

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Sel Surya**

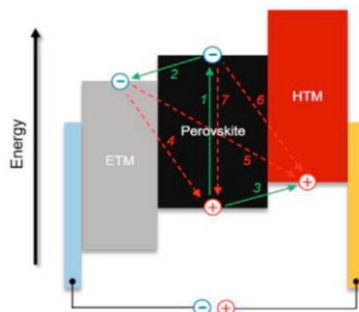
Sel surya adalah perangkat photovoltaik utama yang dapat memaksimalkan cahaya matahari dengan mengkonversi energi cahaya menjadi energi listrik. Sel surya merupakan potensi Energi Baru Terbarukan (EBT) yang dapat diaplikasikan dengan mudah, Indonesia sendiri memiliki iklim tropis yang membuat sel surya menjadi salah satu pilihan utama EBT untuk memenuhi kebutuhan listrik Indonesia yang naik setiap tahunnya 7-8% pertahun hingga pada tahun . Sel surya sendiri merupakan EBT yang tidak menghasikan polusi sehingga cocok untuk diaplikasikan pada lingkungan permukiman di Indonesia yang sudah padat. Untuk memenuhi kebutuhan akan sel surya yang aman, mudah diaplikasikan, serta murah maka para ilmuwan mengembangkan sel surya organik (Suseno dan Haryadi 2013)

Sel surya dikategorikan menjadi tiga generasi. Sel surya generasi pertama berbasis silikon tunggal, teknologi sel surya ini dapat menghasilkan *Power Conversion Efficiency* (PCE) yang sangat tinggi, tetapi pada teknologi sel surya ini memerlukan harga yang mahal untuk diproduksi secara massal sehingga menjadi tidak efisien untuk dijadikan EBT. Teknologi kedua generasi pertama menggunakan wafer silikon poli kristal dari *screen printing* jenis silikon poli kristal, pembuatan wafer silikon poli kristal ini dengan teknologi casting berupa balok silikon dan dipotong dengan metode *wire-sawing* menjadi kepingan sehingga

diproleh sel surya yang lebih murah walaupun tingkat efisiennya lebih rendah dibandingkan teknologi pertama. Sel surya generasi kedua berbasis film tipis, keuntungan pada generasi ini yaitu pada penggunaan bahan yang lebih murah dikarenakan pada pembuatanya hanya menggunakan kurang dari 1 % silikon dibandingkan dengan generasi pertama. Selain menggunakan silikon sel surya generai kedua ini juga menggunakan bahan semikonduktor lainnya seperti Cadmium Telluride (Cd Te) dan Copper Indium Gallium Selenide (CIGS) dengan efisiensi tertinggi hingga saat ini sebesar 19,5% (Jeon et al. 2014). Sel surya berbasis CdTe ini bila terbakar dapat menimbulkan polusi udara yang membahayakan sehingga menjadikan kekurangan dari generasi ini. Sedangkan sel surya generasi ketiga menggunakan struktur organik dari bahan polimer. Pada solar sel generasi ketiga ini foton yang datang tidak harus menghasilkan pasangan muatan seperti halnya pada teknologi sebelumnya melainkan membangkitkan exciton. Exciton inilah yang kemudian berdifusi pada dua permukaan bahan konduktor “yang biasanya di rekatkan dengan organik semikonduktor berada di antara dua keping konduktor” untuk menghasilkan pasangan muatan dan akhirnya menghasilkan efek arus foton (*photon current*). Bertahun-tahun, sel surya generasi pertama dan kedua telah digunakan, namun biaya tinggi, teknologi persiapan yang rumit, sifat yang tidak ramah lingkungan membatasi penggunaannya. Oleh karena itu, para ilmuwan mencari bahan sel surya baru yang hemat biaya dan bebas polusi. Hingga saat ini, sel surya berbasis silikon generasi ketiga mendominasi dengan *Persen Conversion efficiency* (PCE) yang besar sebesar 25-26%. Namun demikian, kelas baru sel surya generasi ketiga yang disebut sebagai sel surya perovskite merupakan alternatif untuk sel surya silikon yang dapat menunjukkan PCE sebesar 22,1% (Cho. 2017).

## 2.2. Sel Surya Perovskite

Sel Surya Perovskite (PSC) merupakan sel surya yang menggunakan bahan berstruktur perovskite sebagai lapisan aktif. PSC memiliki keunggulan dalam bahan dan pembuatannya yang mudah dan murah sehingga menarik untuk diaplikasikan secara komersial (Petrović & Ramakrishna, 2015). PSC memiliki *power conversion energi* (PCE) yang meningkat secara signifikan, hingga pada saat ini sel surya perovskite memiliki PCE 22,1% (Cho. 2017). Biasanya sel surya perovskit terdiri dari lapisan absorber (misalnya:  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{-Cl}_x$ ), yang disisipkan di antara lapisan pengangkut elektron (ETL) dan lapisan pengangkut lubang (HTL). Ketika absorber perovskite terkena cahaya, absorber memasukkan elektron dan *hole* ke dalam bahan pengangkut pembawa tipe-n dan tipe-p untuk menghasilkan pembawa muatan gratis. Elektron yang dihasilkan mencapai katoda dengan melakukan perjalanan melalui film berpori dan sirkuit eksternal. Juga, bagian padat dari material *hole transport layer* (HTM) memulihkan perovskit teroksidasi dan membantu mencapai keadaan dasar. Dengan demikian, lubang yang diperas ke HTM berdifusi ke arah elektroda lawan. Akhirnya, bergabung kembali dengan elektron dan memberikan arus. Generasi saat ini tergantung pada ketebalan bahan perovskite. Tingkat energi dan proses transfer muatan sel surya perovskite ditunjukkan pada Gambar 2.1.

