

## REVIEW: Perkembangan Sel Surya *Perovskite*

Ihsanul Mubarok<sup>1</sup>

Aisyah Amira Fathinah<sup>2</sup>

Hafsa Mutmainnah<sup>3</sup>

Wina Mardhatillah<sup>4</sup>

Ayi Bahtiar<sup>5</sup>

Richie Estrada<sup>6</sup>

Noto Susanto Gultom<sup>7</sup>

<sup>1,2,3,4,5,7</sup>Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran, Jalan Raya Bandung – Sumedang 11 45363, Indonesia

<sup>6</sup>Program Studi Teknik Elektro, Universitas Kristen Krida Wacana, Jakarta, Indonesia

<sup>7</sup>Functional Nano Powder, University Center of Excellence, Universitas Padjadjaran, Jalan Raya Bandung – Sumedang KM 21, Jatinangor, Sumedang 45363, Indonesia

<sup>7</sup>Korespondensi penulis: [noto.susanto.gultom@unpad.ac.id](mailto:noto.susanto.gultom@unpad.ac.id)

**Article Info:** Received: February 10, 2025 Accepted: March 15, 2025 Available online: April 14, 2025

**DOI:** 10.30588/jeemm.v9i1.2141

**Abstract:** *Perovskite* is one of the materials used for solar panels that offers high efficiency comparable to conventional silicon-based solar cells. This article aims to analyze the latest developments in perovskite solar cells from various important aspects, starting from material development, various fabrication techniques, as well as opportunities and challenges in its development. *Perovskite* is a type of material that has a crystal structure with the chemical formula ABX<sub>3</sub>. *Perovskite* fabrication can be done using various methods such as spin coating, spray coating, doctor blading, inkjet printing and others. In its development, various innovations have been made, such as the development of cells without a hole transport layer (HTL-free), the addition of ethylenediammonium cations (en), and efforts to replace lead with more environmentally friendly materials such as tin. The results of the study showed that the power conversion efficiency (PCE) of perovskite solar cells has reached more than 25%. Although this development is promising, there are still major challenges in maintaining the long-term stability of the device, especially related to degradation due to humidity, heat, and prolonged lighting. The development of fabrication techniques that can mass produce perovskite solar cells with high performance and stable reliability is essential. With continued research and material innovation, perovskite solar cells have great potential in supporting sustainable clean energy transitions such as their applications in building-integrated photovoltaic (BIPV) systems, wearable electronic devices, and agrivoltaic systems.

**Keywords:** Development, *Perovskite*, Efficiency, Solar Cells, Renewable energy

**Abstrak:** *Perovskite* merupakan salah satu bahan yang digunakan untuk panel surya yang menawarkan efisiensi tinggi yang sebanding dengan sel surya berbahan dasar silikon konvensional. Artikel ini bertujuan untuk menganalisis perkembangan terkini sel surya *perovskite* dari berbagai aspek penting, mulai dari perkembangan material, berbagai teknik fabrikasi, serta peluang dan tantangan dalam pengembangannya. *Perovskite* merupakan sejenis material yang memiliki struktur kristal dengan rumus kimia ABX<sub>3</sub>. Fabrikasi *perovskite* dapat dilakukan dengan berbagai metode seperti *spin coating*, *spray coating*, *doctor blading*, *inkjet printing* dan lainnya. Dalam pengembangannya, berbagai inovasi telah dilakukan, seperti pengembangan sel tanpa lapisan hole transport layer (HTL-free), penambahan kation ethylenediammonium (en), serta upaya menggantikan timbal dengan bahan yang lebih ramah lingkungan seperti timah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi konversi daya (PCE) sel surya *perovskite* telah mencapai angka lebih dari 25%. Meskipun perkembangan ini menjanjikan, masih terdapat tantangan besar dalam menjaga stabilitas jangka panjang perangkat, terutama terkait degradasi akibat kelembapan, panas, dan pencahayaan yang berkepanjangan. Pengembangan teknik fabrikasi yang mampu memproduksi sel surya *perovskite* secara massal dengan kinerja tinggi dan keandalan yang stabil sangat penting. Dengan terus dilakukannya penelitian dan inovasi material, sel surya *perovskite* memiliki potensi besar dalam mendukung transisi energi bersih yang berkelanjutan seperti pengaplikasiannya

dalam sistem fotovoltaik terintegrasi bangunan (BIPV), perangkat elektronik *wearable*, dan sistem agrivoltaik.

**Kata Kunci:** Perkembangan, *Perovskite*, Efisiensi, Sel Surya, Energi terbarukan

## I. Pendahuluan

Penggunaan energi secara global terus meningkat seiring dengan populasi dari waktu ke waktu. Peningkatan penggunaan energi terbarukan dilakukan untuk menurunkan penggunaan energi yang tidak dapat diperbarui seperti bahan bakar fosil yang berdampak pada masalah lingkungan.

Energi surya menjadi sumber energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan karena jumlah yang tidak akan habis. Sel surya dikategorikan menjadi tiga generasi dengan bahan yang berbeda-beda, salah satunya *perovskite* (Suresh Kumar & Chandra Babu Naidu, 2021).

Penggunaan *perovskite* untuk panel surya menawarkan efisiensi yang tinggi dalam mengonversi cahaya matahari menjadi energi listrik dengan biaya fabrikasi yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan sel surya silikon konvensional. Hingga saat ini, para peneliti masih melakukan pengembangan pada bahan *perovskite* agar menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi dan menggunakan bahan yang lebih ramah lingkungan.

Artikel ini bertujuan untuk menganalisis perkembangan terkini sel surya *perovskite* dengan berfokus pada aspek-aspek penting seperti perkembangan material, metode fabrikasi, serta berbagai teknik optimasinya yang berdampak pada efisiensi konversi daya sel surya *perovskite*. Dalam artikel ini juga dibahas peluang dan tantangan yang dihadapi sel surya *perovskite* dalam pengembangannya untuk mendukung transisi energi global menuju sumber energi yang lebih bersih dan berkelanjutan.

## II. Metode Studi Literatur

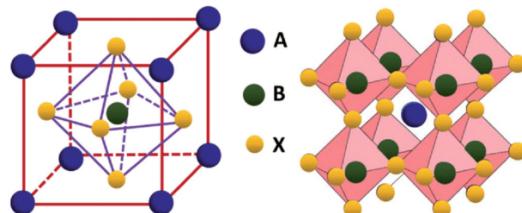
Penelitian ini dilakukan menggunakan metode studi literatur dengan meninjau berbagai referensi yang relevan mengenai perkembangan sel surya *perovskite* (PSC). Literatur yang digunakan mencakup jurnal ilmiah, buku, dan prosiding konferensi yang dikumpulkan dari database online seperti Google Scholar dan ScienceDirect. Kriteria yang digunakan untuk seleksi literatur didasarkan pada relevansi studi, yang berfokus pada peningkatan efisiensi konversi daya, inovasi dan metode optimasi untuk meningkatkan performa, serta teknik fabrikasi *perovskite*. Literatur juga dipilih dari sumber yang terpercaya dari jurnal bereputasi dan konferensi ilmiah yang telah melalui proses *peer-review*.

Data yang dikumpulkan dianalisis dengan metode perbandingan kuantitatif dengan membandingkan efisiensi *perovskite* dari berbagai penelitian sebelumnya. Tren pengembangan inovasi dan optimasi serta teknologi fabrikasi juga dikaji dengan membandingkan teknik dan material yang digunakan dan dampaknya terhadap efisiensi akhir yang didapatkan. Data yang diperoleh disusun dalam bentuk tabel agar lebih terstruktur, ringkas, dan efektif.

## III. Hasil Studi Literatur dan Pembahasan

### 1. *Perovskite*

*Perovskite* menjadi salah satu bahan yang digunakan dalam pembuatan panel surya. Pada panel surya, jenis *perovskite* yang digunakan merupakan jenis senyawa metal halida organik-anorganik dengan struktur *perovskite* (Saleh dkk., 2023).



Gambar 1. Struktur umum *perovskite* (Aftab dkk., 2021)

Sel surya jenis *perovskite* merupakan sel film tipis yang dibuat melalui proses pelapisan, sintering, dan kristalisasi dengan bahan larutan, kemudian dikemas menjadi sel surya yang dapat menghasilkan listrik. Secara umum, struktur *perovskite* digambarkan seperti pada gambar 1. Sekelompok *perovskite* memiliki rumus umum  $ABX_3$  dengan komponen organik ( $A = CH_3NH^+$ ) pada *cuboctahedral* dan komponen anorganik ( $B = Pb^{2+}, X = I^-, Br^-, Cl^-$ ) dalam struktur oktahedral, dengan pusat logam dan sudut halida serta X merupakan anion seperti halida (Vicente & Chen, 2018).

