

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

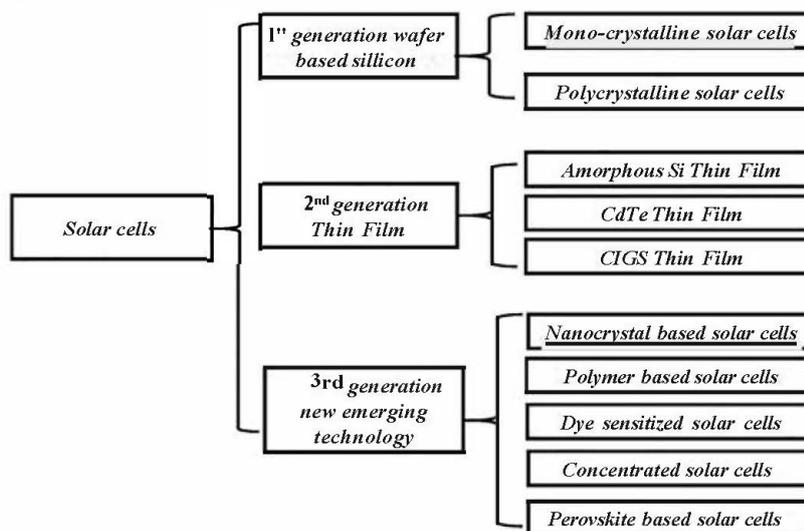
2.1 Sel Surya

Sel surya adalah perangkat *photovoltaik* utama yang dapat memaksimalkan cahaya matahari dengan mengonversi energi cahaya menjadi energi listrik. Sel surya sering disebut juga sebagai sel fotovoltaik (PV). Fotovoltaik dapat diartikan sebagai "cahaya-listrik". Sel PV bergantung pada efek fotovoltaik untuk menyerap energi dari matahari, yang kemudian menyebabkan arus listrik mengalir antara dua lapisan bermuatan yang memiliki polaritas yang berlawanan. Peran utama sel fotovoltaik adalah menerima radiasi matahari sebagai cahaya murni dan mengubahnya menjadi energi listrik dalam proses konversi yang disebut efek fotovoltaik. Tegangan listrik yang dihasilkan oleh sebuah sel surya sangat kecil, sekitar 0,6 V tanpa beban atau 0,45 V dengan beban. Untuk mendapatkan tegangan listrik yang besar sesuai keinginan diperlukan beberapa sel surya yang tersusun secara seri. Gabungan dari beberapa sel surya ini disebut Panel Surya atau modul surya. Komponen utama dalam mengubah energi sinar matahari menjadi listrik adalah absorben. Radiasi matahari terdiri dari berbagai jenis gelombang elektromagnetik sesuai dengan spektrumnya, sehingga diharapkan absorben dapat menyerap sebanyak mungkin radiasi matahari yang berasal dari cahaya matahari.

2.2 Perkembangan Sel Surya

Sel surya merupakan perangkat yang mengubah energi cahaya menjadi aliran listrik dengan memanfaatkan efek fotovoltaiik. Charles Fritts adalah orang yang pertama kali membuat sel surya pada tahun 1880-an. Pada tahun 1931, insinyur Jerman, Dr. Bruno Lange, mengembangkan sel surya menggunakan perak selenida sebagai pengganti tembaga oksida. Meskipun sel selenium awal ini hanya mampu mengubah kurang dari 1% cahaya menjadi listrik, penemuan ini dianggap penting oleh Ernst Werner von Siemens dan James Clerk Maxwell. Berlanjut dari penelitian Russel Ohl pada tahun 1940an, para peneliti Gerald Pearson, Calvin Fuller, dan Daryl Chapin berhasil menciptakan sel surya silikon pada tahun 1954. Pada saat itu, biaya sel surya ini mencapai 286 *dollar* AS per watt dengan efisiensi berkisar antara 4,5% hingga 6%. Seiring berjalannya waktu, efisiensi sel surya meningkat secara signifikan, melebihi angka 20%, dan efisiensi maksimum penelitian fotovoltaiik bahkan mencapai lebih dari 40%. Riset di bidang teknologi fotovoltaiik terus berlanjut, mendorong penemuan material inovatif dan metode produksi sel surya yang baru. Dalam sejarah evolusinya, dapat diidentifikasi empat generasi dalam pengembangan sel surya [3]. Generasi pertama yakni generasi dengan kategori yang mencakup berdasarkan teknologi sel fotovoltaiik silikon monokristalin, polikristalin, dan *gallium arsenide* (GaAs). Generasi kedua yakni generasi yang termasuk perkembangan dari generasi pertama teknologi sel fotovoltaiik, serta pengembangan sel fotovoltaiik film tipis teknologi dari *microcrystalline silicon* ($\mu\text{c-Si}$) dan *amorphous silicon* (a-Si), *copper indium gallium selenide* (CIGS) dan *cadmium telluride/cadmium sulfide* (CdTe/CdS) sel fotovoltaiik. Generasi ketiga yakni generasi ini menghitung teknologi fotovoltaiik

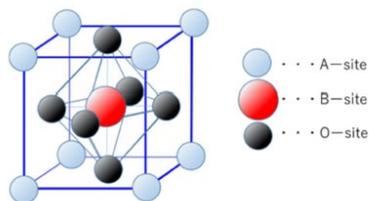
yang berbasis pada senyawa kimia yang lebih baru. Pada sel surya generasi ketiga juga menggunakan teknologi *nanocrystalline "film"*, seperti *quantum dots* yakni sel surya yang peka terhadap pewarna, sel surya berdasarkan *polimer* organik juga termasuk dalam generasi ini. Generasi keempat yakni generasi yang termasuk ke dalam fleksibilitas rendah atau biaya tipis yang rendah polimer *film* bersama dengan daya tahan “struktur nano anorganik yang inovatif seperti itu sebagai oksida logam dan nanopartikel logam atau bahan nano berbasis organik seperti *graphene*, *nanotube* karbon, dan turunan *graphene* [2]. Selain diklasifikasikan berdasarkan generasi, fotovoltaik dapat diklasifikasikan secara luas menjadi tiga kategori yaitu teknologi berbasis wafer, teknologi *thin film* konvensional, dan teknologi *emerging thin film*.



Gambar 2.1 Perkembangan Sel Surya [4]

2.3 Sel Surya *Perovskite*

Sel surya *perovskite* terdiri atas elektroda transparan yang biasanya berupa oksida konduktif. Terdiri atas beberapa lapisan seperti *electron transport layer* (ETL), lapisan penyerap atau biasa disebut sebagai *perovskite* yang terapat antara lapisan *transport* muatan, terdapat pula *hole transport layer* (HTL), serta terdapat *counter* elektroda dapat berupa logam. *Perovskite* pada mulanya ditemukan oleh Gustav Rose di Pegunungan Ural, Rusia pada tahun 1939 dengan komposisi kalsium titanium oksida (CaTiO_3). Penelitian lebih lanjut dilakukan pada tahun 1939 oleh seorang ahli mineral Rusia yaitu Count Lev Alekseevich Perovski (1772-1856) yang menjadikan material tersebut dinamai sebagai *Perovskite* [2]. Strukturnya berdasar pada struktur kubik yang terdiri dari tiga elemen sebagai ABX_3 seperti pada Gambar 2.2 [5]. Kristal *perovskite* oksida tersusun dari 2+ kation logam pada daerah A, 4+ kation logam pada daerah B, dan 2- anion oksigen pada daerah O. Kristal *perovskite* yang paling terkenal adalah CaTiO_3 dan BaTiO_3 . Setelah itu, Wells menemukan variasi kristal *perovskite* lain yang terdiri atas 1+ kation alkali (Cs^+ dan K^+), 2+ kation timbal (Pb^{2+}), dan 1- anion halogen (I^- , Br^- dan Cl^-) pada 1893. Sel surya *perovskite* telah menunjukkan efisiensi konversi daya yang kompetitif, dengan potensi kinerja lebih tinggi [6].