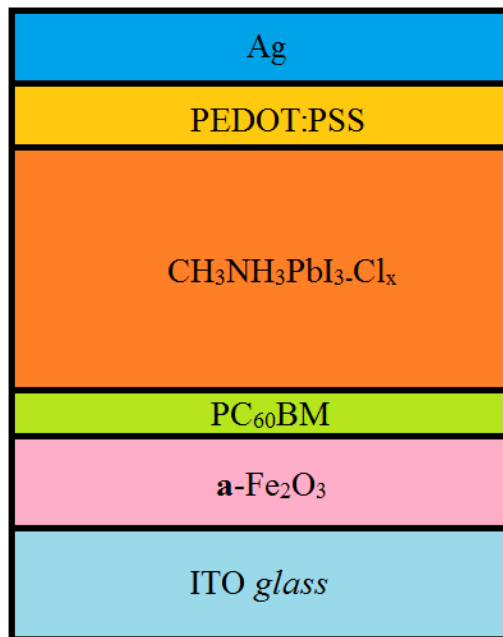


**Gambar 2.1** Tingkat energi dan proses transfer muatan pada sel surya perovskite (Ameen, 2018)

Proses pembuatan sel surya dapat dilakukan dengan beberapa metode sehingga dapat menghasilkan lapisan tipis yang diinginkan, metode yang digunakan antara lain adalah *spray coating*, *dip coating*, dan *spin coating*. Metode *spin coating* ini merupakan metode dengan proses yang cepat dan terkenal untuk fabrikasi PSC dengan cara membuat lapisan spin (Suarez dkk., 2014). Proses *spin coating* melibatkan pengendapan larutan pada substrat dengan rotasi yang cepat dan sangat konsekuen dengan pengeringan, yang akan menghasilkan pembentukan PSC (J. Yang, 2015). Ketebalan yang dihasilkan tergantung pada kecepatan putaran *spin coating*, suhu, dan viskositas larutan. Kelebihan dari metode ini adalah prosesnya yang cepat, rendah biaya, membuat lapisan tipis yang seragam, dan dapat membuat bahan yang berlapis-lapis pada substrat. Kelemahan pada metode ini adalah bahan yang digunakan sangat peka terhadap lingkungan sehingga merusak bahannya saat dilakukan *spin coating*.

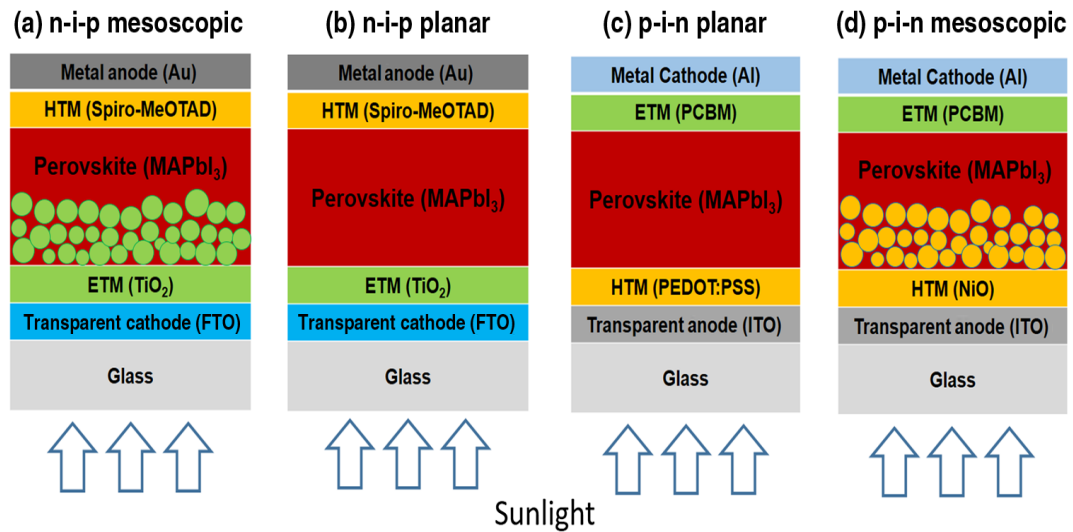
### **2.3. Lapisan-Lapisan Pada Solar Cell Perovskite**

Lapisan-lapisan pada perovskite solar cell memiliki peranan penting dalam peningkatan PCE. Lapisan yang dibentuk harus memiliki keselarasan energi yang baik sehingga dapat membuat mobilitas elektron dan hole semakin baik. Lapisan sel surya perovskite dapat dilihat pada gambar 2.2. Hal yang harus diperhatikan selanjutnya adalah bahan yang digunakan tidak merusak struktur sebelum atau sesudah lapisan ketika dideposisikan. Bahan yang digunakan seperti pelarut atau penggunaan lama dan tinggi temperatur saat treatment deposisi tidak merusak lapisan yang ada.