Terdapat karakteristik yang menggambarkan bahan yang memiliki struktur pada *perovskite* antara lain, zat-zat yang memiliki energi ikatan eksiton yang tereduksi dan koefisien penyerapan optik yang tinggi, memiliki konstanta dielektrik tinggi yang dapat secara efektif mengangkut dan mengumpulkan elektron dan *hole*, serta memungkinkan transmisi simultan elektron dan *hole* dengan jarak transmisi hingga 100 nm atau lebih dari 1 mikrometer (Vicente & Chen, 2018).

Efisiensi dari *Perovskite Solar Cell* dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, seperti struktur saat fabrikasi, gabungan dari *Hole Transport Layer* (HTL) dan *Electron Transport Layer* (ETL) serta sifat kimia dari bahan atau material yang digunakan (Nair dkk., 2020).

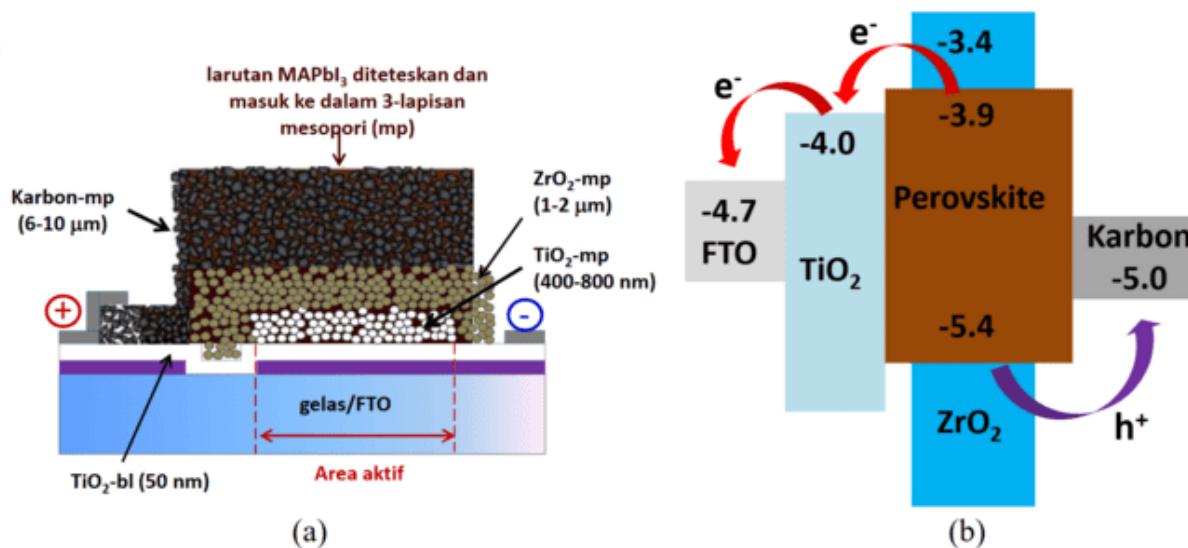
Ketebalan  $TiO_2$  yang bertindak sebagai *Electron Transport Layer* (ETL) pada *Perovskite Solar Cell* memiliki dampak langsung pada efisiensi yang akan diperoleh. Sebuah studi yang dilakukan oleh Kim dkk (2019) menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan lapisan  $TiO_2$  mengakibatkan penurunan nilai *Power Conversion Efficiency* (PCE). Dalam studinya, mereka menggunakan pasta  $TiO_2$  standar dengan beberapa variasi ketebalan yaitu 400 nm, 205 nm, dan 150 nm. Hasil studi tersebut menunjukkan bahwa PCE secara berturut-turut adalah 14,43%, 16,52%, dan 18,03% (D. G. Lee dkk., 2019).

## 2. Perkembangan *Perovskite* Hingga Saat Ini

### a. Pembuatan Sel Surya *Perovskite* Tanpa HTL

Sel surya *perovskite* tanpa adanya lapisan transport lubang memiliki beberapa keunggulan seperti struktur yang lebih sederhana, fabrikasi yang mudah dan stabilitas yang tinggi. Hal ini menyebabkan sel surya *perovskite* tanpa HTL sangat berpotensi untuk dikembangkan. Dalam skema ini, bahan *perovskite* berperan sebagai penyerap cahaya dan saluran transport *hole* (D. Zhou dkk., 2018).

Pada gambar 2a merupakan struktur PSC tanpa HTL dan gambar 2b merupakan diagram skematis tingkat energinya. Karbon berfungsi sebagai elektroda karena fungsi kerja karbon, dengan nilai -5,0 eV, yang sesuai dengan tingkat energi valensi *perovskite* (bernilai -5,4 eV) (Bahtiar & Sartika, 2019). Pada keadaan ini, transport *hole* dari lapisan *perovskite* ke lapisan karbon akan lebih mudah.



Gambar 2. (a) Struktur skematis PSC (b) Diagram tingkat energi PSC-HTL free berbasis karbon (Bahtiar & Sartika, 2019)

### b. Penambahan Kation *Ethylenediammonium* (*en*)

Penelitian yang dilakukan oleh Weijun Ke dkk menemukan cara untuk meningkatkan performa sel surya *perovskite* dengan menambah kation etilendionium. Penambahan en pada perovskit berbasis timah (Sn) menghasilkan jenis baru yaitu *perovskite* 3 dimensi yang disebut sebagai *perovskite* berongga. *Perovskite* berongga memiliki sifat unit, yaitu band gap nya dapat diatur (tunning) antara 1,3 eV dan 1,9 eV. Sel surya yang dibuat dengan *perovskite* berongga dan en sebanyak 10% mencapai tegangan sirkuit terbuka dan efisiensi konversi daya (PCE) yang lebih tinggi daripada *perovskite* standar. Nilai Voc meningkat dari 0,15 V menjadi 0,48 V dan PCE juga meningkat dari 1,4% menjadi 7,14% (Ke dkk., 2017)(Ke & Kanatzidis, 2019).

### c. Pembuatan *Perovskite* yang Lebih Ramah Lingkungan

*Perovskite* biasanya terbuat dari bahan timbal. Penggunaan bahan timbal sangat berbahaya bagi lingkungan dan manusia. Bahan timbal dapat diganti dengan alternatif bahan lain seperti timah (Sn), bismut (Bi) dan germanium (Ge). Bahan-bahan tersebut memiliki jari-jari ionik dan keadaan valensi yang sebanding dengan timbal (Pb). Diantara ketiga bahan tersebut, bahan Sn memiliki celah pita dan koefisien penyerapan yang mirip dengan *perovskite* berbahan timbal (Afre & Pugliese, 2024).

Sn dapat digunakan sebagai pengganti timbal, namun Sn mengalami oksidasi parah dari  $\text{Sn}^{2+}$  menjadi  $\text{Sn}^{4+}$  yang disebabkan oleh kecenderungan  $\text{Sn}^{2+}$  untuk kehilangan elektron dan berubah menjadi  $\text{Sn}^{4+}$  saat terpapar oksigen atau kelembaban. Oksidasi tersebut dapat mempengaruhi performa *perovskite* berbasis timbal karena dapat mengurangi mobilitas pembawa muatan dan masa pakainya, sehingga menurunkan efisiensi sel surya *perovskite*. Untuk mengurangi oksidasi, digunakan agen pasivasi, aditif, lapisan pelindung dan pemrosesan suhu rendah. Penelitian yang dilakukan oleh Jiang dkk mendapatkan efisiensi sebesar 12,6% dengan memanfaatkan kombinasi kation dan halida dengan sedikit Pb dan lapisan pasivasi organik (Xianyuan Jiang dkk., 2021).

### d. Alternatif Bahan Elektroda Belakang

*Back-electrode* yang sering kali digunakan pada *Perovskite Solar Cell* (PSC) adalah logam karena memiliki konduktivitas dan reflektifitas cahaya yang bagus. Penggunaan emas (Au) dan perak (Ag) sebagai back-electrode telah menghasilkan efisiensi yang tinggi, namun bahan tersebut mengalami degradasi yang tinggi dan harga yang relatif lebih mahal dibandingkan bahan elektroda belakang lainnya. Peneliti menemukan bahan alternatifnya seperti aluminium (Al), tembaga (Cu) dan nikel (Ni).

Bahan aluminium cocok digunakan sebagai elektroda belakang khususnya pada PSC dengan struktur inverter karena memiliki konduktivitas listrik yang tinggi dan biayanya yang relatif lebih murah dibandingkan emas dan perak. Penggunaan aluminium sebagai elektroda dalam PSC pertama kali dilakukan oleh You dkk dengan struktur perangkat yang terdiri dari substrat/ITO/PEDOT:PSS/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ /PCBM/Al. Hasilnya memperoleh PCE dengan nilai 11,5% untuk perangkat yang dibuat pada substrat keras dan 9,2% pada substrat fleksibel (Y. Yang dkk., 2014).

