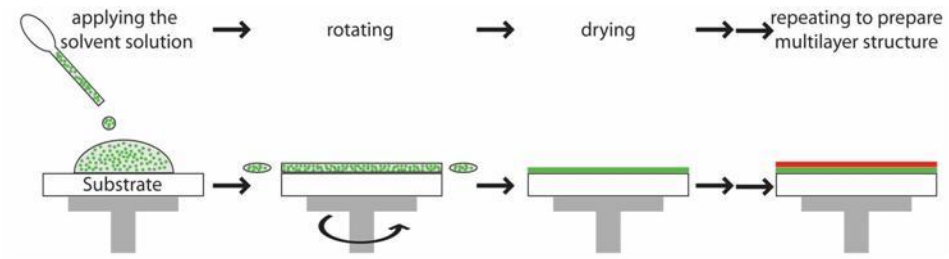
Di mana $F$ adalah gaya sentrifugal (N), $m$ adalah massa fluida (kg), $\omega$ adalah kecepatan sudut (rad/s), dan $r$ adalah jarak radial dari sumbu rotasi (m).

Gaya ini menyebabkan larutan pelapis tersebar merata ke seluruh permukaan substrat dan membentuk lapisan tipis (Knight, 2008). Ketebalan akhir lapisan pelapis, $h_f$, dapat diperkirakan menggunakan persamaan Emslie-Bonner-Peck yang menyatakan bahwa ketebalan ini berbanding lurus dengan akar kuadrat dari viskositas larutan $\mu$, serta berbanding terbalik dengan akar kuadrat dari kerapatan larutan $\rho$, kuadrat kecepatan sudut rotasi $\omega$ dan waktu spin $t$ (Emslie, 1958). Secara matematis, ketebalan akhir ini dapat dituliskan sebagai:

$$h_f = \sqrt{\frac{3\mu}{2\rho\omega^2 t}} \tag{2.8}$$

Di mana $h_f$ adalah ketebalan akhir lapisan (m), $\mu$ adalah viskositas larutan (Pa·s), $\rho$ adalah kerapatan larutan (kg/m³), $\omega$ adalah kecepatan sudut rotasi (rad/s), dan $t$ adalah waktu spin (s).

Dalam proses *spin-coating*, parameter-parameter seperti waktu putar, viskositas larutan, kerapatan larutan, dan kecepatan rotasi sangat menentukan ketebalan dan kualitas lapisan yang terbentuk pada substrat (Emslie, 1958; Meyerhofer, 1978).




**Gambar 2.9 Proses Skematis *Spin-coating***

Sumber: (Kandjani, 2015)

### 2.1.6 Sifat Fotoelektronik $SnO_2$

Sifat fotoelektronik $SnO_2$ memegang peranan penting dalam menentukan efisiensinya sebagai lapisan transpor elektron (LTE) pada sel surya perovskit. Jika dibandingkan dengan material lain seperti $TiO_2$, $SnO_2$ menunjukkan berbagai keunggulan yang signifikan, baik dari segi struktur material, sifat optik, maupun kestabilan fotokimianya. Salah satu keunggulan utama $SnO_2$ adalah celah pita (*band gap*) yang lebih lebar, berkisar antara 3,60 hingga 4,50 eV tergantung pada metode fabrikasi yang digunakan. Celah pita yang besar ini berkontribusi terhadap pengurangan rekombinasi pasangan elektron-lubang, sehingga meningkatkan efisiensi transportasi muatan dalam perangkat sel surya. Perbandingan terperinci antara $SnO_2$ dan $TiO_2$ dalam berbagai aspek dapat dilihat pada Tabel 2.1, yang menggambarkan kelebihan $SnO_2$ untuk aplikasi pada perangkat sel surya perovskit (Gong, 2023).