**Gambar 2.2.** Material yang digunakan pada sel surya perovskite

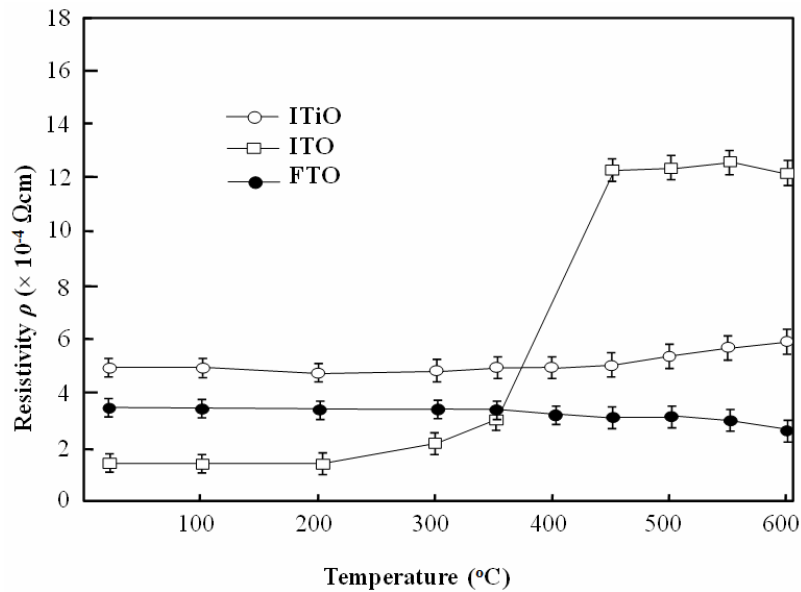
Terdapat dua arsitektur PSC yang umum digunakan yaitu mesoscopic dan planar. Perbedaan mendasar dari mesoscopic dan planar adalah terbentuk tidaknya pori pada perovskite. Pada arsitektur mesoscopic biasanya butir yang terbentuk lebih kecil yang dibatasi oleh ukuran pori. Pada arsitektur planar digunakan metode kristalisasi lebih cepat yang menghasilkan butiran yang lebih besar sehingga. Butir besar yang dibentuk membuat butir tunggal sehingga tidak ada pori yang terbentuk (Ivanisenko dkk, 2016). Terdapat dua konfigurasi struktur lapisan yang digunakan pada PSC yaitu n-i-p dan p-i-n, kedua struktur ini dapat digunakan arsitektur mesoscopic dan planar. Perbedaan dasar pada struktur n-i-p dan p-i-n adalah letak dari lapisan *Electron Transfer Layer* (ETL) dan *Hole Transfer layer* (HTL). Pada struktur n-i-p memiliki urutan lapisan TCO/ETM/Perovskite/HTM/Katoda (TCO: *Transparent Conductive Oxide*). Sedangkan pada konfigurasi p-i-n urutan lapisan yang digunakan adalah TCO/ETM/Perovskite/HTM/Katoda.



**Gambar 2.3** Susunan skematik lapisan sel surya perovskite(a) n-i-p mesoscopic, (b) n-i-p planar, (c) p-i-n planar, and (d) p-i-n mesoscopic. (Song dkk, 2016)

### 2. 3. 1 ITO *glass*

TRANSPARENT CONDUCTIVE OXIDE (TCO) merupakan substrat kaca (biasanya menggunakan material glass ataupun quartz) yang dilapisi oleh material konduktif. Secara umum, TCO yang digunakan pada pembuatan sel surya berbasis material organik yaitu *fluorine tin oxide* (FTO) dan indium tin oxide (ITO). Perbedaan yang mendasar dari ITO dan FTO terdapat pada *resistivity*. Dapat dilihat pada gambar 2.4 Data FTO memiliki *sheet resistivity* yang konstan dan cenderung menurun ketika temperatur semakin tinggi. sedangkan untuk ITO terdapat perubahan *resistivity* cukup signifikan pada temperatur 350-400°C. Hal ini lah yang menjadi dasar mengapa FTO lebih sering digunakan dibandingkan dengan ITO. Tetapi jika suhu yang digunakan tidak lebih dari 300°C maka penggunaan ITO lebih baik dibandingkan FTO dikarenakan memiliki *resistivity* lebih rendah.



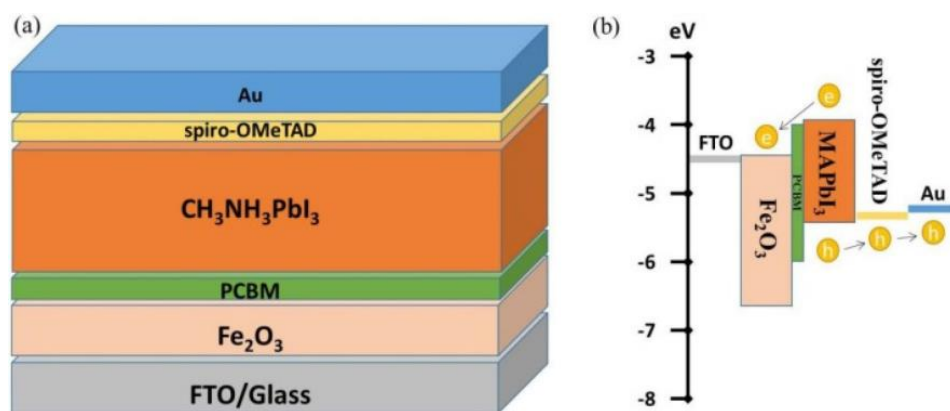
**Gambar 2.4** Resistivity dari ITiO, ITO, dan FTO glass

### 2.3.2 Electron Transport Layer (ETL)

*Electron transfer layer* (ETL) memainkan fungsi penting dalam mengekstraksi dan mengangkut elektron, memodifikasi antarmuka, menyelaraskan tingkat energi antarmuka dan meminimalkan rekombinasi muatan dalam sel surya perovskite. ETL memainkan peran penting dalam mengekstraksi dan mengangkut elektron dari lapisan perovskite ke katoda atau anoda. Pada saat yang sama, ETL juga memodifikasi antarmuka antara lapisan perovskite dan elektroda, meminimalkan kombinasi pengisian ulang. Bahan ETL dalam sel surya perovskite, seperti TiO<sub>2</sub>, tidak terlalu efisien untuk ekstraksi elektron pada antarmuka yang menyebabkan histeresis tegangan arus, dan bahan tersebut juga mengalami degradasi di bawah sinar UV. Bahan *ETL* yang efisien harus memiliki keselarasan tingkat energi yang sesuai dengan lapisan aktif perovskite, mobilitas

elektron yang tinggi untuk ekstraksi elektron dan struktur yang stabil untuk stabilitas jangka panjang. Material *Electron transfer layer* pada sel surya perovskite yang telah dipelajari selama ini terutama terbagi menjadi oksida logam, molekul organik dan dapat disinergikan material ETL menjadi multilayer sesuai dengan sifat materialnya.

Bahan *ETL* menunjukkan efek sinergis dalam meningkatkan kinerja perangkat dan stabilitas ambien dalam sel surya perovskite. Polimer dengan oksida logam dapat membentuk material transport elektron yang efisien. (Hou dkk, 2018) Lapisan transport elektron  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ PC<sub>60</sub>BM bilayer ini memperlambat rekombinasi muatan dan meningkatkan kerapatan arus hubung singkat dan efisiensi konversi daya. Perangkat berdasarkan bilayer  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ PC<sub>60</sub>BM menunjukkan peningkatan stabilitas dibandingkan dengan *single*  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sebagai lapisan transport elektron dan mempertahankan 95% dari nilai awalnya setelah 45 hari penyimpanan dalam gelap dengan udara lembab, struktur sel surya perovskite dapat dilihat pada gambar 2.3.