Harga bahan yang relatif rendah, konduktivitas listrik dan ketahanan oksidasi yang baik membuat tembaga (Cu) banyak digunakan sebagai bahan elektroda. Bahan Cu sebagai elektroda belakang diteliti oleh Zhao dkk dimana elektroda belakang diterapkan dalam PSC struktur inverter. PCE yang didapatkan adalah sebesar 23,2% untuk PSC berstruktur p-i-n berlapis yang menggunakan zat pereduksi *benzyl hydrazine hydrochloride* (BHC)(Zhao dkk., 2016).

Selain bahan aluminium dan tembaga, bahan nikel juga digunakan sebagai elektroda belakang karena efisiensi dan fungsi kerjanya yang hampir mendekati emas namun dengan ketebalan yang lebih besar daripada emas (Assi, Saleh, & Mohajerani, 2021). Penelitian yang dilakukan oleh Ku dkk dengan menggunakan film nikel mesoporus untuk PSC telah menghasilkan PCE sebesar 13,6% (Ku dkk., 2015).

### e. Capaian Efisiensi Sel Surya *Perovskite*

Efisiensi sel surya *perovskite* menunjukkan perkembangan sejak pertama kali ditemukan. Pada awal-awal penelitian tentang sel surya *perovskite* yang dilakukan oleh Kojima dkk, PCE yang dicapai hanya sebesar 3,81% (Kojima dkk., 2009). Pada tahun 2011, material  $\text{MAPbI}_3$  digunakan oleh Im dkk

dalam pembuatan sel surya *perovskite* yang menghasilkan efisiensi sebesar 6,54% (J. H. Im dkk., 2011). Pada tahun 2012, Kim dkk mengembangkan Sel Surya Mesoskopik Film Tipis Submikron All-Solid-State tersensitasi Timbal Iodida *Perovskite* dengan Efisiensi 9,7% (Kim dkk., 2012). Tidak lama setelah itu, Lee dkk mengembangkan hybrid solar cell yang berbasis *perovskite* Meso-Superstructured Organometal Halide dan mencapai PCE sampai 10,9% (M. M. Lee dkk., 2012).

Sel surya berbahan *perovskite* terus mengalami kemajuan yang cukup pesat dalam beberapa tahun terakhir, dengan peningkatan efisiensi yang tinggi tiap tahunnya (lihat tabel 1). Efisiensi sel surya *perovskite* melampaui 15% pada tahun 2014, yang menunjukkan potensi besar dalam pengembangan *perovskite* sebagai bahan sel surya. Pada tahun 2016, efisiensi nya mengalami kenaikan menjadi 18% dan 20% pada tahun 2017 (S. Liu dkk., 2023). Penelitian terakhir dilakukan pada tahun 2022 oleh Jiang dkk yang memberikan efisiensi sebesar 25,5% (Q. Jiang dkk., 2022). Efisiensi sel surya *perovskite* yang diperoleh telah mendekati nilai efisiensi pada bahan silikon. Pada tahun yang sama, yaitu 2022, dengan struktur tandem, sel surya *perovskite* mencapai PCE sebesar 26,4% (Lin dkk., 2022). Dalam Tabel 1 berikut ini diberikan beberapa penelitian tentang perkembangan bahan dan efisiensi dari panel surya *perovskite*.

Tabel 1. Perkembangan Efisiensi Sel Surya Perovskite

Struktur	Efisiensi (%)	Referensi
CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3</sub>	3,81	(Kojima dkk., 2009)
(CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> )PbI <sub>3</sub>	6,54	(J. H. Im dkk., 2011)
(CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> )PbI <sub>3</sub> dengan TiO <sub>2</sub> mesopori setebal submikron dan spiro-MeOTAD sebagai lapisan pengangkut elektron dan lubang	9,7	(Kim dkk., 2012)
Glass/FTO/TiO <sub>2</sub> /CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>2</sub> Cl with mesoporous oxide/Spiro-OMeTAD/Ag	10,9	(M. M. Lee dkk., 2012)
MAPbI <sub>3</sub> with mesoscopic TiO <sub>2</sub>	12	(Heo dkk., 2013)
Glass/FTO/TiO <sub>2</sub> /CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3-x</sub> Cl <sub>x</sub> /Spiro-OMeTAD/Ag	15	(M. Liu, Johnston, & Snaith, 2013)
ITO/PEIE/TiO <sub>2</sub> /CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3</sub> /Spiro-OMeTAD/Au	19,3	(H. Zhou dkk., 2014)
Glass/ITO/PEDOT:PSS/CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3-x</sub> Cl <sub>x</sub> /PCBM/Al	11,5	(Y. Yang dkk., 2014)
FTO/CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Ni	13,6	(Ku dkk., 2015)
FTO/NiO/FAPbI <sub>3</sub> /PCBM/LiF/Al	22,2	(W. S. Yang dkk., 2015)
ITO/MoO <sub>3</sub> /CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3</sub> /PCBM/Ag	13,1	(Tseng dkk., 2016)
ITO/PTAA/MAPbI <sub>3</sub> /Cu	23,2	(Zhao dkk., 2016)
FTO/CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3</sub> /Spiro-OMeTAD/Au	15,1	(Zheng dkk., 2017)
Planar <i>perovskite</i> solar cell FTO/c-TiO <sub>2</sub> /MA <sub>0.5</sub> FA <sub>0.5</sub> PbI <sub>3</sub> /Spiro-OMeTAD/Au	19,41	(He dkk., 2017)
MAPbI <sub>3</sub> -(BA) <sub>2</sub> (MA) <sub>n-1</sub> Pb <sub>n</sub> I <sub>3n+1</sub> 3D-2D PPPH	16,13	(T. Zhang dkk., 2018)
FAPbI <sub>3</sub>	18,61	(Wei dkk., 2018)
GA <sub>x</sub> FA <sub>1-x-y</sub> SnI <sub>3-y</sub> EDAI <sub>2</sub>	9,6	(Jokar dkk., 2019)
$\alpha$ -FAPbI <sub>3</sub> phase by doping with MDACl <sub>2</sub>	23,69	(Min dkk., 2019)
FAPbI <sub>3</sub> with Spiro-OMETAD as HTMs	24,82	(Jeong dkk., 2020)
FTO/TiO <sub>2</sub> /Mesoporous TiO <sub>2</sub> /DJ 2D-3D (FA <sub>0.85</sub> MA <sub>0.15</sub> )Pb(I <sub>0.85</sub> Br <sub>0.15</sub> ) <sub>3</sub> /Spiro-OMeTAD/Au	21,6	(Xiaoqing Jiang dkk., 2020)
2-TMABr-based 3D <i>perovskite</i>	20,8	(Sutanto dkk., 2021)
ITO/SnO <sub>2</sub> / <i>Perovskite</i> /Spiro-OMeTAD/Au with antisolvent-fumigated process	21,45	(Sajid dkk., 2021)
(MA)-free Cs <sub>0.05</sub> FA <sub>0.95</sub> PbI <sub>3</sub> with surface sulfidation treatment	23,5	(X. Li dkk., 2022)
ITO/NiO <sub>x</sub> /Cs <sub>0.05</sub> MA <sub>0.1</sub> FA <sub>0.85</sub> PbI <sub>3</sub> /2D layer/ETL/Ag	23,91	(Chen dkk., 2022)
Cs <sub>0.05</sub> (FA <sub>0.98</sub> MA <sub>0.02</sub> ) <sub>0.95</sub> Pb(I <sub>0.98</sub> Br <sub>0.02</sub> ) <sub>3</sub> and FcTc <sub>2</sub> surface treatment	24,5	(Z. Li dkk., 2022)
Glass/ITO/MeO-2PACZ/Rb <sub>0.05</sub> Cs <sub>0.05</sub> MA <sub>0.05</sub> FA <sub>0.85</sub> Pb(I <sub>0.95</sub> Br <sub>0.05</sub> ) <sub>3</sub> /LiF/C <sub>60</sub> /BCP/Ag	25,5	(Q. Jiang dkk., 2022)

All-perovskite tandem solar cells	26,4	(Lin dkk., 2022)
FA <sub>0,83</sub> CS <sub>0,17</sub> PbI <sub>3</sub> /CuPc-HTL	13,9	(Shen dkk., 2023)
2D perovskitoid (A <sub>6</sub> BfP) <sub>8</sub> Pb <sub>7</sub> I <sub>22</sub>	24,6	(C. Liu dkk., 2024)