Gambar 2.2 Struktur *Perovskite* [5]

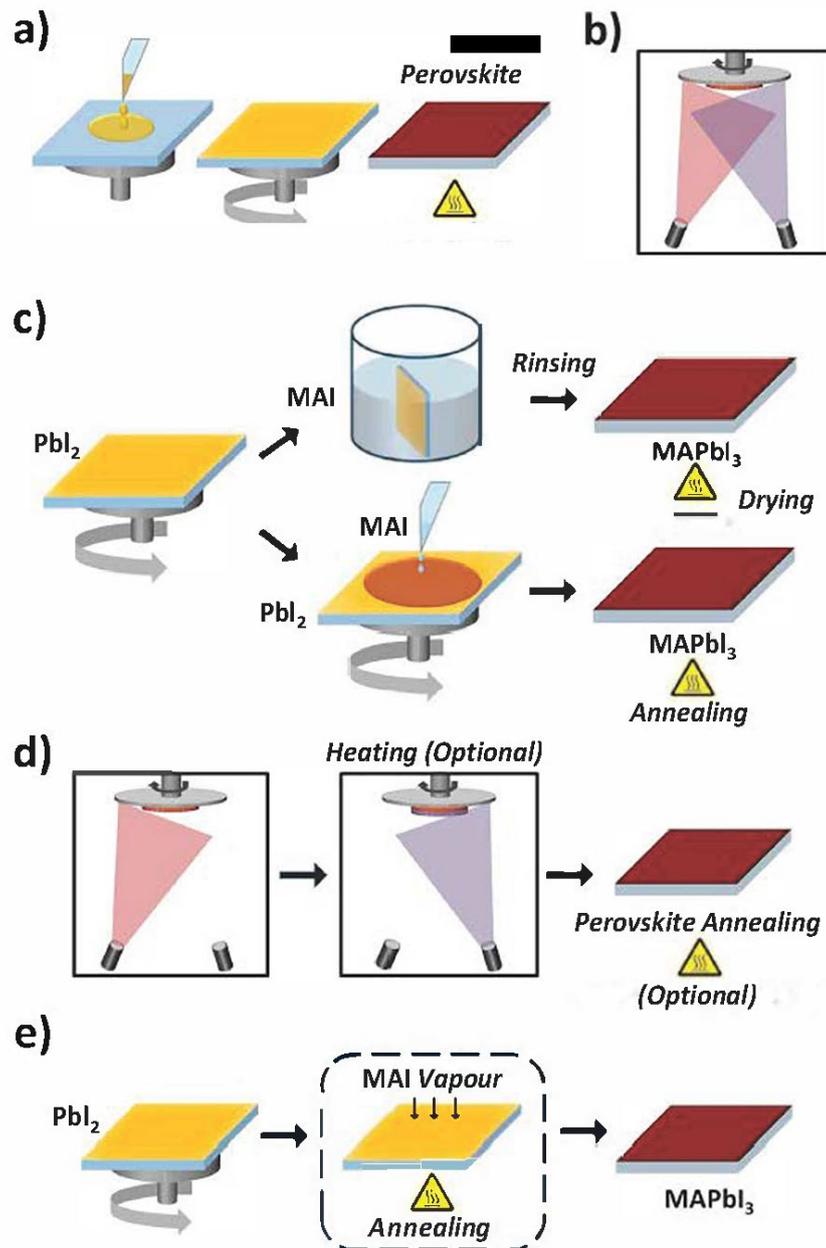
2.3.1 Penyerapan Cahaya dan Pembangkitan Muatan

Ketika cahaya matahari menghantam sel surya *perovskite*, foton (partikel cahaya) berinteraksi dengan bahan *perovskite*. Foton dengan energi yang cukup tinggi (lebih besar dari *band gap* material *perovskite*) dapat diserap oleh material tersebut. Energi yang terkandung dalam foton ini kemudian digunakan untuk menggerakkan elektron dalam material *perovskite*, meningkatkan energi elektron dari pita valensi (elektron terikat pada atom) ke pita konduksi (elektron bebas bergerak). menggerakkan elektron ini menghasilkan pasangan elektron-lubang. Elektron yang tereksitasi menjadi elektron bebas yang dapat bergerak dalam pita konduksi, sedangkan lubang yang ditinggalkan mewakili kekurangan elektron di pita valensi.

2.3.2 Pemisahan Muatan dan Aliran Arus Listrik:

Lapisan kontak selektif pada permukaan sel surya *perovskite* memainkan peran penting dalam memisahkan pasangan elektron-lubang yang dihasilkan. ETL memiliki afinitas elektron yang tinggi, sehingga menarik elektron dari pita konduksi *perovskite* ke elektroda negatif. Di sisi lain, lapisan HTL memiliki afinitas *hole* yang tinggi, sehingga mendorong lubang dari pita valensi *perovskite* ke elektroda positif. Pemisahan muatan ini menciptakan medan listrik internal dalam sel surya *perovskite*, yang mendorong aliran elektron dari elektroda negatif ke elektroda positif. Pergerakan elektron dari ETL ke elektroda negatif dan lubang dari HTL ke elektroda positif menghasilkan arus listrik. Arus listrik ini kemudian dapat digunakan untuk memberi daya pada perangkat elektronik atau diubah menjadi energi lain seperti energi kimia dalam baterai.