Secara kimia, timah (Sn) memiliki nomor atom 50 dan berada dalam golongan 14 (IV A) tabel periodik, bersama dengan unsur karbon (C), silikon (Si), dan germanium (Ge), yang semuanya dikenal memiliki sifat semikonduktor. Hal ini menjadikan $SnO_2$ memiliki potensi besar sebagai bahan semikonduktor, terutama dalam bentuk *n-type*, karena kemampuan Sn untuk mendonorkan elektron bebas. Sementara itu, titanium (Ti) memiliki nomor atom 22 dan termasuk dalam golongan 4 (IV B), bagian dari logam transisi, yang meskipun stabil dan kuat, memiliki sifat semikonduktor yang lebih terbatas jika dibandingkan dengan Sn.

$SnO_2$ juga menunjukkan jenis ikatan kovalen polar yang kuat antara atom Sn dan O, memberikan kestabilan struktur kristal dan meningkatkan mobilitas elektron. Sebaliknya, ikatan dalam $TiO_2$ lebih bersifat ionik, yang dapat menyebabkan penurunan efisiensi transportasi muatan dan peningkatan cacat antarmuka. Keberadaan ikatan kovalen polar pada $SnO_2$ menghasilkan permukaan film yang lebih seragam dan halus, mendukung kualitas antarmuka yang lebih baik dalam perangkat sel surya dan mengurangi perangkap muatan (*trap states*) (Gong, 2023).

Selain itu, $SnO_2$ dapat dikristalisasi pada suhu yang lebih rendah, sekitar 200°C, dibandingkan $TiO_2$ yang membutuhkan suhu hingga 450°C. Hal ini menjadikan proses fabrikasi $SnO_2$ lebih efisien dalam hal konsumsi energi dan biaya produksi. Dari aspek transmisi cahaya, $SnO_2$ juga lebih unggul karena memungkinkan lebih banyak cahaya menembus lapisan ini, yang pada gilirannya meningkatkan efisiensi penyerapan cahaya oleh lapisan perovskit. Permukaan $SnO_2$ yang difabrikasi pada suhu rendah juga cenderung lebih halus dibandingkan dengan $TiO_2$, sehingga mengurangi cacat antarmuka dan memperbaiki efisiensi keseluruhan perangkat. Di samping itu, $SnO_2$ memiliki stabilitas fotokimia yang lebih baik daripada $TiO_2$, yang rentan mengalami degradasi di bawah paparan sinar ultraviolet. Dengan demikian, $SnO_2$ mampu memperpanjang umur pakai sel surya dan menjadi pilihan yang lebih unggul untuk aplikasi jangka panjang dalam teknologi fotovoltaik (Noh, 2017).

Tabel 2.1 Perbandingan Sifat $SnO_2$ dan $TiO_2$ Sebagai LTE dalam Sel Surya Perovskit