### 3. Fabrikasi Sel Surya Perovskite

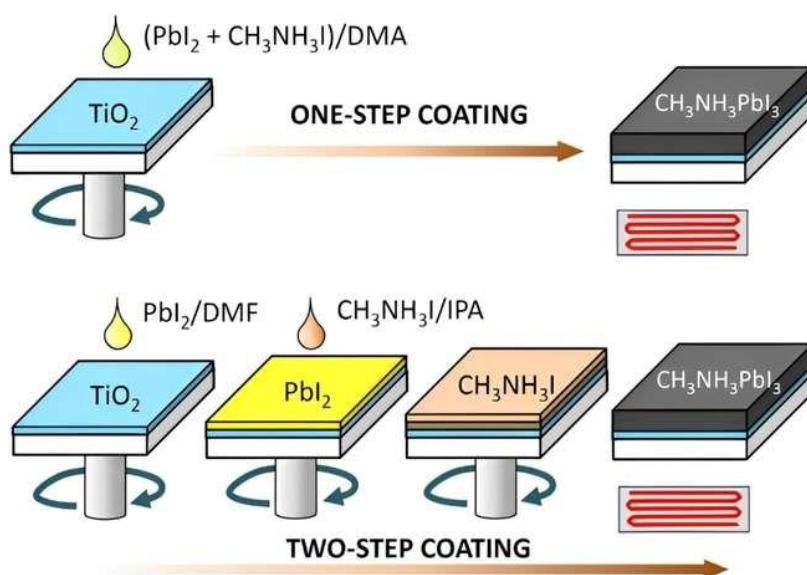
#### a. Solution Deposition Methods

Teknik deposisi ini berbasis larutan yang menggunakan beberapa teknik dan menghasilkan besar efisien yang berbeda-beda yaitu spin coating, doctor blading, spray coating dan lainnya. Pemilihan teknik deposisi dapat disesuaikan dengan mempertimbangkan ukuran dan efisiensi yang dibutuhkan.

##### 1) Spin Coating

*Spin coating* menjadi teknik yang paling umum digunakan dalam proses fabrikasi sel surya *perovskite*. Hal tersebut dikarenakan teknik spin coating menjadi teknik yang sederhana dan dianggap hemat biaya oleh para peneliti dalam mendepositikan lapisan *perovskite* secara beragam pada PSCs (Afre & Pugliese, 2024). Spin coating biasa digunakan untuk pembuatan sel surya dalam ukuran kecil sekitar 0,1 – 1 cm<sup>2</sup> (Srivastava dkk., 2023).

Terdapat *one-step* dan *two-step* pada proses ini, pada *one-step* campuran bahan PbX<sub>2</sub> dan AX dilarutkan dalam pelarut polar aprotik seperti DMF dan DMSO, lalu larutan prekursor *perovskite* disebarluas melalui *spin coating* ke substrat. Kemudian pada *two-step*, thin film yang dihasilkan pada *one-step* didepositikan dengan melakukan sintesis dua prekursor yang berbeda secara terpisah, hal ini dilakukan untuk meningkatkan efisiensi pada *perovskite* (Jung & Park, 2015). Proses pelapisan *perovskite* secara *one-step* dan *two-step* untuk film CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> dapat dilihat pada gambar 3. PbI<sub>2</sub> dan CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>I dicampurkan dalam N,N-dimetilasetamida (DMA), yang dilapisi dengan metode spin-coating dan dipanaskan untuk pelapisan satu tahap. Kemudian, untuk pelapisan dua tahap larutan N,N-dimetilformamida (DMF) yang dilarutkan dalam PbI<sub>2</sub> dilapisi dengan metode spin-coating pada substrat, dikeringkan terlebih dahulu, lalu larutan isopropil alkohol (IPA) yang dilarutkan dalam CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>I dilapisi dengan metode spin-coating pada substrat yang dilapisi PbI<sub>2</sub> (J.-H. Im, Kim, & Park, 2014).



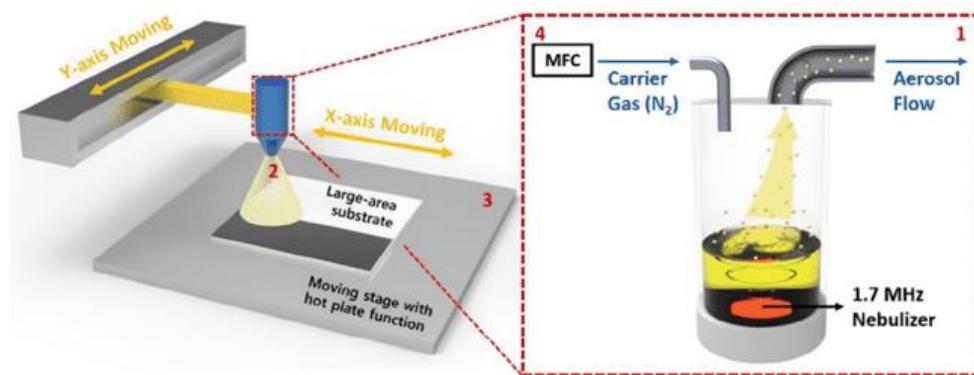
Gambar 3. (a) proses pelapisan *one-step* dan (b) *two-step* untuk deposisi film CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> (J.-H. Im dkk., 2014)

Untuk mendapatkan lapisan *perovskite* yang terkristalisasi baik dilakukan dengan *thin film* yang dipanaskan setelah proses *spin coating*. Meskipun modul sel surya yang dihasilkan hanya berukuran kecil tetapi modul ini memiliki efisiensi yang cukup tinggi. Namun teknik *spin coating* ini sulit mendapatkan *thin film* yang seragam pada area yang lebih besar dan kecepatan proses yang lambat, membuatnya tidak cocok untuk produksi PSC dalam skala besar (Jung & Park, 2015).

## 2) Spray Coating

*Spray coating* umum digunakan dalam industri untuk menghasilkan *perovskite* dalam ukuran yang cukup besar. Dalam teknik ini, terdapat sebuah *nozzle* yang digunakan untuk menyebarkan tetesan cairan ke substrat dan lauran akan diubah menjadi tetesan kecil pada atomizer yang kemudian disemprotkan ke substrat. Saat tetesan bertemu dan melebur sehingga akan terbentuk film basah dan film tipis padat akan terbentuk setelah pelarut menguap (Ma & Zhao, 2021). Proses ini dapat diklasifikasikan berdasarkan metode atomisasi, seperti penyemprotan pneumatik, ultrasonik, atau elektrostatik.

*Spray coating* menjadi salah satu teknik yang cukup kompleks karena terdapat beberapa parameter yang perlu diperhatikan agar mendapatkan lapisan yang seragam seperti ukuran tetesan, jenis *nozzle*, viskositas, laju aliran melalui *nozzle* dan tegangan permukaan larutan (Afre & Pugliese, 2024). Variasi ukuran tetesan dapat dilakukan dengan beberapa metode yaitu penyemprotan pneumatik (melalui aliran gas cepat), penyemprotan ultrasonik (melalui getaran ultrasonik) dan penyemprotan elektro (melalui repulsi listrik). Pada umumnya teknik *spray coating* ini menggunakan penyemprotan pneumatik dan ultrasonik untuk deposisi lapisan oksida padat. Untuk membentuk film *perovskite* pada substrat yang luas, biasanya digunakan megasonic spray coating, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 4 (D. K. Lee & Park, 2022).

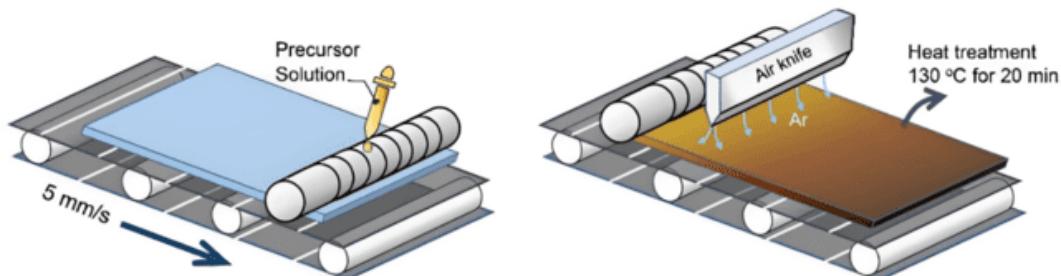


Gambar 4. Megasonic spray coating untuk pembentukan film perovskite area luas (M. Park dkk., 2019)

Pembuatan film *perovskite* dengan *spray coating* terbukti efektif untuk memproduksi sel surya volume tinggi dan prosesnya cukup cepat. Untuk membuat film *perovskite* dengan penggunaan spray coating dapat melakukan eksperimen yang berhasil mencapai efisiensi sebesar 11% (Afre & Pugliese, 2024).