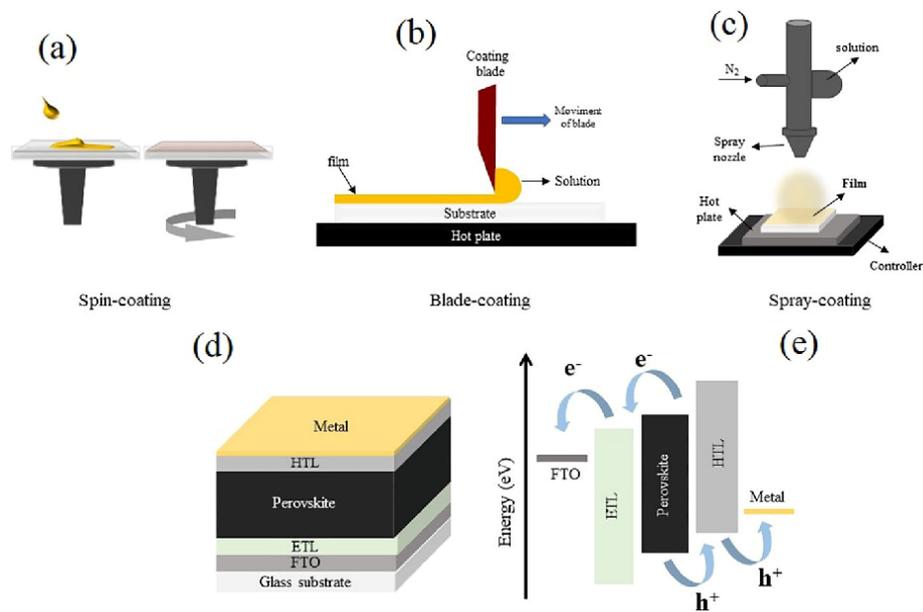
Proses pembuatan sel surya dapat dilakukan dengan beberapa metode sehingga dapat menghasilkan lapisan tipis yang diinginkan atau dapat disebut juga deposisi. Metode deposisi untuk lapisan *perovskite* dapat secara umum diklasifikasikan menjadi dua kelompok, yaitu metode deposisi larutan yang lebih umum digunakan dan metode deposisi uap yang kurang umum digunakan [6]. Metode deposisi larutan adalah metode yang melibatkan penggunaan larutan untuk mendepositkan material *perovskite*. Metode deposisi larutan ini terbagi menjadi dua jenis yakni *one step deposition* dan *sequential deposition*. *One step deposition* atau deposisi satu langkah adalah metode deposisi yakni kedua prekursor dicampur dalam larutan yang sama dan dideposisikan bersamaan. Sedangkan, *sequential deposition* (deposisi berurutan) adalah metode dimana salah satu prekursor dideposisikan terlebih dahulu, diikuti oleh prekursor lainnya. Ini bisa dilakukan dengan merendam substrat ke dalam larutan prekursor atau dengan menggunakan teknik *spin coating* pada prekursor yang lain. Metode deposisi uap mencakup beberapa teknik, termasuk *co-deposition*, *sequential deposition*, dan proses solusi bantu uap (*vapor-assisted solution process* - VASP). *Co-deposition* adalah metode di mana dua atau lebih bahan dideposisikan secara bersamaan dari fasa uap untuk membentuk lapisan *perovskite*. *Sequential deposition* adalah metode ini melibatkan deposisi prekursor secara berurutan, yaitu satu prekursor dideposisikan terlebih dahulu diikuti oleh deposisi prekursor lainnya. Sedangkan, *vapor-assisted solution process* (VASP) adalah proses di mana fasa uap digunakan untuk membantu proses larutan. Biasanya, lapisan yang dihasilkan adalah hasil dari interaksi antara larutan dan fasa uap. Ilustrasi metode deposisi sel surya dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3 Metode Deposisi Sel Surya 1 a) *Solution-Based One Step Method* b) *Co-Evaporation* c) *Solution-Based Two-Step Method* d) *Sequential Evaporation* e) *Vapor-Assisted Solution Process (VASP)*. [6]

Metode deposisi lain yang umum digunakan antara lain adalah *spray coating*, *dip coating*, dan *spin coating*. *Spray coating* adalah metode larutan atau suspensi bahan fotovoltaik disemprotkan secara merata pada substrat. Metode ini efisien dalam menutupi area yang luas dengan cepat. Metode *dip coating* adalah metode

deposisi substrat dicelupkan ke dalam larutan bahan fotovoltaik sehingga membentuk lapisan tipis saat ditarik keluar. Pendekatan ini memungkinkan pengendalian yang baik terhadap ketebalan lapisan. Sedangkan metode *spin coating* adalah metode deposisi bahan fotovoltaik diberikan pada substrat yang berputar dengan kecepatan tinggi. Proses ini menghasilkan lapisan tipis yang merata karena efek sentrifugal, dan kecepatan rotasi serta durasi putaran dapat diatur untuk mengontrol ketebalan lapisan dengan presisi.

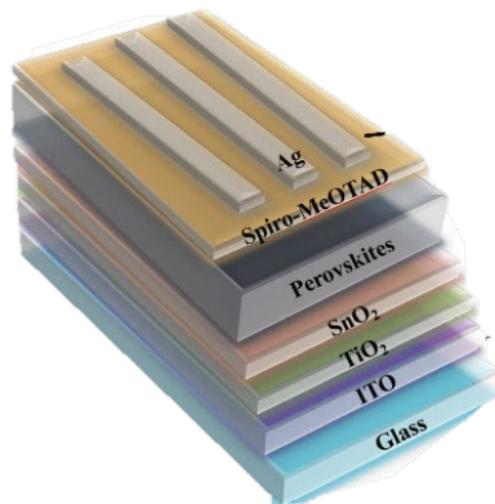


Gambar 2.4 Metode Deposisi Sel Surya 2 [7]

2.4 Lapisan-lapisan pada Sel Surya *Perovskite*

Lapisan-lapisan dalam *perovskite solar cell* memiliki peran sangat krusial untuk meningkatkan PCE. Dalam pembentukan lapisan, faktor utama yang perlu diperhatikan adalah menciptakan keselarasan energi yang optimal. Keselarasan energi yang baik pada lapisan-lapisan ini berkontribusi langsung terhadap peningkatan mobilitas elektron dan *hole*. Terdiri atas beberapa lapisan seperti ETL, lapisan penyerap atau biasa disebut sebagai *perovskite*, HTL, dan *counter*

elektroda dapat berupa logam [6]. Prinsip kerja sel surya adalah cahaya yang jatuh pada sel surya menghasilkan *elektron* yang bermuatan positif dan *hole* yang bermuatan negatif kemudian elektron dan *hole* mengalir membentuk arus listrik. Prinsip ini dikenal sebagai prinsip *photoelectric* [8].

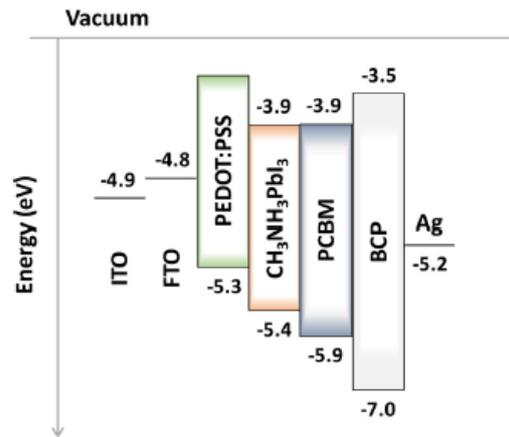


Gambar 2.5 Konfigurasi Penampang Sel Surya *Perovskite* [9]

2.4.1 *Transparent Conductive Oxide (TCO)*

Transparent conductive oxide (TCO) merupakan substrat kaca biasanya menggunakan material *glass* ataupun *quartz* yang dilapisi oleh material konduktif. Lapisan TCO sering dimanfaatkan sebagai elektroda pada perangkat sel surya karena memiliki sifat transparan yang dapat meneruskan cahaya dengan sangat baik (sekitar 90%) pada panjang gelombang cahaya tampak serta memiliki konduktivitas listrik yang tinggi. Terdapat beberapa jenis TCO yang dapat digunakan pada pembuatan sel surya *perovskite* seperti FTO dan ITO. Penggunaan ITO sebagai substrat kaca menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan FTO, terutama dalam nilai J_{SC} , hal ini disebabkan oleh resistansi listrik yang lebih rendah dan transmittansi yang lebih tinggi

dalam rentang panjang gelombang tertentu (460 nm hingga 750 nm). Pada gambar 2. Memerlihatkan terdapat perbedaan kecil pada band edges konduksi antara ITO dan FTO (sekitar 0,1 eV), hal ini tidak mempengaruhi tegangan buka (V_{oc}) ketika menggunakan lapisan PEDOT:PSS sebagai hole transport layer (HTL) [10].