| Aspek | $SnO_2$ | $TiO_2$ | Referensi |
|---|---|---|---|
| Celah pita energi | 3,60–4,50 eV (mengurangi rekombinasi *electron-hole* dan meningkatkan efisiensi transpor muatan). | Sekitar 3,2 eV (lebih rentan terhadap rekombinasi *electron-hole*). | (Gong, 2023) |
| Suhu kristalisasi | Rendah, sekitar 200°C (efisien dari segi energi dan biaya). | Tinggi, >450°C (memerlukan proses annealing yang intensif energi). | (Noh, 2017) |
| Transmisi cahaya | Lebih tinggi, memungkinkan lebih banyak cahaya menembus lapisan dan meningkatkan penyerapan cahaya oleh lapisan perovskit. | Lebih rendah, transmisi cahaya yang lebih terbatas. | (Ganose & Scanlon, 2016) |
| Permukaan lapisan | Lebih halus (mengurangi cacat antarmuka dan meningkatkan efisiensi perangkat). | Cenderung kasar, terutama pada proses fabrikasi suhu tinggi. | (Ganose & Scanlon, 2016) |
| Stabilitas fotokimia | Lebih baik, tahan terhadap degradasi di bawah sinar UV, sehingga memperpanjang umur sel surya. | Kurang stabil, rentan terhadap degradasi di bawah sinar UV, yang dapat mempengaruhi umur sel surya. | (Ganose & Scanlon, 2016) |
| Efisiensi energi | Lebih hemat energi karena proses fabrikasi dapat dilakukan pada suhu rendah. | Memerlukan lebih banyak energi untuk proses fabrikasi karena membutuhkan suhu yang lebih tinggi. | (Tomulescu, 2020) |
| Konduktivitas elektron | Konduktivitas elektron yang lebih baik karena mobilitas elektron yang tinggi. | Konduktivitas yang cukup baik tetapi lebih rendah dibandingkan $SnO_2$. | (Wu, 2024) |
| Kompatibilitas dengan perovskit | Sangat kompatibel dengan lapisan perovskit anorganik maupun organik, membantu membentuk antarmuka yang baik. | Kompatibel dengan lapisan perovskit tetapi memiliki antarmuka yang lebih kasar sehingga lebih rentan terhadap cacat rekombinasi. | (Wu, 2024) |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Proses fabrikasi | Dapat digunakan pada berbagai metode fabrikasi (*spray-coating*, *spin-coating*, *thermal evaporation*) dengan hasil yang stabil di berbagai kondisi. | Lebih cocok dengan metode *spin-coating* atau annealing suhu tinggi untuk mendapatkan struktur kristal yang optimal. | (Hakeem, 2024) |
| Ketersediaan material | Lebih melimpah, sehingga lebih murah dan lebih ramah lingkungan dibandingkan beberapa oksida logam lain. | Juga melimpah, tetapi biaya fabrikasi bisa lebih tinggi karena memerlukan kontrol suhu yang ketat selama annealing. | (Hakeem, 2024) |
| Efek termal | Stabil pada kondisi termal moderat, cocok untuk aplikasi jangka panjang. | Kurang stabil di bawah kondisi termal ekstrem, sehingga mempengaruhi umur perangkat dalam beberapa kondisi lingkungan. | (Hakeem, 2024) |

Sumber: (Ganose & Scanlon, 2016; Gong, 2023; Hakeem, 2024; Noh, 2017; Tomulescu, 2020; Wu, 2024, diolah oleh peneliti)

UNIVERSITAS PERTAHANAN REPUBLIK INDONESIA PRADITYA - WIRATAMA - NAGARA BHAKTI

### 2.1.7 Karakterisasi Material

#### 2.1.7.1 Sifat Optik dan Struktur Ikatan Kimia

Karakterisasi sifat optik suatu material dapat dilakukan dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis, yaitu alat yang digunakan untuk mengukur tingkat transmitansi dan absorbansi sampel pada berbagai panjang gelombang cahaya. Spektrum UV-Vis dari material semikonduktor menggambarkan keterkaitan antara batas awal serapan cahaya (absorpsi fundamental) dengan energi foton yang dibutuhkan untuk mentransmisikan elektron dari pita valensi ke pita konduksi (Hecht, 2017; Technology Networks, 2023).

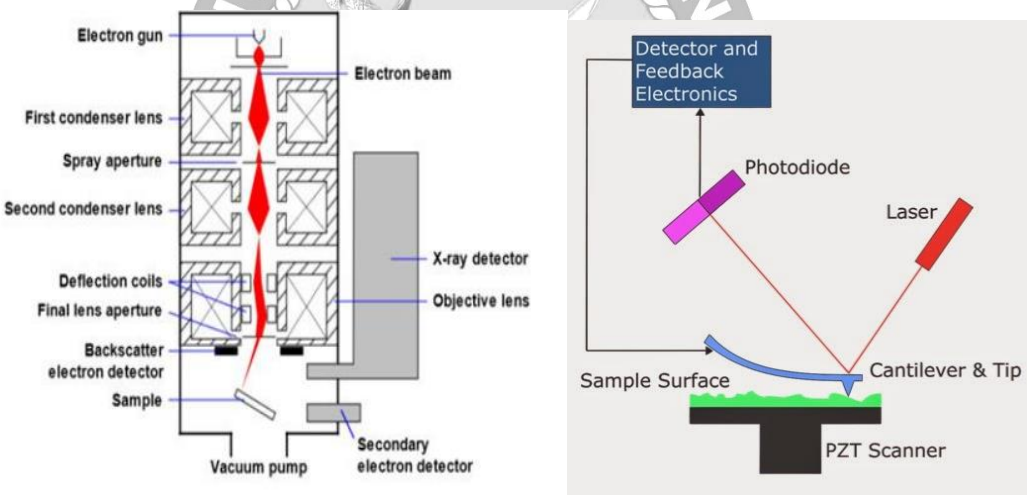
Untuk identifikasi senyawa kimia berdasarkan ikatan dan gugus fungsionalnya, digunakan teknik *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR). Pengukuran dilakukan dengan perangkat Thermo Scientific iD5 ATR (*Attenuated Total Reflectance*), yang memungkinkan analisis langsung tanpa preparasi sampel yang kompleks. Rentang pengukuran antara 4000 $cm^{-1}$ hingga 400 $cm^{-1}$ mampu mendeteksi vibrasi molekul dalam wilayah inframerah tengah, sehingga berguna untuk mengidentifikasi ikatan kimia seperti O–H, C–H, dan C=O, serta memberikan informasi mengenai struktur molekul dan keberadaan senyawa tertentu dalam material (Spectroscopy Editors, 2017).