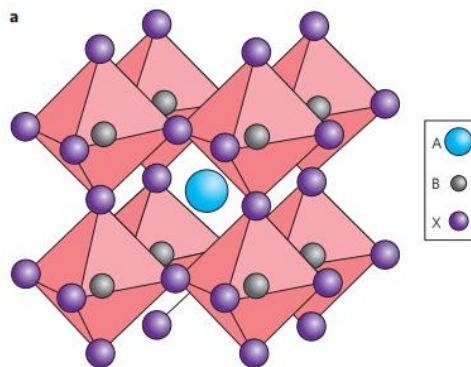


**Gambar 2.5** a) Struktur perangkat dan b) tingkat energi yang sesuai dari sel surya perovskite planar berbasis  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PC70BM. (Hou dkk, 2018)



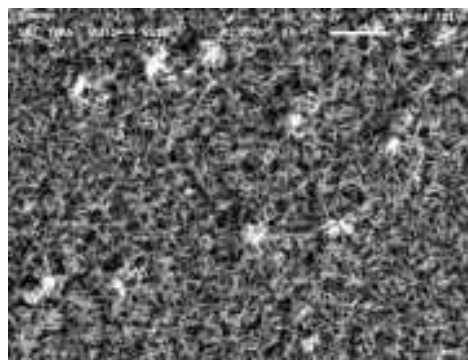
### 2.3.3 Perovskite

Perovskite adalah bahan yang dijelaskan dengan rumus  $ABX_3$ , di mana X adalah anion dan A dan B adalah kation dengan ukuran berbeda (A lebih besar dari B). Stabilitas kristalografi dan kemungkinan strukturnya dapat disimpulkan dengan mempertimbangkan faktor toleransi  $t$  dan faktor oktahedral di sini,  $t$  didefinisikan sebagai rasio jarak AX dengan jarak BX dalam model bola-padat ideal ( $t = (R_A + R_B) / \{\sqrt{2}(R_B + R_X)\}$ ), di mana  $R_A$ ,  $R_B$  dan  $R_X$  adalah jari-jari ionik dari ion-ion penampung bijih) dan didefinisikan sebagai rasio  $R_B/R_X$  (Green, 2014). Untuk layang-layang perov halida ( $X = F, Cl, Br, I$ ), umumnya  $0,81 < t < 1,11$  dan  $0,44 < \mu < 0,90$ . Jika  $t$  terletak pada kisaran yang lebih sempit  $0,89-1,0$ , struktur kubik dari Gambar 1a kemungkinan besar, dengan nilai  $t$  yang lebih rendah memberikan struktur tetragonal atau ortorombik yang kurang simetris. Terlepas dari kendala ini, transisi antara struktur seperti itu pada pemanasan umum terjadi untuk setiap perovskite tertentu, dengan fase suhu tinggi umumnya kubik.



**Gambar 2.6** Struktur Kristal Perovskite

Untuk perovskit halida organik-anorganik kation A yang lebih besar adalah organik umumnya metilamonium ( $\text{CH}_3\text{NH}_3^+$ ) dengan  $R_A = 0,18$  nm, meskipun etilamonium terkait ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{NH}_3^+$ ) ( $R_A = 0,23$  nm) dan formamidinium ( $\text{NH}_2\text{CH}=\text{NH}_2^+$ ) ( $R_A$  diperkirakan terletak di jangkauan 0,19–0,22 nm) juga memberikan hasil yang baik. Meskipun Bromin (Br) dan klorin (Cl) juga umum digunakan ( $R_X = 0.196$  nm dan 0,181 nm), biasanya dalam bahan campuran halida. Untuk sel yang efisien, kation B secara universal adalah Timbal (Pb) ( $R_B = 0.119$  nm); Sn ( $R_B = 0.110$  nm) membentuk senyawa serupa dengan celah pita yang lebih rendah, secara teoritis lebih ideal, tetapi stabilitas umumnya lebih rendah disebabkan oleh kemudahan oksidasi Timah (Sn) menjadi  $\text{SnI}_4$  dalam perovskit iodida; efek relativistik pada pasangan Pb dianggap memberikan perlindungan yang lebih besar terhadap oksidasi. Senyawa pola dasar dengan demikian adalah metilamonium timbal triiodida ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ) dengan campuran halida menjadi  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{-Cl}_x$  dan  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{-XB}_{rx}$  juga menjadi penting. Morfologi yang terbentuk juga menjadi bagian penting dari sel surya perovskite.



**Gambar 2.7** Mikrostruktur perovskite  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{-Cl}_x$  (Shirahata dan Oku 2018)

#### 2.3.4 *Hole Transport Layer (HTM)*

HTM berperan sebagai pengekstraksi pembawa lubang yang bermuatan positif dari lapisan perovskite dan mengantarkan ke elektroda. HTM pertama kali diadopsi di semua PSC *solid state*. HTM yang ideal harus memiliki mobilitas lubang yang tinggi, tingkat energi yang sesuai dengan lapisan perovskite, stabilitas jangka panjang di udara, serta baik dalam *photochemical* (Li dkk, 2021). HTM terbagi menjadi dua yaitu organik dan non organik. HTM anorganik memiliki keunggulan stabilitas yang baik, mobilitas lubang tinggi, biaya rendah, dan lain-lain. HTM anorganik seperti  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{CuI}$ ,  $\text{CuSCN}$ ,  $\text{NiO}_x$ , dan  $\text{MoS}_2$  memiliki kinerja yang baik. (Pitchaiya dkk, 2018) HTM organik ini mempunyai kelemahan ketidakstabilan, sintesis multi-langkah, dan lain-lain akan tetapi HTM ini digunakan di hampir semua PSC canggih, HTM organik digunakan di hampir semua PSC canggih. Pada saat ini spiro-OMeTAD merupakan HTM yang paling banyak digunakan untuk PSC dan memiliki performa tinggi, akan tetapi HTM ini memiliki kekurangan hanya dapat berfungsi secara efektif dalam kombinasi dengan beberapa aditif, seperti 4-tert-butylpyridine (tBP) dan garam lithium bis (trifluoromethane) sul fonimide (Li-TFSI). HTM organik seperti PEDOT:PSS merupakan alternatif dari Spiro-OmeTAD yang memiliki keunggulan dari preparasi yang sederhana dan histeresis yang rendah.