Gambar 2.6 Perbedaan energi TCO jenis ITO dan FTO [10]

2.4.2 *Electron Transport Layer* (ETL)

Electron transport layer (ETL) biasanya dapat disebut sebagai lapisan ekstraksi elektron atau lapisan tempat elektron berkumpul. ETL memainkan fungsi penting dalam mengekstraksi dan mengangkut elektron, memodifikasi antarmuka, menyelaraskan tingkat energi antarmuka, dan meminimalkan rekombinasi muatan dalam sel surya *perovskite*. Performa dari perangkat sel surya dapat dipengaruhi oleh morfologi partikel ETL untuk membentuk lapisan *perovskite*. TiO_2 (*titanium dioxide*) adalah bahan yang umumnya digunakan sebagai ETL dalam sel surya *perovskite*. Sel surya *perovskite* menggunakan titanium dioksida (TiO_2) sebagai elektron transport layer (ETL) dalam sel surya *perovskite* memiliki beberapa kelebihan yakni sebagai berikut.

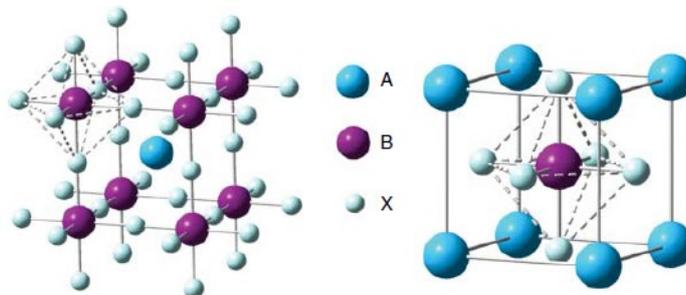
- a. TiO_2 memiliki efisiensi yang tinggi dalam mengangkut elektron sehingga meningkatkan kinerja sel surya *perovskite*
- b. TiO_2 memiliki stabilitas yang baik, yang memungkinkan sel surya *perovskite* dengan ETL TiO_2 untuk memiliki kinerja yang stabil dalam waktu yang lama
- c. Ketebalan lapisan TiO_2 mempengaruhi sifat optik dan listrik sel surya *perovskite*, dengan ketebalan lebih tipis yang membawa ke efisiensi yang lebih tinggi.

2.4.3 *Perovskite*

Perovskite merupakan bahan semikonduktor yang memiliki potensi besar untuk digunakan sebagai lapisan aktif dalam sel surya. *Perovskite* mampu menyerap cahaya matahari dengan berbagai panjang gelombang dan mengubahnya menjadi energi listrik. Ketika cahaya matahari mengenai *perovskite*, elektron tereksitasi dari valensi ke pita konduksi. Elektron ini kemudian bergerak menuju lapisan ETL yang bermuatan negatif, sedangkan lubang bergerak menuju lapisan HTL yang bermuatan positif. Perbedaan potensial antara ETL dan HTL menghasilkan aliran arus listrik ketika dihubungkan dengan sirkuit eksternal. *Perovskite* dipilih sebagai bahan utama dalam sel surya karena memiliki beberapa keunggulan signifikan dibandingkan bahan sel surya tradisional seperti silikon. *Perovskite* memiliki efisiensi konversi energi yang tinggi dan terus meningkat, mencapai lebih dari 25%. Kedua, proses produksi *perovskite* lebih murah dan sederhana, memungkinkan produksi sel surya dengan biaya yang lebih rendah. Ketiga, *perovskite* dapat dibuat menjadi sel surya yang fleksibel, membuka peluang

untuk aplikasi baru. Selain itu, *perovskite* juga memiliki toleransi terhadap cacat yang tinggi, sehingga memudahkan proses fabrikasi.

Perovskite ditemukan pada tahun 1839 oleh Gustav Rose dan dinamai menurut nama ahli mineralogi Rusia, Lew Alexejewitsch Perovski. *Perovskite* merupakan keluarga senyawa kristal yang memiliki struktur kristal mirip dengan mineral induk kalsium titanat (CaTiO_3). Kelas material ini umumnya digambarkan dengan rumus kimia ABX_3 . Pada struktur *perovskite* ABX_3 terdapat kation A yang bermuatan monovalent dengan ukuran besar, menempati situs koordinasi 12 di tengah kubus, dan membentuk kuboktahedron. Pada struktur *perovskite* juga terdapat Kation B bermuatan divalen dan berukuran lebih kecil yang membentuk oktahedra BX_6 yang berbagi sudut dalam kerangka *perovskite* 3D. Kompleksitas konfigurasi *perovskite* yang tinggi ini menyebabkan peningkatan efisiensi. Semakin kompleks *perovskite*, semakin tinggi fleksibilitas sifat fungsionalnya, yang bergantung pada struktur konfigurasi, morfologi *grain*, dan sifat optoelektronik. Pada gambar terdapat ilustrasi struktur *perovskite* kubik ideal ABX_3 . Pada Gambar 2.7 dijelaskan terdapat jaringan tiga dimensi yang terdiri dari oktahedra BX_6 yang saling berbagi sudut. Oktahedra BX_6 mengelilingi kation A yang berukuran lebih besar dan menempati posisi situs A.



Gambar 2.7 Struktur *Perovskite* Kubik Ideal ABX_3 [11]

Perovskite hibrida organik-anorganik menarik minat peneliti karena sifatnya yang luar biasa untuk aplikasi optoelektronika. Sifat tersebut meliputi koefisien absorpsi yang tinggi, waktu hidup *carrier* yang panjang, dan yang paling unik adalah toleransi *defect* yang tinggi, memungkinkan fabrikasi lapisan tipis yang mudah dan murah. Namun, untuk memenuhi persyaratan komersialisasi sel surya *perovskite* (PSC), stabilitas menjadi tantangan terpenting saat ini. Untuk memprediksikan kestabilan material *perovskite* maka harus diketahui faktor toleransi goldschmids. Faktor toleransi goldschmids membantu untuk mengetahui sejauh mana fleksibilitas Pemilihan unsur yang dapat menempati situs A, B, X dalam rumus kimia ABX_3 dalam rangka membentuk material *perovskite* yang stabil. Secara umum, faktor toleransi (t) memiliki nilai optimal antara $0,9 < t < 1$. Nilai ini didasarkan pada ukuran relatif kation A dan B terhadap anion X.