## 3) Doctor Blading

Proses *doctor blading* atau dikenal sebagai *blade coating* dengan meneteskan larutan prekursor *perovskite* pada substrat, kemudian menggerakan pisau kaca secara linier dengan kecepatan tinggi. Untuk mendapatkan film *perovskite* yang halus dan seragam disarankan menggunakan suhu yang tinggi (Afre & Pugliese, 2024). Mengatur celah antara pisau dan substrat, konsentrasi prekursor dan kecepatan pergerakan pisau dapat menghasilkan kristalisasi dan ketebalan film yang diinginkan (C. C. Zhang dkk., 2018). Skema dari proses pembuatan film *perovskite* menggunakan teknik *doctor blading* bisa dilihat pada gambar 5.



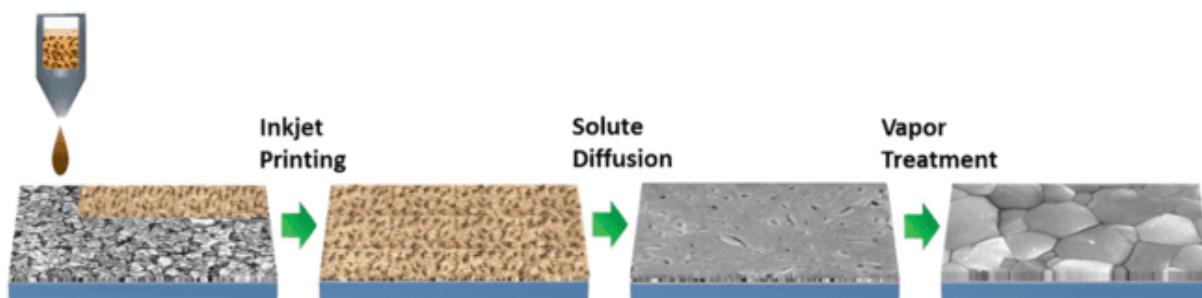
Gambar 5. Skema proses doctor blading (D. K. Lee, Jeong, Ahn, & Park, 2019)

Beberapa penelitian telah menunjukkan keberhasilan teknik ini dalam mencapai efisiensi tinggi pada PSC, bahkan dengan menggunakan variasi dalam komposisi larutan prekursor dan struktur perangkat (W. S. Yang dkk., 2015). Selain itu, teknik ini memungkinkan produksi PSC dengan area besar dengan efisiensi yang dioptimalkan, menjadikannya metode yang menarik untuk penelitian dan pengembangan sel surya (Tang dkk., 2018).

#### 4) Inkjet Printing

Seperti teknik deposisi pada *spin coating*, *inkjet printing* ini dilakukan dengan proses *one-step* dan *two-step*. Teknik ini dilakukan dengan prinsip rongga mikrofluida yang digunakan untuk menembakkan tetesan tinta melalui *nozzle* dengan presisi, seperti yang bisa dilihat pada gambar 6. Efisiensi Konversi Energi yang dihasilkan dapat mencapai lebih dari 17,04% dan 13,27% untuk perangkat dengan luas 0,04 cm<sup>2</sup> dan 4 cm<sup>2</sup> (Ma & Zhao, 2021).

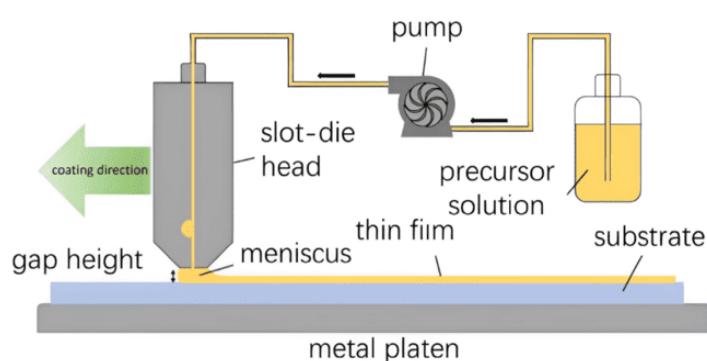
Teknik ini menawarkan biaya yang rendah dibandingkan teknik yang lain, penggunaan bahan yang efisien dan resolusi tinggi sehingga memungkinkan mendapatkan kualitas yang stabil dan tahan lama dalam skala yang cukup baik (Peng dkk., 2017). Namun, teknik ini membutuhkan waktu yang lama jika dilakukan deposisi pada area yang luas dan tidak cocok untuk produksi area besar bervolume tinggi sehingga masih harus dioptimalkan untuk memenuhi persyaratan lapisan berkecepatan tinggi dalam proses manufaktur berkualitas tinggi.



Gambar 6. Ilustrasi fabrikasi PSC melalui Inkjet Printing (P. Li dkk., 2018)

#### 5) Slot-Die Coating

*Slot-Die Coating* juga menjadi salah satu teknik yang paling menjanjikan untuk memproduksi PSC dalam skala yang besar melalui strategi roll-to-roll (Gong dkk., 2020). Seperti yang bisa dilihat pada gambar 7, teknik deposisi *slot-die coating* dilakukan menggunakan pisau dengan wadah tinta untuk menyebarkan larutan di atas substrat.



Gambar 7. Ilustrasi proses Slot-die coating perovskite (Whitaker dkk., 2018)

Meskipun mirip dengan *doctor blading*, *slot-die coating* ini menghasilkan film *perovskite* yang lebih berkualitas dan membutuhkan volume larutan yang lebih besar (Roy dkk., 2020). Akan tetapi, kedua teknik tersebut terbukti efektif untuk deposisi *perovskite* dengan hasil yang seragam, bahkan terdapat penelitian yang menggabungkan kedua teknik tersebut sebagai strategi dalam meningkatkan efisiensi deposisi *perovskite*, termasuk dengan pengoptimalan suhu dan proses *quenching* (Cotella dkk., 2017).

Penggunaan teknik *slot-die coating* dapat mencegah kontaminasi prekursor yang disebabkan oleh isolasi larutan yang memberikan keunggulan dalam hal kualitas film dan rippetabilitas. Selain itu, teknologi ini menunjukkan tingkat pemanfaatan larutan yang tinggi dan menunjukkan toleransi yang lebih besar terhadap viskositas, konsentrasi, dan komposisi larutan, sehingga dapat menyesuaikan ketebalan film dengan memvariasikan konsentrasi larutan pendahulu (Howard dkk., 2019).

### b. Vapor Deposition Methods

Terdapat beberapa *Vapor Deposition Methods* atau metode deposisi berbasis uap seperti *Physical Vapor Deposition* (PVD) dan *Chemical Vapor Deposition* (CVD). Metode uap telah dikembangkan untuk fabrikasi film *perovskite* berukuran besar dan membutuhkan pengendalian yang ketat terhadap berbagai faktor, seperti laju deposisi, suhu, dan dekomposisi bahan organik halida (D. K. Lee & Park, 2022). Proses ini membutuhkan peralatan vakum yang canggih dan waktu yang dibutuhkan lebih lama dari teknik larutan, namun dapat menghasilkan film *perovskite* dengan kualitas yang tinggi. *Vapor Deposition Methods* adalah proses di mana bahan-bahan yang diuapkan di bawah tekanan hampa (Ansari dkk., 2018).

#### 1) Physical Vapor Deposition (PVD)

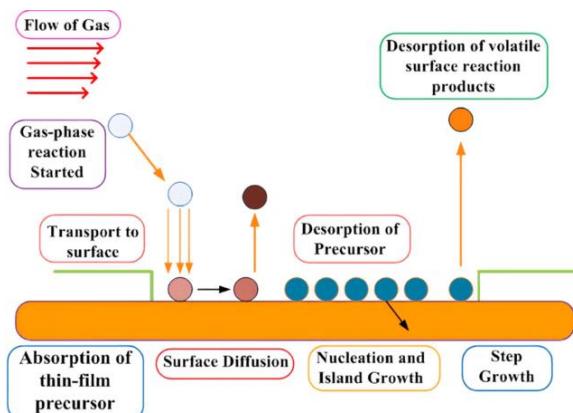
Teknik yang umum digunakan adalah deposisi fisik uap (PVD) yang terdiri dari berbagai metode deposisi film didalamnya seperti penguapan, deposisi ablasi laser, deposisi busur vakum, dan berbagai mode deposisi sputter fisik (Afre & Pugliese, 2024).

Proses PVD biasanya melibatkan atom individu atau gugus atom kecil yang jarang ditemukan dalam fase gas. Atom-atom ini biasanya diambil dari sumber padat atau cair, kemudian dilewatkan melalui ruang yang dihisap dan menumbuk pada permukaan padat tempat mereka menempel dan membentuk film. Atom-atom dapat dihilangkan dari sumber aslinya dengan memanaskan sumber (Afre & Pugliese, 2024).