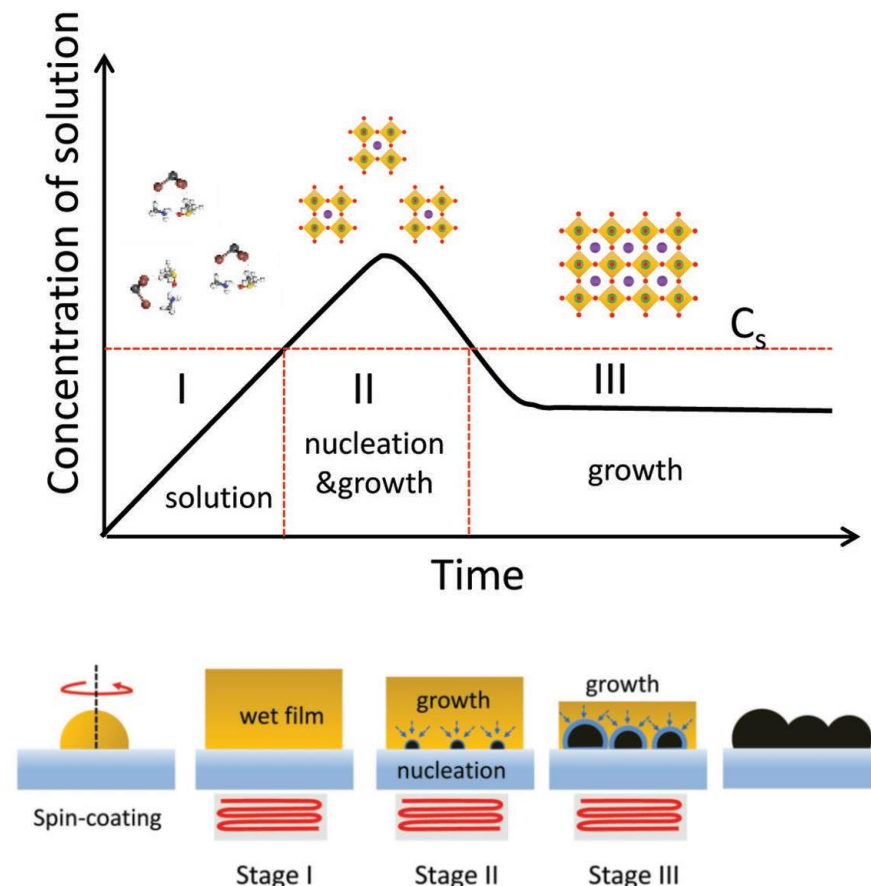
### 2.3.5 *Front elektroda (katoda)*

*Front* elektroda (katoda) memegang peranan penting sebagai transisi muatan listrik yang dihasilkan dari efek fotovoltaiik dimana material katoda berkontak dengan *back* elektroda (anoda) pada sirkuit eksternal dalam mengalirkan elektron dari ETL menuju HTM. Emas, perak, dan nikel merupakan bahan yang sering digunakan dalam pembuatan PSC. Perilaku logam berbeda melalui interaksi dan difusi lapisan, beberapa logam cenderung difusi di dalam lapisan transport lubang (HTL) dan mencapai lapisan perovskite dan kadang-kadang berinteraksi dengan komponen lapisan perovskite. Di bawah iluminasi AM1.5 standar, perangkat menunjukkan efisiensi konversi daya masing-masing sebesar 4,42%, 3,50%, dan 1,61% untuk elektroda Au, Ni dan Ag. Walaupun bukan yang terbaik, tetapi silver dapat menjadi pilihan utama sebagai elektroda untuk sel surya perovskite dalam hal pendekatan harga terhadap emas (Assi dkk, 2021). Lapisan katoda biasanya dilakukan deposisi menggunakan metode *thermal evaporate* supaya menghasilkan deposisi yang rapih dan presisi. Tetapi dikarenakan harga alat yang digunakan mahal maka proses ini dapat digantikan dengan metode *screen printing* (sablon).

## 2.4. Mekanisme Proses *Annealing* Pada Lapisan Perovskite

Mekanisme Lar Mer dapat diterapkan untuk memahami kristalisasi film perovskit selama proses larutan. Gambar 2.6 menunjukkan tiga tahap berbeda untuk kristalisasi film perovskit menurut mekanisme La Mer. Setelah pelapisan spin

film diikuti dengan perlakuan panas, konsentrasi larutan meningkat hingga mencapai konsentrasi lewat jenuh ( $C_s$ ), di mana pembentukan inti perovskit mulai terjadi pada tahap I. Pada tahap II, inti yang terbentuk tumbuh dengan pasokan zat terlarut melalui difusi sementara nukleasi terus terjadi. Karena konsumsi zat terlarut menjadi lebih cepat daripada penguapan pelarut, konsentrasi larutan menurun di bawah  $C_s$ , di mana hanya pertumbuhan inti yang terbentuk yang terjadi tanpa pembentukan inti tambahan pada tahap tahap III. Pertumbuhan kristal film perovskit dapat disetel dengan mengontrol nukleasi atau pertumbuhan (Lee dkk, 2019).