Salah satu material *perovskite* penyerap cahaya yang banyak digunakan adalah *methylammonium lead trihalide* ($MAPbX_3$). *Methylammonium lead iodide* ($CH_3NH_3PbI_3$, $MAPbI_3$) merupakan prototipe *perovskite* hibrida organik-anorganik. *Methylammonium lead iodide* merupakan material semikonduktor dengan celah pita langsung (*direct band gap*) sebesar 1,55 eV yang sesuai dengan *absorption onset* 800 nm, sehingga penyerap cahaya lebih efisien dibandingkan material lain [11]. Pada *methylammonium lead iodide* yang menempati kation $A = MA^+$ dan FA^+ , $B = Pb^{2+}$, dan $X = Cl^-, Br^-, I^-$.

2.4.4 Hole Transport Layer (HTL)

Hole transport layer (HTL) berperan sebagai lapisan penerima *hole* yang diekstraksi dari lapisan *perovskite* dalam sel surya. HTL menerima *hole*

ini dan menjadi bermuatan positif. Sifat-sifat yang ideal dari material HTL adalah keselarasan tingkat energi, konduktivitas pembawa muatan yang tinggi, kemampuan proses larutan yang baik, dan ketahanan terhadap kelembaban dan degradasi. Pada HTL keselarasan tingkat energi yang sesuai dengan material *perovskite* diperlukan agar transfer *hole* dapat terjadi dengan efisien. Pada konduktivitas pembawa muatan yang tinggi pada HTL diperlukan agar *hole* dapat bergerak dengan mudah dalam HTL. HTL juga diperlukan kemampuan proses larutan yang baik agar HTL dapat dibuat dengan mudah dan murah. HTL yang baik juga harus memiliki ketahanan terhadap kelembaban yang baik agar dapat stabil dan tahan lama. Salah satu material HTL yang banyak digunakan adalah Spiro-Ometad, yang memiliki konduktivitas lubang yang tinggi dan keselarasan tingkat energi yang baik dengan *perovskite*. Spiro-Ometad memungkinkan transfer lubang dari *perovskite* ke HTL dengan mudah dan efisien, serta memastikan bahwa transfer lubang terjadi dengan minimal kehilangan energi. Meskipun memiliki banyak kelebihan, Spiro-Ometad memiliki beberapa kekurangan seperti harga yang relatif mahal dan proses pembuatan yang kompleks.

2.4.5 *Electrode*

Material yang umum digunakan sebagai elektroda depan adalah emas (Au) dan perak (Ag) dengan metode evaporasi. Namun, metode evaporasi memiliki beberapa kekurangan, seperti membutuhkan energi dan biaya yang tinggi. Oleh karena itu, diperlukan metode alternatif yang lebih hemat energi dan biaya. Salah satu metode yang deposisi elektroda adalah metode sablon (*screen printing*) menggunakan pasta perak konduktor. Metode sablon

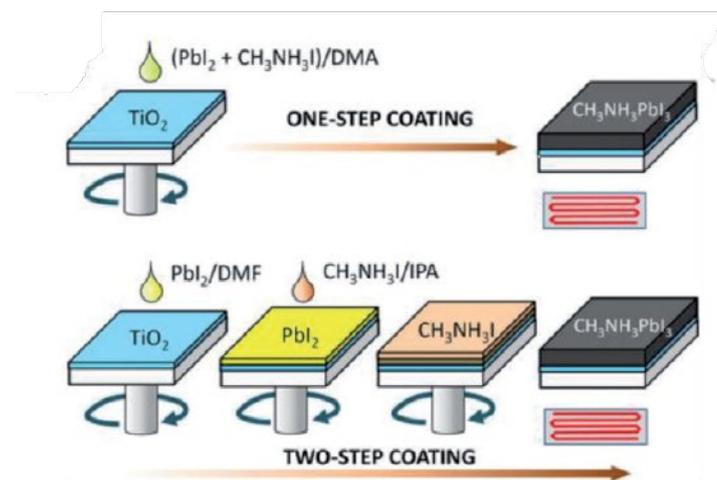
memiliki beberapa keunggulan dibandingkan evaporasi, seperti lebih hemat energi, lebih hemat biaya, peralatan dan bahan baku untuk sablon relatif lebih murah, serta proses yang lebih sederhana. Konduktivitas yang tinggi memungkinkan elektron mengalir dengan mudah, sedangkan ketahanan lama memperpanjang umur sel surya.

2.5 *Spin Coating*

Spin coating merupakan salah satu metode sintesis sel surya *perovskite*. *Spin coating* termasuk dalam kelompok metode *solution-chemistry approaches*, yakni pendekatan kimia yang melibatkan penggunaan larutan dalam proses persiapan atau sintesis material *perovskite*. Metode lain yang termaksud dalam *solution-chemistry approaches* adalah *anti-solvent crystallization* dan *inverse temperature crystallization* [12]. Proses tersebut memiliki keuntungan yaitu murah dan proses sintesisnya mudah. Proses *spin coating* melibatkan penyebaran larutan atau suspensi bahan fotovoltaik pada permukaan substrat yang berputar dengan kecepatan tinggi. Penggunaan gaya sentrifugal membuat bahan tersebut merata dan membentuk lapisan tipis dengan ketebalan yang dapat dikendalikan.

Metode *spin coating* ini merupakan metode dengan proses yang cepat dan terkenal untuk fabrikasi PSC dengan cara membuat lapisan *spin* [2]. Kecepatan rotasi *spin coating* dan durasi putaran memainkan peran penting dalam membentuk morfologi dan karakteristik lapisan *perovskite* pada sel surya. Teknik ini selain memberikan keunggulan dalam efisiensi waktu, juga dapat memberikan pengendalian ketebalan lapisan.

Metode *spin coating* dapat dilakukan dengan dua cara yakni *one step coating* dan *two step coating*. *One step coating* adalah metode yang umum digunakan karena biaya produksinya sangat terjangkau dan mudah dilakukan. Pada *one step coating*, larutan prekursor *perovskite* diaplikasikan langsung ke permukaan substrat dan membentuk film *perovskite*. Kekurangan dari *one step coating* adalah lapisan yang terbentuk tidak seragam serta adanya pori-pori pada permukaan yang disebabkan oleh kristalisasi yang lambat. Selain itu, *one step coating* memiliki kekurangan lain yakni penyusutan volume film yang berdampak pada kualitas film [12]. Maka dari itu terdapat metode lain yakni metode *two step coating* yang dapat menutupi kekurangan metode *one step coating*. Gambar 2.8 adalah skema *spin coating* dengan metode *one step coating* dan *two step coating*.