Berbeda dengan *Chemical Vapor Deposition* (CVD), PVD menggunakan sumber utama spesies yang diendapkan dalam bentuk padat atau cair (bukan dalam bentuk gas) dan dilakukan pada tekanan uap yang jauh lebih rendah dari tekanan kerja sistem deposisi. Terakhir, PSC yang dibuat melalui metode PVD menunjukkan PCE sebesar 15,4%, sehingga menunjukkan kelayakan penggunaan PVD untuk produksi PSC (Afre & Pugliese, 2024).

#### 2) Chemical Vapor Deposition (CVD)

*Chemical Vapor Deposition* (CVD) atau deposisi teknik kimia dilakukan dengan memanfaatkan reaksi kimia dari prekursor fase uap dengan bahan semikonduktor dan film tipis (Afre & Pugliese, 2024). Teknik CVD penguapan dan transportasi reaktan melalui aliran gas ke dalam reaktor untuk pembuatan film tipis *perovskite*. Reaksi terjadi di dalam reaktor dan prekursor yang terbentuk diangkut ke substrat, kemudian diserap ke permukaan substrat. Fragment yang tidak bereaksi dibuang dari reaktor untuk mengurangi ketidakmurnian (Raj, Kumar, & Anshul, 2023). Langkah-langkah dalam teknik CVD bisa dilihat pada gambar 8.



Gambar 8. Langkah-langkah dasar yang terlibat dalam teknik CVD (Raj dkk., 2023)

Pada beberapa penelitian juga menggunakan konversi CVD untuk mendepositkan film tipis FAPbI<sub>3</sub> pada substrat berukuran 5×5 cm<sup>2</sup> dan membuat modul 12 cm<sup>2</sup> dengan efisiensi 9%. bahan aluminium dan tembaga, bahan nikel juga digunakan sebagai elektroda belakang karena efisiensi dan fungsi kerjanya yang hampir mendekati emas namun dengan ketebalan yang lebih besar daripada emas (Assi dkk., 2021). Penelitian yang dilakukan oleh Ku dkk dengan menggunakan film nikel mesoporus untuk PSC telah menghasilkan PCE sebesar 13,6% (Ku dkk., 2015).

#### 4. Peluang dan Tantangan dalam Pengembangan Sel Surya *Perovskite*

Sel surya *perovskite* (PSC) telah muncul sebagai teknologi fotovoltaik yang menjanjikan karena dapat memberikan efisiensi konversi daya (PCE) yang melebihi 25% dalam skala laboratorium, yang bersaing dengan sel surya berbasis silikon sekaligus bisa menawarkan biaya material yang lebih rendah dan pemrosesan yang beragam (Hu dkk., 2024; J. Sun dkk., 2021). Kemajuan pesat ini telah memacu penelitian tentang potensi dari PSC, meskipun masih memiliki beberapa tantangan yang perlu diatasi.

*Perovskite* memiliki bandgap yang dapat disesuaikan antara 1,2 – 2,3 eV yang memungkinkan penyerapan cahaya yang optimal di seluruh spektrum cahaya dan penyesuaian untuk aplikasi tandem, khususnya dalam komposisi halida campuran seperti CsPbI<sub>3-x</sub>Br<sub>x</sub> (Hu dkk., 2024; M. Yang dkk., 2023). Selain itu, *perovskite* juga bisa diproduksi dengan teknik fabrikasi berbasis larutan seperti *blade coating*, *inkjet printing*, dan *slot-die coating* yang sangat menjanjikan untuk manufaktur *roll-to-roll* yang dapat diskalakan, yang sampai saat ini mencapai PCE 21% dalam perangkat cetak (Khorasani dkk., 2024; Samantaray dkk., 2022). Kemudian, *perovskite* juga bisa difabrikasi dalam substrat fleksibel, sehingga membuka peluang dalam produksi *building integrated photovoltaic* (BIPV) dan perangkat *wearable* (B. Sun, 2024). Dengan menggunakan teknologi terkini seperti proses penelitian dan pengembangan material baru yang dipandu dengan *machine learning* dan kontrol kristalisasi dengan *anti-solvent*, pengembangan formulasi *perovskite* yang stabil dapat dipercepat (Hering dkk., 2023; J. Sun dkk., 2021). Lebih jauh lagi, penggunaan lapisan HTL anorganik dan arsitektur nano-komposit 3D menunjukkan potensi untuk meningkatkan stabilitas perangkat dengan tetap mempertahankan efisiensi yang tinggi (H. H. Park, 2021; B. Sun, 2024).

Stabilitas jangka panjang tetap masih menjadi tantangan utama dalam pengembangan *perovskite*. *Perovskite* masih bisa terdegradasi di bawah kelembapan, panas, dan pencahaayaan yang berkepanjangan (Hu dkk., 2024; H. H. Park, 2021). Segregasi fase dalam komposisi halida campuran dan migrasi ion antarmuka juga memperburuk degradasi kinerja *perovskite* (Badillo & Degterev, 2023; M. Yang dkk., 2023). Kemudian masih ada kekhawatiran pada toksitas timbal sehingga memerlukan bahan alternatif seperti *perovskite* yang berbasis timah, meskipun saat ini bahan-bahan ini memiliki efisiensi dan stabilitas yang lebih rendah (Hu dkk., 2024; Mousavi dkk., 2022). Tantangan lain yang ditemukan dalam proses pengembangan *perovskite* sebagai sel surya komersil adalah peningkatan skala proses laboratorium ke produksi industri yang mana membutuhkan teknik deposisi tingkat lanjut seperti teknik *physical vapor deposition* (PVD) dan *spray pyrolysis* untuk manajemen cacat dan menghasilkan film yang lebih seragam (Khorasani dkk., 2024; Samantaray dkk., 2022).

#### IV. Kesimpulan

Sel surya *perovskite* telah mengalami kemajuan yang signifikan sejak pertama kali dikembangkan. Berbagai inovasi dalam struktur material *perovskite*, termasuk penggunaan bahan alternatif yang lebih ramah lingkungan, telah menunjukkan peningkatan efisiensi konversi daya yang signifikan hingga lebih dari 25%. Teknik fabrikasi yang semakin berkembang, seperti *spin-coating*, *doctor blading*, *spray coating*, *inkjet printing*, *slot-die coating*, dan *vapor deposition*, serta berbagai teknik optimasi yang dilakukan juga berkontribusi terhadap produksi sel surya *perovskite* dengan performa yang lebih baik dan potensi skalabilitas yang lebih tinggi. Namun, stabilitas jangka panjang, degradasi akibat faktor lingkungan, dan toksitas material merupakan masalah kritis yang masih memerlukan solusi tambahan. Meskipun demikian, peluang besar tetap terbuka, terutama dalam aplikasi seperti *Building-Integrated Photovoltaics* (BIPV), perangkat elektronik fleksibel, dan sistem agrivoltaik, yang menunjukkan bahwa sel surya *perovskite* memiliki potensi besar untuk mendukung transisi energi global menuju sumber energi yang lebih bersih dan berkelanjutan.

### Daftar Pustaka

- Afre, R. A., & Pugliese, D. (2024, Februari 1). Perovskite Solar Cells: A Review of the Latest Advances in Materials, Fabrication Techniques, and Stability Enhancement Strategies. *Micromachines*, Vol. 15. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/mi15020192>
- Aftab, S., Nawaz, T., & Bilal Tahir, M. (2021, Desember 1). Recent development in shape memory based perovskite materials for energy conversion and storage applications. *International Journal of Energy Research*, Vol. 45, hlm. 20545–20558. John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/er.7151>
- Ansari, M. I. H., Qurashi, A., & Nazeeruddin, M. K. (2018, Juni 1). Frontiers, opportunities, and challenges in perovskite solar cells: A critical review. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, Vol. 35, hlm. 1–24. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2017.11.002>
- Assi, A. A., Saleh, W. R., & Mohajerani, E. (2021). Effect of Metals (Au, Ag, and Ni) as Cathode Electrode on Perovskite Solar Cells. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 722(1). IOP Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/722/1/012019>
- Badillo, P. D., & Degterev, A. E. (2023). Perspectives on Perovskite Solar Cells Under the Glass of Characterization and Model-based Research. *2023 XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*, 277–280. IEEE. <https://doi.org/10.1109/SCM58628.2023.10159103>
- Bahtiar, A., & Sartika, Y. (2019). PENGARUH VOLUME LARUTAN METILAMONIUM TIMBAL IODIDA ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ) TERHADAP KINERJA SEL SURYA PEROVSKITE STRUKTUR MESOPORI TANPA LAPISAN TRANSPOR HOLE (HTL-FREE) BERBASIS KARBON. Dalam *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika* (Vol. 03).
- Chen, H., Teale, S., Chen, B., Hou, Y., Grater, L., Zhu, T., ... Sargent, E. H. (2022). Quantum-size-tuned heterostructures enable efficient and stable inverted perovskite solar cells. *Nature Photonics*, 16(5), 352–358. <https://doi.org/10.1038/s41566-022-00985-1>
- Cotella, G., Baker, J., Worsley, D., De Rossi, F., Pleydell-Pearce, C., Carnie, M., & Watson, T. (2017). One-step deposition by slot-die coating of mixed lead halide perovskite for photovoltaic applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 159, 362–369. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.09.013>
- Gong, C., Tong, S., Huang, K., Li, H., Huang, H., Zhang, J., & Yang, J. (2020). Flexible Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells Fabricated via Sequential Roll-to-Roll Microgravure Printing and Slot-Die Coating Deposition. *Solar RRL*, 4(2). <https://doi.org/10.1002/solr.201900204>
- He, X., Guo, P., Wu, J., Tu, Y., Lan, Z., Lin, J., & Huang, M. (2017). Hybrid perovskite by mixing formamidinium and methylammonium lead iodides for high-performance planar solar cells with efficiency of 19.41%. *Solar Energy*, 157, 853–859. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.09.014>
- Heo, J. H., Im, S. H., Noh, J. H., Mandal, T. N., Lim, C. S., Chang, J. A., ... Seok, S. Il. (2013). Efficient inorganic-organic hybrid heterojunction solar cells containing perovskite compound and