**Gambar 2.8** Model Lar Mer untuk nukleasi dan pertumbuhan film tipis perovskit dengan Ilustrasi skema nukleasi dan pertumbuhan film perovskit pada setiap tahap (Lee dkk 2019)

## **2.5. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kualitas Lapisan Perovskite**

### **2.5.1 Lingkungan saat proses *annealing***

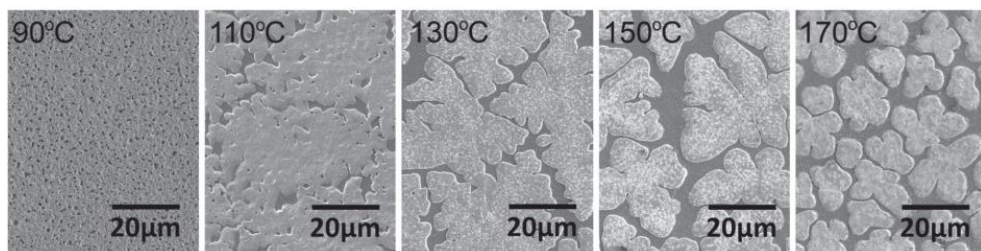
Lingkungan anil adalah merupakan faktor penting lainnya yang mempengaruhi proses *annealing*, di mana atmosfer yang berbeda mempengaruhi pembentukan film dan stabilitas perangkat. Perovskite dikenal sensitif terhadap air. Ketika kelembaban mencapai nilai tertentu, perovskiet organik-anorganik mudah terurai (degradasi). Oleh karena itu, persiapan perovskite biasanya dilakukan di bawah atmosfer gas inert menggunakan glove box.

### **2.5.2 Jumlah tahapan *annealing* yang digunakan**

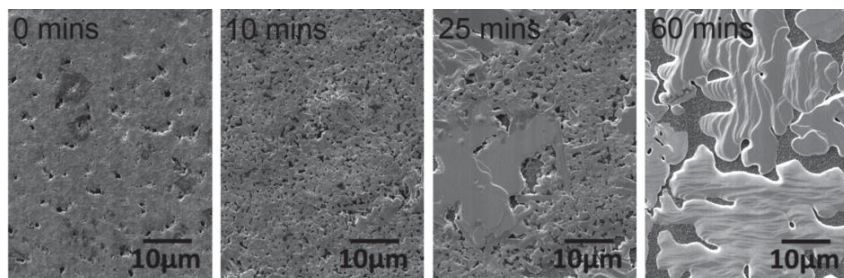
Perovskite setelah dideposisi maka dilanjutkan proses *annealing* yang bertujuan untuk menghilangkan pelarut dalam prekursor perovskite selain itu proses *annealing* juga dapat mempengaruhi pertumbuhan butir dan bentuk kristalin perovskite, sehingga pada proses ini temperatur berperang utama. Metode *annealing* pada perovskite dapat dilakukan dengan satu dan dua tahap. Pada *annealing* satu langkah substrat tahap di *spin coating* kemudian dianil untuk menghilangkan pelarut dan membentuk butir. Sedangkan pada *annealing* dua langkah dilakukan proses pemanasan bertahap dengan temperatur *annealing* pertama lebih rendah dibandingkan *annealing* kedua ini bertujuan untuk mendapatkan struktur fasa yang diinginkan (Zhao dkk, 2021).

### 2.5.3 Waktu dan temperatur *annealing*

Ketika dilakukan pengamatan mikroskopi menggunakan SEM dapat dilihat bahwa temperatur dan waktu sangat mempengaruhi morfologi dari perovskite yang telah dideposisikan. Dapat dilihat pada gambar a semakin banyak dan bertambah besar butir yang terbentuk kemudian bertansisi dari lapisan yang berbentuk kontinu menjadi pulau-pulau berpisah ketika temperatur *annealing* dinaikkan. Pada gambar b ketika dilakukan pengamatan sebelum dilakukan *annealing* dapat dapat dilihat morfologi yang terbentuk memiliki cakupan film yang tinggi dan terdapat pori-pori kecil. Kemudian ketika dilakukan *annealing* pada suhu 100°C dan dilakukan variasi waktu yang bertambah mengakibatkan pori-pori bertambah besar hingga variasi waktu 60°C (Eperon dkk, 2013).



( a )



( b )

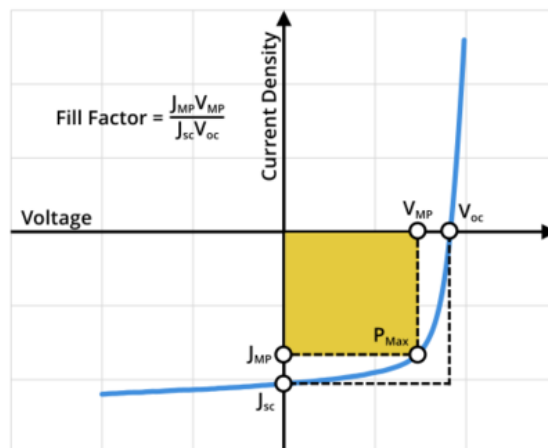
**Gambar 2.9** Pengaruh a) temperatur dan b) waktu *annealing* terhadap bentuk morfologi perovskite (eperon dkk, 2013)

## 2.6. Karakterisasi

Karakterisasi dilakukan supaya mendapatkan hasil yang kualitatif dan mengetahui sebab akibat dari hasil yang didapatkan. Pada kali penelitian ini menggunakan karakterisasi solar sistem I-V untuk mendapatkan nilai PCE, Uvis digunakan untuk mengetahui nilai absorbansi dari setiap lapisan, dan XRD dan SEM digunakan untuk mengetahui morfologi dan struktur padatan kristalin yang terbentuk.

### 2.4.1 Solar Sistem I-V

Pengukuran arus-tegangan (kurva IV) adalah pengukuran utama untuk mengkarakterisasi sel surya. Di sini, arus yang mengalir melalui perangkat diukur pada tegangan yang berbeda saat berada di bawah penerangan. Ada beberapa sifat utama yang dapat diekstraksi dari kurva I-V sel surya. Karakterisasi menggunakan solar I-V untuk mendapatkan nilai PCE sangat ditentukan oleh FF, Isc, dan Voc dari sebuah sel surya. Karakteristik arus-tegangan sebuah sel surya ketika disinari digambarkan seperti Gambar 2.10.