#### 2.1.7.2 Morfologi

Analisis morfologi permukaan dilakukan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM), yang mampu menghasilkan citra resolusi tinggi dari permukaan sampel melalui interaksi antara berkas elektron dan permukaan material. Untuk melengkapi analisis ini, digunakan pula *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX), yang mendeteksi sinar-X karakteristik yang dipancarkan akibat eksitasi atom dan digunakan untuk mengidentifikasi serta menghitung kandungan unsur dalam sampel. Dalam SEM, berkas elektron berenergi tinggi ditembakkan ke permukaan sampel dalam ruang vakum untuk menghasilkan sinyal sekunder seperti elektron

sekunder (SE) dan elektron hambur balik (BSE), yang memberikan informasi tentang topografi dan kontras komposisi (Gambar 2.10a). Sementara itu, detektor EDX menangkap sinar-X yang dipancarkan untuk menghasilkan spektrum unsur penyusun material secara kualitatif dan kuantitatif (García, 2002).

Teknik karakterisasi lain yang digunakan adalah *Atomic Force Microscopy* (AFM), yang dapat menggambarkan morfologi permukaan dengan resolusi nanometer. AFM menggunakan cantilever dengan ujung tip tajam, yang digerakkan oleh *piezoelectric scanner* dan berinteraksi secara mekanik dengan permukaan material (Gambar 2.10b).




(a) (b)

**Gambar 2.10 Proses Skematis (a) SEM-EDX dan (b) AFM**

Sumber: (García, 2002; Mohammed & Abdullah, n.d.)

Perubahan posisi vertikal cantilever dideteksi oleh sistem laser dan photodetector, yang kemudian menghasilkan citra topografi tiga dimensi. AFM memiliki tiga mode pengukuran utama, yaitu mode kontak (tip menyentuh permukaan secara langsung), mode ketukan (tip menyentuh permukaan secara periodik), dan mode non-kontak, sehingga dapat disesuaikan dengan kebutuhan karakterisasi (Giessibl, 2003).

Selain itu, digunakan juga teknik profilometer Dektak untuk mengukur ketebalan, kekasaran, dan topografi permukaan dengan akurasi

tinggi. Alat ini menggunakan stylus tajam yang bergerak di atas permukaan sampel dengan gaya konstan. Perubahan posisi vertikal stylus selama pemindaian direkam sebagai profil permukaan, memberikan informasi kuantitatif tentang morfologi dan ketebalan film tipis yang terdeposisi (Rameshkumar, 2021).