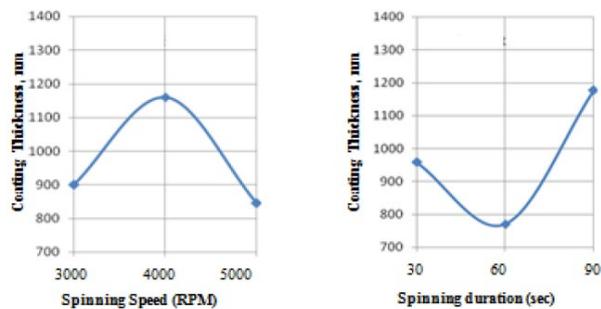


Gambar 2.8 Skema *Spin Coating* dengan Metode *One Step Coating* dan *Two Step Coating* [12]

2.5.1 Durasi *Spin Coating*

Durasi *spin coating* akan mempengaruhi sifat-sifat lapisan yang terbentuk, karena menghilangkan lebih banyak larutan dari substrat yang mengakibatkan penurunan ketebalan lapisan dan morfologi permukaan. Durasi

spin coating ada hubungannya dengan ketebalan lapisan. Efek ketebalan menunjukkan bahwa lapisan yang lebih tipis memiliki *photocurrent* yang lebih tinggi densitasnya dibandingkan dengan lapisan yang relatif lebih tebal karena daya serap yang tinggi [13]. Pada gambar menunjukkan bahwa ketebalan lapisan menurun dengan bertambahnya durasi *spin coating* dari 30 menjadi 60 detik dan ketebalan lapisan meningkat dengan bertambahnya durasi *spin coating* dari 60 menjadi 90.



Gambar 2.9 Pengaruh Kecepatan dan Durasi *Spin* pada Ketebalan [2]

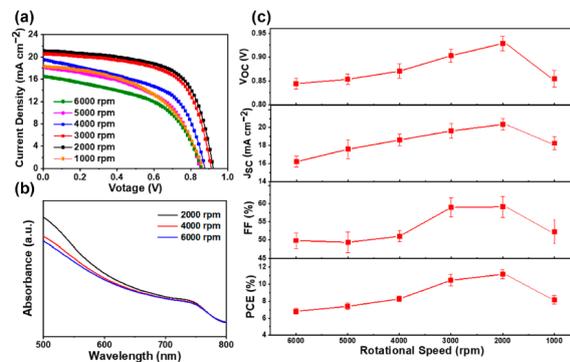
Pada penelitian lain yang telah dilakukan oleh [14] pengaruh waktu putar (*spinning time*) terhadap efisiensi konversi daya (PCE) dari sel surya *perovskite* tanpa lapisan pengangkut lubang (*HT-free PSC*) dengan variasi waktu putar 30, 45, dan 60 detik. Pada penelitian tersebut menghasilkan PCE tertinggi adalah 5,74%, yang diperoleh pada waktu putar 60 detik. Peningkatan waktu putar berkontribusi pada peningkatan kristalinitas dan ukuran butir *perovskite*. Selain itu parameter fotovoltaik seperti J_{sc} , V_{oc} , dan FF meningkat seiring dengan meningkatnya waktu putar [14].

Tabel 2.1 Pengaruh Waktu Putar (*Spinning Time*)[13]

Spinning time (s)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	PCE (%)	R_s (Ω .cm ²)	R_{sh} (Ω .cm ²)
30	0,756	9,586	0,484	3,506	22,5	310,33
45	0,654	10,633	0,518	3,6	14,43	264,09
60	0,8845	12,092	0,537	5,742	11,46	313,28

2.5.2 Kecepatan Rotasi *Spin Coating*

Kecepatan rotasi berpengaruh pada morfologi *film* yang dihasilkan, hal ini disebabkan oleh efek dilusi larutan melalui substrat yang bervariasi tergantung pada kecepatan rotasi yang akan mengubah gaya sentrifugal yang bertanggung jawab pada penyebaran (*solution*) semakin cepat maka transmitansi yang dihasilkan maksimum karena semakin sedikit larutan yang tersisa selama proses. Untuk performa *perovskite* berdasarkan kecepatan rotasinya dapat dilihat pada Gambar 2.10 saat kecepatan paling rendah menuju kecepatan 3000 rpm, ada peningkatan performa sel surya seperti efisiensi, *photocurrent* atau arus listrik yang diinduksi dengan adanya cahaya, FF dan V_{oc} . Sedangkan setelah 3000 rpm, performanya menurun.



Gambar 2.10 Pengaruh Kecepatan *Spin* pada Performa *Perovskite* [15].

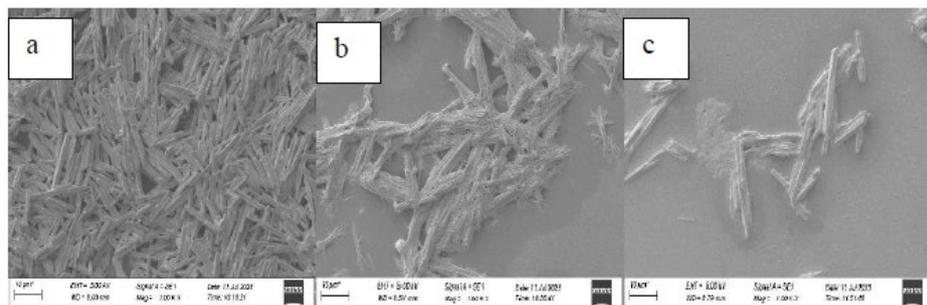
2.6 Karakterisasi

Karakterisasi merupakan proses untuk menentukan sifat-sifat material, seperti struktur, komposisi, dan morfologi, untuk memahami, mengembangkan, dan menggunakannya secara efektif. Adapun syarat ideal suatu material untuk digunakan dalam sel surya adalah kemampuan sel surya mencapai efisiensi yang tinggi. Untuk mencapai sel surya dengan efisiensi yang tinggi ada beberapa syarat penting yang harus dipenuhi yakni kemampuan menyerap cahaya dalam spektrum matahari secara efisien pada panjang gelombang sekitar 400-1200 nm (koefisien absorpsi tinggi), dan lebar celah pita (*band gap*) yang sesuai yakni sekitar 1,3 hingga 1,4 eV. Selain itu, perovskite harus memiliki ukuran butir yang seragam dan besar untuk mengurangi batas butir, yang merupakan tempat terjadinya rekombinasi. Selain itu, perovskite yang baik harus memiliki stabilitas yang tinggi dalam jangka waktu yang lama, aman bagi lingkungan, dan dapat proses pembuatan atau produksi dengan biaya yang efisien seperti menggunakan metode *spin coating*.

Penelitian ini menggunakan empat metode karakterisasi untuk mengevaluasi kinerja sel surya secara menyeluruh. Sistem Pengukur I-V digunakan untuk mengukur parameter penting seperti PCE, FF, dan Voc. U-Vis memberikan informasi tentang absorbansi, transmisi, *band gap*, dan ketebalan. *Scanning Electron Microscope* (SEM) mengungkapkan morfologi permukaan sel surya, memberikan wawasan tentang struktur mikro dan cacat yang dapat memengaruhi performanya. X-ray Diffraction (XRD) menganalisis struktur padatan kristalin yang terbentuk, memberikan informasi tentang fase material dan orientasi kristal.

2.6.1 SEM

Karakterisasi SEM digunakan untuk mengetahui morfologi sampel. Cara kerja SEM sama seperti mikroskop hanya saja jenis mikroskopnya elektron sehingga menghasilkan gambar sampel dengan cara memindai permukaan menggunakan sinar elektron yang terfokus dengan pembesaran hingga skala tertentu. Elektron berinteraksi dengan atom dalam sampel, menghasilkan berbagai sinyal yang berisi informasi tentang topografi permukaan dengan resolusi sekitar 0,1-0,2 nm. Pemindaian SEM dilakukan dari atas permukaan lapisan. Berikut adalah hasil karakterisasi SEM pada lapisan *perovskite*.