**Gambar 2.10** Contoh kurva I-V sel surya dengan properti yang disorot (ossila).



Dimana :

a. Rapat arus hubung singkat ( $J_{sc}$ ) adalah rapat arus fotogenerasi sel surya ketika tidak ada tegangan penggerak, dan dapat diekstraksi dari intersep dengan sumbu y.

b. Tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ) adalah tegangan di mana tegangan yang diterapkan membatalkan medan listrik bawaan, dan dapat diekstraksi dari intersep dengan sumbu-x.

c. Faktor pengisian (FF) adalah rasio daya keluaran aktual perangkat dengan dayanya jika tidak ada resistensi. Ini dapat dihitung dengan membagi output daya maksimum perangkat dengan produk  $J_{sc}$  dan  $V_{oc}$  (potensi daya maksimum).

d. Akhirnya, efisiensi konversi daya (PCE), rasio daya cahaya datang ( $P_{in}$ ) dengan daya listrik keluaran ( $P_{out}$ ), dapat dihitung. Efisiensi Konversi Daya (PCE) sel surya dapat dihitung dari rasio daya cahaya datang ( $P_{in}$ ) terhadap daya listrik keluaran ( $P_{out}$ ) menggunakan persamaan berikut:

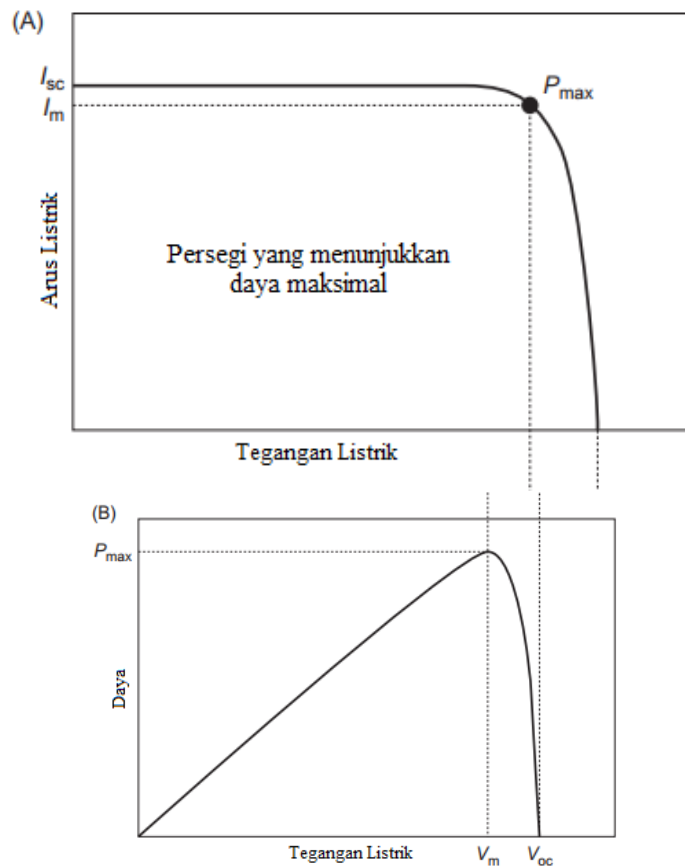
$$PCE = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{J_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P_{in}} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dapat dilihat pada gambar 2.8 terdapat daerah persegi berwarna kuning yang dapat digunakan untuk mencari nilai *fill factor* (FF) yang merupakan  $P_{max}$  yang dapat diperoleh dari sebuah sel surya dimana  $P_{max}$  setara dengan  $I_m$  dikali  $V_m$ . Jika sumbu (x,y) dari  $P_{max}$  ditarik garis lurus seperti pada gambar 2.11 maka akan menghasilkan nilai fill faktor yang dapat ditulis dengan persamaan.

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \dots \dots \dots (2.2)$$

Jika FF dimasukkan ke dalam persamaan 2.2 maka :

$$PCE = \frac{J_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{in}} \dots \dots \dots (2.3)$$



**Gambar 2.11** Grafik I-V sel surya (A) karakterisasi arus listrik terhadap tegangan listrik (I-V) dan (B) karakterisasi daya terhadap tegangan listrik. arus listrik maksimal, tegangan listrik maksimal, dan daya maksimal dilambangkan dengan  $I_m$ ,  $V_m$ , dan  $P_{max}$  secara berturut-turut (Markvart & Castañer, 2018).

### 2.4.2 Ultraviolet Visible Spectroscopy (UV-Vis)

UV-Vis Spectroscopy dapat digunakan dalam mengkarakterisasikan larutan dan film, dimana data yang dapat dihasilkan berupa absorbansi,

transmitansi, dan energi dari suatu material. Prinsip Spektrofotometer adalah dengan cara melewatkan cahaya dengan panjang gelombang tertentu pada suatu objek kaca (holder sampel) atau kuarsa yang disebut kuvet dengan panjang gelombang yang digunakan berkisar 190-1.100. Sebagian dari cahaya tersebut akan di serap dan sisanya akan dilewatkan. Nilai yang keluar dari cahaya yang diteruskan dinyatakan dalam nilai absorbansi karena memiliki hubungan dengan konsentrasi sampel. Hukum Lambeer menyatakan nilai absorbansi cahaya berbanding lurus dengan konsentrasi dan ketebalan bahan medium. Karakterisasi UV-Vis memiliki output grafik yang akan di bandingkan dengan teori yang digunakan. Dari data-data yang didapatkan dari UV-Vis maka dapat digunakan untuk mencari nilai *bandgap* dan ketebalan sampel.