#### 2.1.7.3 Performa Sel Surya Perovskit

Untuk mengevaluasi performa lapisan transpor elektron (LTE) dalam sel surya perovskit, dilakukan pengukuran konduktivitas listrik yang bertujuan mengetahui kemampuan LTE dalam menghantarkan arus. Salah satu metode yang digunakan adalah pengukuran karakteristik densitas arus terhadap tegangan (J–V) dalam kondisi gelap, guna menganalisis transportasi muatan tanpa pengaruh foton. Konduktivitas (σ) dihitung menggunakan Persamaan 2.9:

$$\sigma = \frac{Jd}{V} \tag{2.9}$$

Di mana $\sigma$ adalah konduktivitas (S/cm), $J$ adalah kerapatan arus (A/cm²), $V$ adalah tegangan yang diberikan (V), dan $d$ adalah ketebalan LTE (cm) (Ahmmed, 2024). Dalam praktik eksperimen, hubungan antara kerapatan arus J dan tegangan V dapat diperoleh melalui pengukuran I-V dalam kondisi gelap. Jika hubungan $J$ terhadap $V$ bersifat linier (menunjukkan sifat ohmik), maka grafik $J$ versus $V$ membentuk garis lurus yang dapat dinyatakan dalam bentuk fungsi linier:

$$y = bx \tag{2.10}$$

Dalam konteks ini, $y$ adalah $J$, $x$ adalah $V$, dan $b$ adalah kemiringan garis yang diperoleh dari hasil regresi linier terhadap data eksperimen. Dengan menyamakan bentuk matematis dari kedua persamaan, dapat dinyatakan bahwa:

$$J = b \times V \rightarrow b = \frac{J}{V}$$

Substitusikan ke dalam Persamaan 2.9:

$$\sigma = b \times d \tag{2.11}$$

Pengujian J–V di bawah pencahayaan dilakukan dengan simulator surya berbasis lampu Xenon yang dilengkapi filter AM1.5 dan intensitas sebesar 1000 W/m² (under 1 sun). Pengukuran parameter fotovoltaik seperti $V_{oc}$, $J_{sc}$, dan *power conversion efficiency* dilakukan menggunakan Source Meter Keithley 2400 (SMU 2400). Parameter ini digunakan untuk menghitung *power conversion efficiency* berdasarkan daya yang dihasilkan relatif terhadap daya cahaya yang diterima berdasarkan persamaan 2.2. Selain itu, jenis kontak antara elektroda dan material aktif juga mempengaruhi karakteristik J–V; kontak ohmik memungkinkan aliran arus dua arah tanpa hambatan berarti sehingga mendukung performa optimal perangkat, sedangkan kontak non-ohmik menimbulkan penghalang potensial yang dapat menghambat aliran arus, menyebabkan deviasi pada kurva J–V dan menurunkan efisiensi perangkat.(Chelikowsky & Cohen, 2015).

Untuk melengkapi analisis performa, dilakukan pula pengukuran *Incident Photon-to-Current Efficiency* (IPCE), yang bertujuan mengukur efisiensi konversi foton menjadi arus listrik pada berbagai panjang gelombang. Pengujian IPCE dilakukan dengan sistem spektrofotometer yang dilengkapi sumber cahaya terkalibrasi, menghasilkan cahaya monokromatik dengan intensitas tertentu. Arus listrik yang dihasilkan dari pencahayaan tersebut diukur dengan sourcemeter atau elektrometer, dan hasilnya mencerminkan efisiensi spektral sel surya dalam mengubah cahaya menjadi arus listrik (Barnes, 2009)

### 2.1.8 Peran Serta Sel Surya terhadap Ketahanan Energi Nasional

Ketahanan energi merujuk pada kondisi di mana pasokan energi tersedia secara terus-menerus dan tidak terganggu, dengan memastikan bahwa distribusinya berlangsung secara andal, dapat dijangkau secara ekonomi, serta berkelanjutan dalam menghadapi berbagai tantangan,

seperti gangguan pasokan, perubahan iklim, maupun peningkatan permintaan. Konsep ketahanan energi mencakup beberapa elemen penting, seperti diversifikasi sumber energi, efisiensi dalam penggunaan energi, serta kemampuan adaptasi terhadap risiko lingkungan maupun ekonomi (Lazaroiu, 2023). Selain itu, ketahanan energi umumnya dikaji melalui lima aspek utama: (1) ketersediaan pasokan energi secara jangka panjang; (2) aksesibilitas fisik terhadap energi, terutama bagi masyarakat di wilayah terpencil; (3) keterjangkauan harga energi bagi konsumen; (4) keberlanjutan lingkungan, yang mencakup pengurangan emisi dan dampak ekologis; serta (5) ketahanan sistem energi terhadap gangguan teknis, geopolitik, dan bencana alam (Panunggul, 2018).