polymeric hole conductors. *Nature Photonics*, 7(6), 486–491.  
<https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.80>

Hering, A. R., Dubey, M., & Leite, M. S. (2023). Emerging opportunities for hybrid perovskite solar cells using machine learning. *APL Energy*, 1(2). <https://doi.org/10.1063/5.0146828>

Howard, I. A., Abzieher, T., Hossain, I. M., Eggers, H., Schackmar, F., Ternes, S., ... Paetzold, U. W. (2019). Coated and Printed Perovskites for Photovoltaic Applications. *Advanced Materials*, 31(26). <https://doi.org/10.1002/adma.201806702>

Hu, Q., Xiong, Y., & Xu, Z. (2024). Perovskite photovoltaic effect and its application on solar cell. *Applied and Computational Engineering*, 60(1), 63–68. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/60/20240836>

Im, J. H., Lee, C. R., Lee, J. W., Park, S. W., & Park, N. G. (2011). 6.5% efficient perovskite quantum-dot-sensitized solar cell. *Nanoscale*, 3(10), 4088–4093. <https://doi.org/10.1039/c1nr10867k>

Im, J.-H., Kim, H.-S., & Park, N.-G. (2014). Morphology-photovoltaic property correlation in perovskite solar cells: One-step versus two-step deposition of CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>. *APL MATERIALS*, 2(8). <https://doi.org/10.1063/1.4891275>

Jeong, M., Woo Choi, I., Min Go, E., Cho, Y., Kim, M., Lee, B., ... Yang, C. (2020). *Stable perovskite solar cells with efficiency exceeding 24.8% and 0.3-V voltage loss*. Diambil dari <https://www.science.org>

Jiang, Q., Tong, J., Xian, Y., Kerner, R. A., Dunfield, S. P., Xiao, C., ... Zhu, K. (2022). Surface reaction for efficient and stable inverted perovskite solar cells. *Nature*, 611(7935), 278–283. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05268-x>

Jiang, Xianyuan, Zang, Z., Zhou, Y., Li, H., Wei, Q., & Ning, Z. (2021). Tin Halide Perovskite Solar Cells: An Emerging Thin-Film Photovoltaic Technology. *Accounts of Materials Research*, 2(4), 210–219. <https://doi.org/10.1021/accountsmr.0c00111>

Jiang, Xiaoqing, Zhang, J., Ahmad, S., Tu, D., Liu, X., Jia, G., ... Li, C. (2020). Dion-Jacobson 2D-3D perovskite solar cells with improved efficiency and stability. *Nano Energy*, 75. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104892>

Jokar, E., Chien, C., Tsai, C., Fathi, A., & Diau, E. W. (2019). Robust Tin-Based Perovskite Solar Cells with Hybrid Organic Cations to Attain Efficiency Approaching 10%. *Advanced Materials*, 31(2). <https://doi.org/10.1002/adma.201804835>

Jung, H. S., & Park, N. G. (2015, Januari 7). Perovskite solar cells: From materials to devices. *Small*, Vol. 11, hlm. 10–25. Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/smll.201402767>

Ke, W., & Kanatzidis, M. G. (2019, Desember 1). Prospects for low-toxicity lead-free perovskite solar cells. *Nature Communications*, Vol. 10. Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08918-3>

Ke, W., Stoumpos, C. C., Zhu, M., Mao, L., Spanopoulos, I., Liu, J., ... Kanatzidis, M. G. (2017). *A PLIED SCIENCE AND ENGINEERING Enhanced photovoltaic performance and*

*stability with a new type of hollow 3D perovskite {en}FASnI 3.* Diambil dari <https://www.science.org>

Khorasani, A., Mohamadkhani, F., Marandi, M., Luo, H., & Abdi-Jalebi, M. (2024). Opportunities, Challenges, and Strategies for Scalable Deposition of Metal Halide Perovskite Solar Cells and Modules. *Advanced Energy and Sustainability Research*, 5(7). <https://doi.org/10.1002/aesr.202300275>

Kim, H. S., Lee, C. R., Im, J. H., Lee, K. B., Moehl, T., Marchioro, A., ... Park, N. G. (2012). Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9%. *Scientific Reports*, 2. <https://doi.org/10.1038/srep00591>

Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., & Miyasaka, T. (2009). Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *Journal of the American Chemical Society*, 131(17), 6050–6051. <https://doi.org/10.1021/ja809598r>

Ku, Z., Xia, X., Shen, H., Tiep, N. H., & Fan, H. J. (2015). A mesoporous nickel counter electrode for printable and reusable perovskite solar cells. *Nanoscale*, 7(32), 13363–13368. <https://doi.org/10.1039/c5nr03610k>

Lee, D. G., Kim, M. cheol, Kim, B. J., Kim, D. H., Lee, S. M., Choi, M., ... Jung, H. S. (2019). Effect of TiO<sub>2</sub> particle size and layer thickness on mesoscopic perovskite solar cells. *Applied Surface Science*, 477, 131–136. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.124>

Lee, D. K., Jeong, D. N., Ahn, T. K., & Park, N. G. (2019). Precursor Engineering for a Large-Area Perovskite Solar Cell with >19% Efficiency. *ACS Energy Letters*, 4(10), 2393–2401. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.9b01735>

Lee, D. K., & Park, N. G. (2022, Maret 1). Materials and Methods for High-Efficiency Perovskite Solar Modules. *Solar RRL*, Vol. 6. John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/solr.202100455>

Lee, M. M., Teuscher, J., Miyasaka, T., Murakami, T. N., & Snaith, H. J. (2012). Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites. *Science*, 338(6107), 643–647. <https://doi.org/10.1126/science.1228604>

Li, P., Liang, C., Bao, B., Li, Y., Hu, X., Wang, Y., ... Song, Y. (2018). Inkjet manipulated homogeneous large size perovskite grains for efficient and large-area perovskite solar cells. *Nano Energy*, 46, 203–211. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.01.049>

Li, X., Zhang, W., Guo, X., Lu, C., Wei, J., & Fang, J. (2022). *Constructing heterojunctions by surface sulfidation for efficient inverted perovskite solar cells*. Diambil dari <https://www.science.org>

Li, Z., Li, B., Wu, X., Sheppard, S. A., Zhang, S., Gao, D., ... Zhu, Z. (2022). *Organometallic-functionalized interfaces for highly efficient inverted perovskite solar cells*. Diambil dari <https://www.science.org>

Lin, R., Xu, J., Wei, M., Wang, Y., Qin, Z., Liu, Z., ... Tan, H. (2022). All-perovskite tandem solar cells with improved grain surface passivation. *Nature*, 603(7899), 73–78. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04372-8>