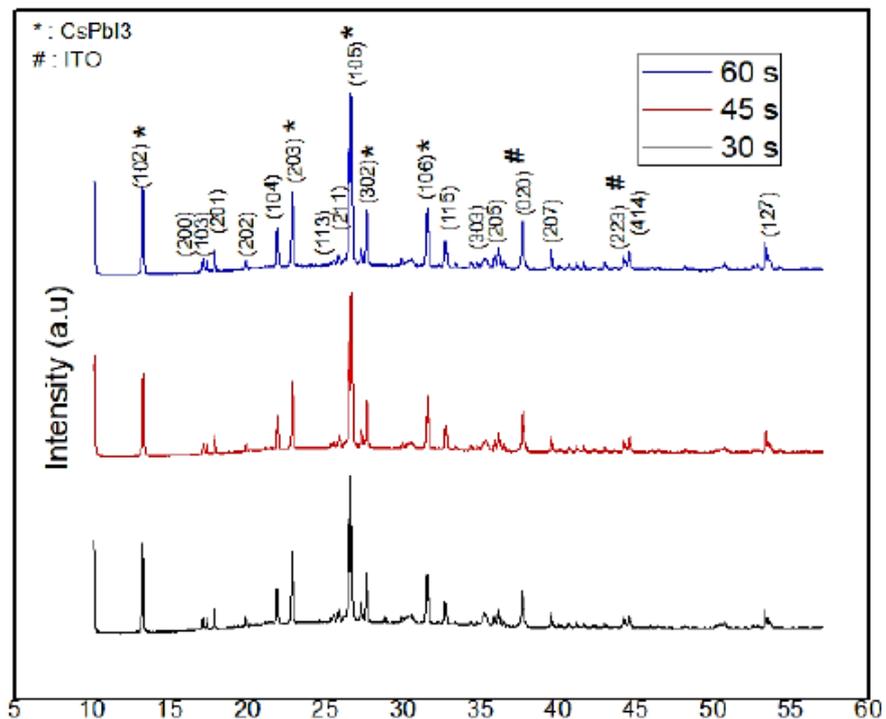


Gambar 2.11 Hasil SEM Deposisi Lapisan *Perovskite* (a) 2000 rpm 1000x, (b) 3000 rpm 1000x, (c) 4000 rpm 1000x [2].

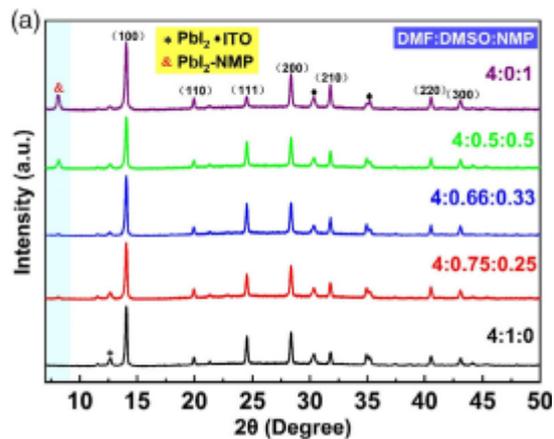
2.6.2 XRD

XRD didapatkan nilai Intensitas. Intensitas puncak difraksi adalah parameter yang mengukur kekuatan sinyal difraksi sinar-X dari suatu kristal atau material semakin besar intensitas maka kekuatan sinyal semakin besar. Selain itu, intensitas memberikan informasi tentang pola kisi kristal suatu bahan, dan kekuatan puncak ini terkait dengan jumlah kristal yang ada dalam sampel. Kemudian XRD dapat digunakan untuk mengidentifikasi fasa

kristalin dalam material dengan cara menentukan parameter struktur kisi serta untuk mendapatkan ukuran partikel. Karakterisasi XRD digunakan sebagai alat pengukuran struktural dengan tujuan untuk mengidentifikasi fasa, komposisi fasa, struktur kristal, dan ukuran kristal yang terkandung dalam *perovskite* sel surya. Ukuran Kristal yang besar diharapkan karena Kristal *perovskite* yang lebih besar cenderung memiliki batas butir yang lebih sedikit, yang mengurangi kepadatan cacat dan meningkatkan transportasi muatan [15]. Pada karakterisasi XRD identifikasi dilakukan untuk melihat pengaruh variasi durasi *spin coating* yaitu 30 detik, 45 detik, dan 60 detik terhadap pola XRD dapat dilihat pada Gambar 2.12. selanjutnya pada Gambar 2.13 pada bagian konsentrasi 4:1:0 adalah *perovskite* $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{-xBrx}$ rujukan dalam sintesis *perovskite* pada penelitian ini.



Gambar 2.12 Pola XRD Lapisan *Perovskite* CsPbI₃ dengan Variasi Durasi *Spin Coating* [2]

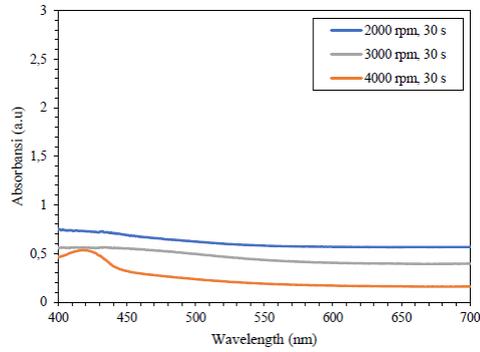


Gambar 2.13 Pola XRD *Perovskite* Jurnal Rujukan [16]