SSP berperan dalam mendukung ketahanan energi nasional dengan memanfaatkan sumber daya energi dalam negeri untuk memenuhi kebutuhan energi secara Sel surya perovskit (SSP) berperan dalam mendukung ketahanan energi nasional dengan memanfaatkan sumber daya energi dalam negeri untuk memenuhi kebutuhan energi secara berkelanjutan. Dengan memanfaatkan sumber energi yang melimpah dan terbarukan, yaitu sinar matahari, teknologi sel surya berkontribusi pada diversifikasi sumber energi, dan secara langsung mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil yang rentan terhadap fluktuasi harga di pasar global maupun gangguan pasokan internasional. Selain itu, teknologi ini memperkuat aksesibilitas energi melalui kemampuannya untuk menyediakan energi secara mandiri, terutama bagi daerah terpencil atau wilayah yang belum memiliki infrastruktur jaringan listrik yang memadai (Al-Ezzi & Ansari, 2022).

Teknologi sel surya juga mendorong transisi menuju sistem energi yang lebih berkelanjutan melalui pengurangan emisi gas rumah kaca dan dampak lingkungan yang lebih rendah. Efisiensi SSP yang terus meningkat secara signifikan, dari sekitar 3,5% menjadi lebih dari 25% dalam kurun waktu satu dekade, menunjukkan potensi besar teknologi ini sebagai alternatif energi yang kompetitif (Roy, 2022).