*Band gap* (celah pita optik) dapat diidentifikasi menggunakan metode Tauc plot dengan persamaan :

$$(\alpha h\nu)^{\frac{1}{2}} = C (h\nu - E_g) \dots \dots \dots (2.4)$$

Dengan :  $\alpha$  = Absorbansi (abs)

$h$  = Konstanta plank ( $6,63 \times 10^{-34}$  J.s)

$h_0$  = Energi foton

$E_g$  = *Bandgap energy*

Untuk ketebalan sampel bisa diidentifikasi menggunakan metode Swanepoel (Dorranian *et al.*, 2012). Pertama, persamaan yang dibutuhkan adalah index refraksi yaitu:

$$n = (n + (n^2 - S^2)^{\frac{1}{2}})^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (2.5)$$

$$\text{Dengan } N = 2S \frac{(T_M - T_m)}{T_M T_m} + \frac{(S^2 + 1)}{2} \dots \dots \dots (2.6)$$

n = Index bias lapisan material

S = Index bias substrat (index biasa kaca = 1.51)

TM = Titik transmitansi maksimal

Tm = Titik transmitansi minimal

Setelah sudah mendapatkan nilai dari indeks bias n, kemudian lanjut ke tahap selanjutnya yaitu menentukan ketebalan sampel dengan persamaan :

$$d = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{2(\lambda_1 n_2 - \lambda_2 n_1)} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dengan :

d = Ketebalan sampel (nm)

$\lambda_1$  = Panjang gelombang di titik minimal (nm)

$\lambda_2$  = Panjang gelombang di titik maksimal (nm)

n1 = Index bias di titik minimal

n2 = Index bias di titik maksimal

### 2.4.3 X-Ray Diffraction (XRD)

Uji *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk mengidentifikasi fasa, komposisi fasa, dan struktur kristal yang terkandung. Sehingga dapat membuktikan bahwa sampel yang telah dibuat termasuk ke dalam bahan superkonduktor. Berdasarkan prinsip XRD, Sinar-X dihasilkan di suatu tabung sinar katode dengan pemanasan kawat pijar untuk menghasilkan elektron-elektron. Kemudian elektron-elektron tersebut terpancarkan

terhadap suatu target dengan memberikan suatu tegangan, dan menembak target dengan elektron. Ketika elektron-elektron mempunyai energi yang cukup untuk mengeluarkan elektron-elektron dalam target, karakteristik spektrum sinar- X dihasilkan. Prinsip dari XRD yaitu sinar-X dengan panjang gelombang tunggal akan ditembak ke sampel. Dengan mengubah sudut  $2\theta$  secara berkala, maka akan menghasilkan intensitas cahaya yang berbeda-beda setiap pergantian sudut (Leng, 2013). Intensitas yang dihasilkan dapat digunakan untuk mengetahui struktur kristal dengan cara membuat grafik intensitas berbanding sudut  $2\theta$  yang dibandingkan dengan database *International Centre for Diffraction Data (ICDD)*. Selain itu, ukuran kristalit dari suatu material dapat dihitung menggunakan persamaan Scherrer yaitu :

$$D = \frac{K \cdot \lambda}{\beta \cos \theta} \dots \dots \dots (2.8)$$

Dengan :

D = Ukuran kristalit (nm)

K = Konstanta Scherrer (0,9)

$\lambda$  = Panjang gelombang X-Ray yang digunakan (0,154184nm)

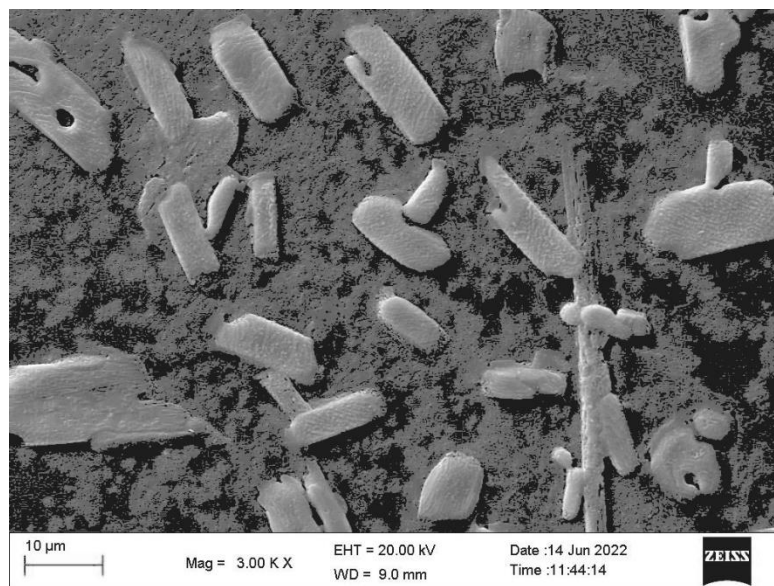
$\beta$  = Lebar grafik secara full pada setengah ketinggian puncak (FWHM)

$\theta$  = Sudut Bragg (derajat)

#### **2.4.4 Scanning Electron Microscopy (SEM)**

*Scanning Electron Microscopy (SEM)* dapat memperlihatkan morfologi sampel dengan baik yang memiliki prinsip sama dengan

mikroskop. Cara kerja SEM adalah menggunakan sinar elektron yang dipercepat dengan anoda dan difokuskan menuju sampel. Sinar elektron yang terfokus memindai keseluruhan sampel dengan diarahkan oleh koil pemindai. Ketika elektron mengenai sampel maka sampel akan mengeluarkan elektron baru yang akan diterima oleh detektor dan ditampilkan pada monitor. Intensitas elektron baru ini tergantung pada nomor atom unsur yang ada pada permukaan spesimen. Mikroskop elektron mampu mencapai resolusi sekitar 0,1-0,2 nm. Gambar yang didapatkan dapat digunakan untuk mengetahui *coverage* (persen permukaan yang terlapisi) dari suatu permukaan yang terbentuk menggunakan imagej. Persen *coverage* didapatkan dengan cara melakukan setting pada imagej untuk dapat mendeteksi bagian bawah dan atas dari suatu lapisan. Dapat dilihat pada gambar 2.10, gambar SEM dengan perbesaran 3000 yang sudah diolah dengan image J menghasilkan *coverage* sebesar 73,544%.



**Gambar 2.12** Gambar SEM yang sudah diolah dengan metode image J