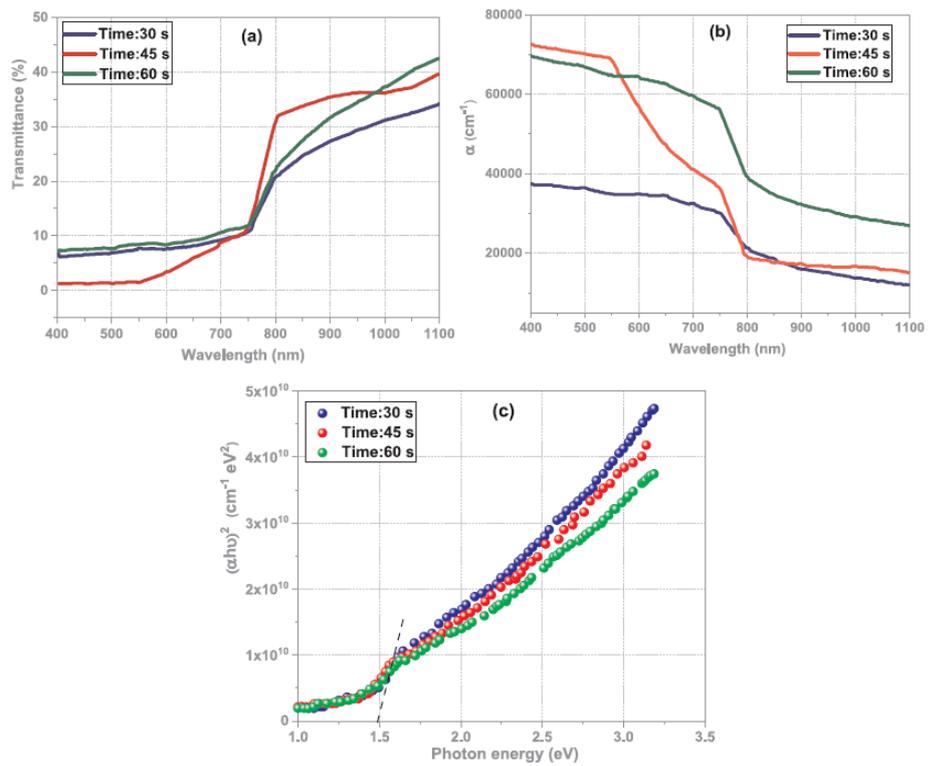
2.6.3 UV-Vis

UV-Vis merupakan teknik analisis yang memanfaatkan cahaya ultraviolet dan sinar tampak untuk mengukur absorbansi material. Dalam teknik ini, cahaya dilewatkan dan sebagian cahaya akan diserap oleh material, sedangkan sisanya dilewatkan. Nilai absorbansi sebanding dengan konsentrasi material dalam sampel. Semakin banyak cahaya yang diserap, semakin tinggi pula konsentrasinya. Hasil pengukuran absorbansi kemudian digambarkan dalam bentuk grafik absorbansi terhadap panjang gelombang. Spektroskop UV-Vis memiliki beberapa keunggulan, antara lain mudah digunakan dan relatif murah. Bahan *perovskite*, seperti Methylamine lead iodide ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$), menunjukkan efisiensi penyerapan tinggi di rentang panjang gelombang yang luas 400-1200 nm. Rentang luas ini memungkinkan mereka untuk menangkap sebagian besar spektrum matahari [17]. Selain itu dari data absorbansi didapat juga data *band gap*. Pada penelitian yang dilakukan oleh Sutter Fella et al. didapatkan band gap untuk perovskite dengan komposisi campuran iodida

dan bromida ideal pada 1,3 hingga 1,4 eV[18]. Adapun bentuk output grafik absorbansi dari *perovskite* CsPbI₃ dapat dilihat pada Gambar 2.14



Gambar 2.14 Grafik Absorbansi *Perovskite* CsPbI₃[2]



Gambar 2.15 Grafik Transmittansi, Absorbansi, dan *Band Gap* *perovskite* dengan Variasi Waktu Putar [14]

Gambar 2.15 adalah hasil karakterisasi UV-Vis berupa grafik transmisi, absorbansi, dan *band gap*. Kemudian untuk menghitung *band gap* atau celah pita *optic* menggunakan metode tauc plot, melalui persamaan [2]:

$$(h\nu)^{1/\eta} = A(h\nu - E_g) \dots \dots \dots (2.1)$$

Dengan :

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

V = Frekuensi c/λ

E_g = *Band gap*

A = Konstanta proporsional

η = Sifat dari transisi sampel

Selain *band gap*, dari UV-Vis dapat diketahui pula tebal lapisan yang terbentuk, melalui persamaan berikut

$$d = \frac{\lambda_1 \times \lambda_2}{\lambda_1 n_1 \times \lambda_2 n_1} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dengan :

d = Ketebalan sampel (nm)

λ_1 = Panjang Gelombang di Titik Minimal (nm)

λ_2 = Panjang Gelombang di Titik Maksimal (nm)

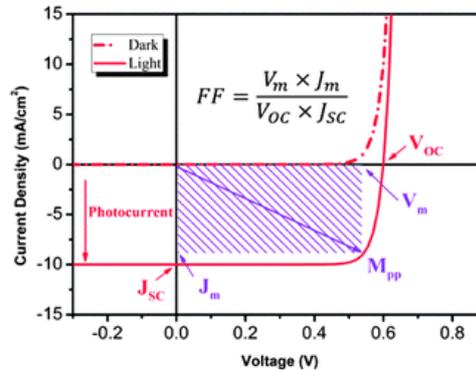
n_1 = Index Bias di Titik Minimal (nm)

n_2 = Index Bias di Titik Maksimal (nm)

2.6.4 Solar I-V Test

Solar I-V Test atau Sistem Pengukur I-V merupakan metode penting untuk mengevaluasi kinerja perangkat listrik dengan mengukur hubungan antara arus (I) dan tegangan (V) yang mengalir melaluinya. Hasil pengukuran ini kemudian digambarkan dalam bentuk kurva I-V, yang memberikan

informasi visual tentang bagaimana perangkat berperilaku di bawah berbagai kondisi operasi.



Gambar 2.16 Kurva *Solar I-V Test* [2]

Kurva I-V seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.16 merupakan representasi grafis dari hubungan antara tegangan yang diterapkan pada perangkat dan arus yang dihasilkan. Dari kurva ini, kita dapat memperoleh berbagai informasi penting tentang perangkat, seperti

- a. Efisiensi Konversi Daya (PCE): Mengukur seberapa efektif perangkat mengubah energi cahaya menjadi energi listrik.

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

- b. *Fill Factor* (FF): Mengukur seberapa dekat kurva I-V mendekati persegi panjang ideal, menunjukkan efisiensi penggunaan tegangan dan arus. FF merupakan rasio daya keluaran perangkat dengan daya ketika tidak ada hambatan. FF dapat dihitung dengan membagi daya keluaran maksimum (p_{out}) dengan potensi daya maksimum (J_{sc} dan V_{oc}) . atau dapat menggunakan persamaan:

$$FF = \frac{I_m \times V_m}{J_{sc} \times V_{oc}} \dots\dots\dots (2.4)$$

- c. Arus Sirkuit Pendek (J_{sc}): Arus maksimum yang dihasilkan perangkat ketika tegangannya nol.
- d. Tegangan Sirkuit Terbuka (V_{oc}): Tegangan maksimum yang dihasilkan perangkat ketika arusnya nol.

Syarat ideal suatu material untuk digunakan dalam sel surya meliputi kemampuan menyerap cahaya dalam spektrum matahari secara efisien (koefisien absorpsi tinggi), lebar celah pita (band gap) yang sesuai untuk menghasilkan tegangan yang optimal, mobilitas elektron dan lubang yang tinggi agar muatan dapat bergerak cepat menuju elektroda, serta waktu hidup yang panjang untuk memaksimalkan pengumpulan muatan. Selain itu, material sel surya yang baik harus memiliki stabilitas yang tinggi dalam jangka waktu yang lama, aman bagi lingkungan, dan dapat diproduksi dengan biaya yang efisien. Material-material seperti silikon, kadmium telluride, copper indium gallium selenide, dan *perovskite* merupakan beberapa contoh material yang banyak diteliti saat ini, masing-masing dengan kelebihan dan kekurangannya. Penelitian terus dilakukan untuk menemukan material baru atau memodifikasi material yang ada agar dapat menghasilkan sel surya dengan efisiensi yang lebih tinggi dan biaya yang lebih rendah.