## 2.2 Hasil Penelitian Terdahulu

Tabel 2.2 Hasil Penelitian Terdahulu

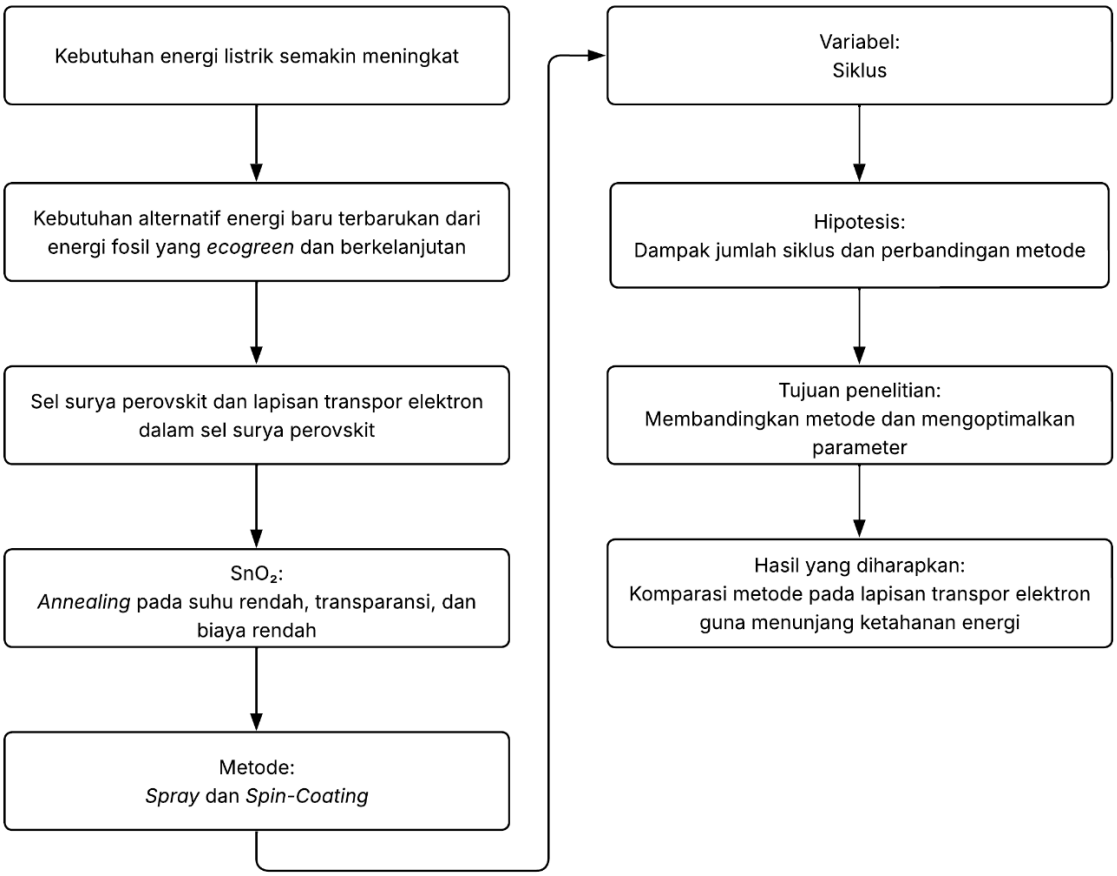
| Judul Penelitian | Tujuan | Metode Penelitian | Kesimpulan | Perbedaan |
|---|---|---|---|---|
| *Spray-coated $SnO_2$ electron transport layer with high uniformity for planar perovskite solar cells* (Wang, 2021) | Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan dan mengevaluasi LTE berbasis $SnO_2$ yang disemprot dengan uniformitas tinggi, yang dapat meningkatkan efisiensi dan stabilitas sel surya perovskit planar. Selain itu penelitian ini bertujuan untuk menunjukkan bahwa metode penyemprotan dapat menghasilkan film $SnO_2$ yang memiliki sifat listrik yang baik dan dapat diterapkan sebagai LTE yang efektif dalam sel surya perovskit. | *Spray-Coating* | Penelitian ini menunjukkan bahwa LTE $SnO_2$ yang di deposisi dengan metode *Spray-Coating* dapat meningkatkan efisiensi sel surya perovskite dengan mengurangi rekombinasi elektron. $SnO_2$ menghasilkan PCE sebesar 17,78%, FF 66,60%, $V_{oc}$ 1,14 V, $J_{sc}$ 23,35 mA/cm². | Menggunakan kaca ITO, lapisan perovskit $Cs_{0.05}FA_{0.85}MA_{0.15}PbI_{2.9}Br_{0.15}$, lapisan HTL Spiro-OMeTAD, dan lapisan perak diuapkan dalam vakum sebagai elektroda lawan. ITO/ $SnO_2$/$Cs_{0.05}FA_{0.85}MA_{0.15}PbI_{2.9}Br_{0.15}$/Spiro-OMeTAD/ Au |
| *Automated Scalable Spray Coating of $SnO_2$ for the Fabrication of Low-Temperature Perovskite* | Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan teknik penyemprotan otomatis yang dapat diskalakan untuk lapisan $SnO_2$ sebagai lapisan transpor elektron (LTE) dalam sel surya perovskite yang diproses pada suhu rendah. | *Automated Spray-Coating* | Penelitian menunjukkan bahwa lapisan $SnO_2$ yang disemprotkan secara otomatis dapat meningkatkan efisiensi sel surya perovskite, dengan hasil yang menjanjikan untuk aplikasi skala besar. $SnO_2$ pada suhu | Menggunakan perovskit $CH_3NH_3PbI_3$, lapisan HTL Spiro-OMeTAD, dan diselesaikan dengan penguapan termal Au sebagai elektroda. FTO/ $SnO_2$/ $CH_3NH_3PbI_3$/ Spiro-OMeTAD/Au |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| *Solar Cells and Modules* (Taheri, 2020) | | | rendah menghasilkan lapisan seragam dengan PCE 9,37%, FF 73,10%, $V_{oc}$ 7,02 V, $J_{sc}$ 14,60 mA/cm² | |
| *Electron transporting bilayers for perovskite solar cells: spray coating deposition of c-$TiO_2$/m-$SnO_2$-quantum dots* (Mirea, 2021) | Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan bilayer transpor elektron menggunakan lapisan c-$TiO_2$ dan m-$SnO_2$ yang dilapisi dengan kuantum dot untuk meningkatkan efisiensi sel surya perovskite. | *Spray-Coating, QDs,* dan *Spin-Coating* | Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan bilayer c-$TiO_2$/m-$SnO_2$ dengan kuantum dot dapat meningkatkan *power conversion efficiency* sel surya perovskite, serta menunjukkan stabilitas yang lebih baik dibandingkan dengan struktur konvensional. Menghasilkan lapisan LTE yang lebih seragam dan kompak dengan PCE 10,41%, FF 57%, $V_{oc}$ 0,93 V, $J_{sc}$ 19,60 mA/cm² | • ITO/c-TiO2/m-TiO2,<br>• m-SnO2 atau SnO2 QDs/FAMA@10K/Spiro-OMeTAD/Au<br>• FTO/c-TiO2 SnO2 QDs /FAMA@10K/Spiro-OMeTAD/Au. |
