

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Beberapa hal yang dibahas dalam bab ini berisi kajian teoritis serta penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian ini. Pembahasan tersebut meliputi sel surya, *perovskite solar cell* (PSC), komponen PSC, sintesis PSC, prinsip kerja PSC, penggunaan PSC saat ini di dunia nyata, kinerja PSC dengan ketebalan lapisan semikonduktor yang berbeda, dan karakterisasi PSC.

2.1 Sel Surya

Sel surya merupakan sel fotovoltaik yaitu perangkat listrik yang mengubah energi cahaya menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Sel surya merupakan bentuk sel fotolistrik, yang didefinisikan sebagai perangkat yang karakteristik listriknya seperti arus, tegangan, atau resistansi, bervariasi saat terkena cahaya. Sel surya digambarkan sebagai fotovoltaik terlepas dari apakah sumbernya adalah sinar matahari atau cahaya buatan. Sel surya digunakan sebagai detektor foto, mendeteksi cahaya atau radiasi elektromagnetik lainnya di dekat rentang cahaya tampak, atau mengukur intensitas cahaya. Pengoperasian sel fotovoltaik (PV) membutuhkan 3 syarat dasar: (1) Penyerapan cahaya, menghasilkan pasangan elektron-*hole* atau eksitasi, (2) Pemisahan pembawa muatan dari jenis yang berlawanan, (3) Eksitasi terpisah dari pembawa tersebut ke sirkuit eksternal (Green, 2007).

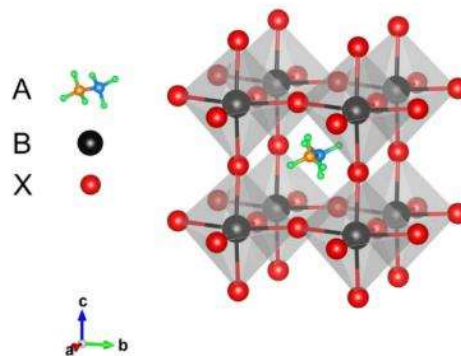
Konversi sel surya dilakukan dengan menyerap cahaya dan atom kristal pengion, sehingga menciptakan elektron bebas bermuatan negatif dan ion bermuatan positif. Setiap foton cahaya yang memiliki energi cukup tinggi untuk diserap oleh atom-atom kristal akan membebaskan sepasang muatan (elektron-*hole*). Elektron dan *hole* bebas bergerak melalui kisi dalam gerakan Brown yang rata-rata tidak bergerak terlalu jauh satu sama lain. Di sisi lain, ketika mengalami medan listrik, maka akan cenderung memisahkan elektron dari *hole*. Elektron akan menuju kutub positif (anoda), dan *hole* bermuatan positif akan menuju kutub negatif (katoda). Rekombinasi kemudian akan berlangsung di sirkuit eksternal. Akibatnya arus akan mengalir (Curtright & Apt, 2008).

Medan listrik yang dimasukkan ke dalam semikonduktor akan memisahkan elektron dan *hole*. Bagian kristal yang mengakumulasi elektron akan bermuatan negatif, bagian yang menumpuk *hole* akan bermuatan positif. Perbedaan potensial yang dihasilkan, disebut sebagai tegangan rangkaian terbuka (*voltage open-circuit*). Ketika elektroda ada pada kedua sisi, arus dapat mengalir di antara keduanya. Kristal, ketika terkena sinar matahari, bertindak sebagai baterai dan menjadi sel surya (Gregg & Hanna, 2003).

Sejauh ini masalah terbesar dengan pendekatan konvensional adalah biaya, sel surya membutuhkan lapisan silikon doping yang relatif tebal agar memiliki tingkat penangkapan foton yang cukup, dan pemrosesan silikon mahal. Ada sejumlah pendekatan yang berbeda untuk mengurangi biaya ini selama dekade terakhir, salah satunya yaitu pendekatan film tipis (Luque dkk., 2006).

2.2 *Perovskite Solar Cell (PSC)*

Perovskite Solar Cell (PSC) atau sel surya perovskit umumnya berarti oksida logam yang memiliki struktur perovskit, yang sebagian besar diklasifikasikan sebagai bahan feroelektrik atau piezoelektrik. Istilah "perovskit" digunakan untuk menggambarkan sekelompok senyawa yang dicirikan oleh rumus umum ABX_3 , yang memiliki struktur kristal kalsium titanium oksida ($CaTiO_3$). Gambar 2.1 menampilkan gambar skematis dari struktur kristal perovskit ABX_3 untuk perovskit halida logam organik-anorganik hibrida. Posisi A mengandung kation organik, B adalah kation logam, dan X adalah anion halida.