- Liu, C., Yang, Y., Chen, H., Spanopoulos, I., Bati, A. S. R., Gilley, I. W., ... Kanatzidis, M. G. (2024). Two-dimensional perovskitoids enhance stability in perovskite solar cells. *Nature*, 633(8029), 359–364. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07764-8>
- Liu, M., Johnston, M. B., & Snaith, H. J. (2013). Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition. *Nature*, 501(7467), 395–398. <https://doi.org/10.1038/nature12509>
- Liu, S., Biju, V. P., Qi, Y., Chen, W., & Liu, Z. (2023, Desember 1). Recent progress in the development of high-efficiency inverted perovskite solar cells. *NPG Asia Materials*, Vol. 15. Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s41427-023-00474-z>
- Ma, Y., & Zhao, Q. (2021). A strategic review on processing routes towards scalable fabrication of perovskite solar cells. *Journal of Energy Chemistry*, 64, 538–560. <https://doi.org/10.1016/j.jec.2021.05.019>
- Min, H., Kim, M., Lee, S.-U., Kim, H., Kim, G., Choi, K., ... Seok, S. Il. (2019). *SOLAR CELLS Efficient, stable solar cells by using inherent bandgap of a-phase formamidinium lead iodide*. Diambil dari <http://science.sciencemag.org/>
- Mousavi, S. M., Hashemi, S. A., Yari Kalashgrani, M., Kurniawan, D., Gholami, A., & Chiang, W.-H. (2022). Bioresource-Functionalized Quantum Dots for Energy Generation and Storage: Recent Advances and Feature Perspective. *Nanomaterials*, 12(21), 3905. <https://doi.org/10.3390/nano12213905>
- Nair, S., Patel, S. B., & Gohel, J. V. (2020, September 1). Recent trends in efficiency-stability improvement in perovskite solar cells. *Materials Today Energy*, Vol. 17. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2020.100449>
- Park, H. H. (2021). Efficient and Stable Perovskite Solar Cells Based on Inorganic Hole Transport Materials. *Nanomaterials*, 12(1), 112. <https://doi.org/10.3390/nano12010112>
- Park, M., Cho, W., Lee, G., Hong, S. C., Kim, M. cheol, Yoon, J., ... Choi, M. (2019). Highly Reproducible Large-Area Perovskite Solar Cell Fabrication via Continuous Megasonic Spray Coating of CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>. *Small*, 15(1). <https://doi.org/10.1002/smll.201804005>
- Peng, X., Yuan, J., Shen, S., Gao, M., Chesman, A. S. R., Yin, H., ... Angmo, D. (2017, November 3). Perovskite and Organic Solar Cells Fabricated by Inkjet Printing: Progress and Prospects. *Advanced Functional Materials*, Vol. 27. Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/adfm.201703704>
- Raj, A., Kumar, M., & Anshul, A. (2023). Topical advances in fabrication technologies of perovskite solar cell heterostructures: Performance and future perspective. *Materials Letters*, 340, 134171. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134171>
- Roy, P., Kumar Sinha, N., Tiwari, S., & Khare, A. (2020, Maret 1). A review on perovskite solar cells: Evolution of architecture, fabrication techniques, commercialization issues and status. *Solar Energy*, Vol. 198, hlm. 665–688. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.080>
- Sajid, S., Khan, S., Khan, A., Khan, D., Issakhov, A., & Park, J. (2021). Antisolvent-fumigated grain growth of active layer for efficient perovskite solar cells. *Solar Energy*, 225, 1001–1008. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.015>

- Saleh, F., Hazaea, Z., Hazaea, Z. A. M., Ghaleb, A., & Murshed, F. (2023). Perovskite Solar Cells (PSCs): Definition, Structure, and Solar Cells Development. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7765612>
- Samantaray, N., Parida, B., Soga, T., Sharma, A., Kapoor, A., Najar, A., & Singh, A. (2022). Recent Development and Directions in Printed Perovskite Solar Cells. *physica status solidi (a)*, 219(6). <https://doi.org/10.1002/pssa.202100629>
- Shen, X., Gallant, B. M., Holzhey, P., Smith, J. A., Elmestekawy, K. A., Yuan, Z., ... Snaith, H. J. (2023). Chloride-Based Additive Engineering for Efficient and Stable Wide-Bandgap Perovskite Solar Cells. *Advanced Materials*, 35(30). <https://doi.org/10.1002/adma.202211742>
- Srivastava, A., Satrughna, J. A. K., Tiwari, M. K., Kanwade, A., Yadav, S. C., Bala, K., & Shirage, P. M. (2023). Lead metal halide perovskite solar cells: Fabrication, advancement strategies, alternatives, and future perspectives. *Materials Today Communications*, 35, 105686. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105686>
- Sun, B. (2024). Advances and Prospects of 3D Semiconductor Nanocomposite Materials for Solar Cells in Renewable Energy. *Applied and Computational Engineering*, 91(1), 21–26. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/91/20241107>
- Sun, J., Li, F., Yuan, J., & Ma, W. (2021). Advances in Metal Halide Perovskite Film Preparation: The Role of Anti-Solvent Treatment. *Small Methods*, 5(5). <https://doi.org/10.1002/smtd.202100046>
- Suresh Kumar, N., & Chandra Babu Naidu, K. (2021). A review on perovskite solar cells (PSCs), materials and applications. *Journal of Materomics*, 7(5), 940–956. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2021.04.002>
- Sutanto, A. A., Caprioglio, P., Drigo, N., Hofstetter, Y. J., Garcia-Benito, I., Queloz, V. I. E., ... Grancini, G. (2021). 2D/3D perovskite engineering eliminates interfacial recombination losses in hybrid perovskite solar cells. *Chem*, 7(7), 1903–1916. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2021.04.002>
- Tang, J., Jiao, D., Zhang, L., Zhang, X., Xu, X., Yao, C., ... Lan, Z. (2018). High-performance inverted planar perovskite solar cells based on efficient hole-transporting layers from well-crystalline NiO nanocrystals. *Solar Energy*, 161, 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.12.045>
- Tseng, Z. L., Chen, L. C., Chiang, C. H., Chang, S. H., Chen, C. C., & Wu, C. G. (2016). Efficient inverted-type perovskite solar cells using UV-ozone treated MoO<sub>x</sub> and WO<sub>x</sub> as hole transporting layers. *Solar Energy*, 139, 484–488. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.10.005>
- Vicente, J. R., & Chen, J. (2018). *Perovskite Solar Cells*. <https://doi.org/10.1081/E-ECHP-140000328>
- Wei, Q., Zi, W., Yang, Z., & Yang, D. (2018). Photoelectric performance and stability comparison of MAPbI<sub>3</sub> and FAPbI<sub>3</sub> perovskite solar cells. *Solar Energy*, 174, 933–939. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.057>
- Whitaker, J. B., Kim, D. H., Larson, B. W., Zhang, F., Berry, J. J., van Hest, M. F. A. M., & Zhu, K. (2018). Scalable slot-die coating of high performance perovskite solar cells. *Sustainable Energy & Fuels*, 2(11), 2442–2449. <https://doi.org/10.1039/C8SE00368H>

- Yang, M., Wang, H., Cai, W., & Zang, Z. (2023). Mixed-Halide Inorganic Perovskite Solar Cells: Opportunities and Challenges. *Advanced Optical Materials*, 11(20). <https://doi.org/10.1002/adom.202301052>
- Yang, W. S., Noh, J. H., Jeon, N. J., Kim, Y. C., Ryu, S., Seo, J., & Seok, S. Il. (2015). High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange. *Science*, 348(6240), 1234–1237. <https://doi.org/10.1126/science.aaa9272>
- Yang, Y., You, J., Hong, Z., Chen, Q., Cai, M., Song, T. Bin, ... Zhou, H. (2014). Low-temperature solution-processed perovskite solar cells with high efficiency and flexibility. *ACS Nano*, 8(2), 1674–1680. <https://doi.org/10.1021/nn406020d>
- Zhang, C. C., Wang, Z. K., Li, M., Liu, Z. Y., Yang, J. E., Yang, Y. G., ... Ma, H. (2018). Electric-field assisted perovskite crystallization for high-performance solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 6(3), 1161–1170. <https://doi.org/10.1039/c7ta08204e>
- Zhang, T., Long, M., Qin, M., Lu, X., Chen, S., Xie, F., ... Xu, J. bin. (2018). Stable and Efficient 3D-2D Perovskite-Perovskite Planar Heterojunction Solar Cell without Organic Hole Transport Layer. *Joule*, 2(12), 2706–2721. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.09.022>
- Zhao, J., Deng, Y., Li, T., Gruverman, A., Shield, J., & Huang, J. (2016). *Is Cu a Stable Electrode Material in Hybrid Perovskite Solar Cells for 30 Years Lifetime?*
- Zheng, L., Ma, Y., Wang, Y., Xiao, L., Zhang, F., & Yang, H. (2017). Hole Blocking Layer-Free Perovskite Solar Cells with over 15% Efficiency. *Energy Procedia*, 105, 188–193. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.300>
- Zhou, D., Zhou, T., Tian, Y., Zhu, X., & Tu, Y. (2018). Perovskite-Based Solar Cells: Materials, Methods, and Future Perspectives. *Journal of Nanomaterials*, Vol. 2018. Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2018/8148072>
- Zhou, H., Chen, Q., Li, G., Luo, S., Song, T. B., Duan, H. S., ... Yang, Y. (2014). Interface engineering of highly efficient perovskite solar cells. *Science*, 345(6196), 542–546. <https://doi.org/10.1126/science.1254050>