| *Precise Stress Control of Inorganic Perovskite Films for Carbon-Based Solar Cells* | Penelitian ini bertujuan untuk mengontrol stres secara tepat pada film perovskite $CsPbBr_3$ untuk meningkatkan ukuran butir dan mengurangi cacat batas butir, sehingga menghasilkan sel surya | *Spin-Coating* | Penelitian menunjukkan bahwa kontrol stres yang tepat pada film perovskite dapat menghasilkan sel surya dengan tegangan maksimum mencapai 1.622 V, yang merupakan salah satu yang | N-CQDs digunakan sebagai HTL. FTO/ $SnO_2$/ $CsPbBr_3$/ N-CQDs/Carbon/Ag |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| *with an Ultrahigh Voltage of 1.622 V* (Zhao, 2020) | karbon berbasis perovskite dengan tegangan tinggi. | | tertinggi untuk sel surya berbasis perovskite. Menghasilkan PCE 10,71%, FF 80,11%, $V_{oc}$ 1,62 V, $J_{sc}$ 7,87 mA/cm² | |
| *Spin-Coating Process for 10 cm × 10 cm Perovskite Solar Modules Enabled by Self-Assembly of $SnO_2$ Nanocolloids* (Han, 2019) | Mengembangkan teknik *spin-coating* berbasis self-assembly untuk menghasilkan lapisan $SnO_2$ (LTE) yang seragam, ultra-tipis, dan bebas cacat pada modul sel surya perovskit skala besar. | *Spin-Coating* | Metode *spin* berhasil menghasilkan LTE $SnO_2$ ultra-tipis (~10 nm) yang seragam dan bebas pinhole. Modul perovskit 10 cm × 10 cm mencapai efisiensi 14.0%, sementara modul 25 cm² mencapai 15.3% tanpa kehilangan resistansi shunt. | Menggunakan anisole sebagai antisolvent untuk perovskite, memungkinkan pembentukan lapisan perovskit yang lebih seragam. FTO/ $SnO_2$/ $[CsPbI3]0.05[(FAPbI3)0.85(MAPbBr\ 3)0.15\ ]0.95$/ Spiro-OMeTAD |

Sumber: (Wang, 2021; Taheri, 2020; Mirea et al., 2021; Zhao, 2020; Han, 2019, diolah oleh peneliti)

## 2.3 Kerangka Berpikir




**Gambar 2.11 Kerangka Berpikir pada Penelitian**

Sumber: diolah oleh peneliti

## 2.4 Hipotesis

a. Variasi ketebalan lapisan $SnO_2$ yang dideposisikan menggunakan teknik *spray-coating* dan *spin-coating* berpengaruh terhadap performa sel surya perovskit, dengan kecenderungan menunjukkan tren peningkatan seiring bertambahnya jumlah lapisan atau siklus deposisi.

b. Teknik *spray-coating* menghasilkan lapisan $SnO_2$ dengan sifat optik transparan, morfologi yang lebih homogen serta padat dibandingkan *spin-coating*, dan juga menghasilkan *power conversion efficiency* yang paling tinggi pada sel surya perovskit.

UNIVERSITAS PERTAHANAN REPUBLIK INDONESIA PRADITYA - WIRATAMA - NAGARA BHAKTI