Gambar 2.1 Struktur Kristal Logam Organik-Anorganik Halida Perovskit (Snaith, 2013)

Perovskit oksida logam ini tidak menunjukkan sifat semikonduktor yang baik yang membuatnya cocok untuk aplikasi PV. Namun, perovskit halida yang berbeda dari perovskit oksida karena memiliki anion halida sebagai pengganti anion oksida (ABX_3 , A = kation, B = kation logam divalen, X = anion halogen) menunjukkan sifat semikonduktor yang diinginkan untuk aplikasi PV. Penemuan perovskit halida tersebut berasal dari tahun 1890-an. Pada tahun 1893, studi komprehensif tentang sintesis senyawa timbal halida dari larutan termasuk timbal halida dan cesium, $CsPbX_3$ (X = Cl, Br, I), amonium (NH_4), atau rubidium, $RbPbX_3$ (Yuan dkk., 2014). Kemudian, pada tahun 1957, peneliti menemukan bahwa $CsPbCl_3$ dan $CsPbBr_3$ memiliki struktur perovskit (Møller, 1958). Proses solusi sederhana untuk sintesis kristal ionik timbal halida cesium ini mungkin telah memotivasi para peneliti untuk menggunakan kation lain sebagai pengganti Cs. Selanjutnya diketahui bahwa kation organik metilamonium (CH_3NH_3) menggantikan Cs untuk membentuk $CH_3NH_3MX_3$ (M = Pb, Sn, X = I, Br) dan melaporkan studi kristalografi pertama pada perovskit timbal halida organik. Menjelang akhir abad ke-20, berbagai macam perovskit halida disintesis menggunakan kation organik kecil dan besar (Mitzi, 2007).

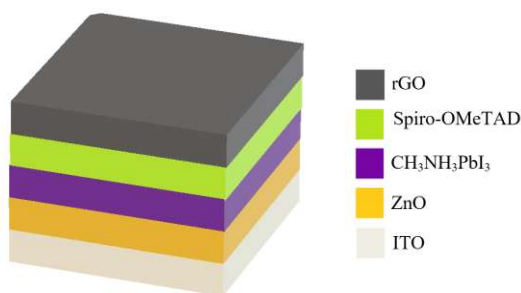
Faktor-faktor penting yang mendukung kinerja unggul dan efisiensi tinggi sel surya perovskit adalah sebagai berikut: (1) koefisien serapan optik yang tinggi (10^5 cm^{-1}) yang memungkinkan penggunaan film tipis, (2) pembawa muatan *diffusion length* dan rekombinasi yang minimum, dan (3) transfer muatan yang seimbang. Dalam

aplikasi PV, sifat perovskit halida yang toleran terhadap *deffect* sangat penting, karena memengaruhi perolehan tegangan yang tinggi. Efisiensi sel yang tinggi dari PSC adalah hasil dari tegangan *open-circuit* (V_{oc}) yang tinggi (Miyasaka, 2018). Sel surya perovskit dengan efisiensi tinggi biasanya menghasilkan V_{oc} melebihi 1,1 V, atau dalam sel terbaik di atas 1,2 V. Salah satu sifat yang merugikan yang membatasi V_{oc} dan efisiensi PSC adalah densitas cacat dalam kristal perovskit halida, yang diperkirakan dari 10^{10} cm^{-3} (kristal tunggal) hingga 10^{16} cm^{-3} (polikristal) (Shi dkk., 2015). Hal ini menunjukkan bahwa kemurnian film polikristalin yang diproses dengan larutan dapat menjadi faktor penting untuk meminimalkan konsentrasi cacat, dan dengan demikian meningkatkan efisiensi sel surya. Sama pentingnya adalah adanya kerugian yang disebabkan oleh rekombinasi antar muka yang bergantung pada sifat lapisan lain di perangkat sel surya.

Perangkat efisiensi tinggi telah didemonstrasikan menggunakan *sequential deposition*, *spin coating*, *vacuum evaporation*, atau CVD untuk menyimpan film perovskit. Koefisien absorpsi yang dihasilkan absorber perovskit pada rentang panjang gelombang yang lebar sangat baik (De Wolf dkk., 2014). Selain itu, bahan perovskit ini memiliki mobilitas pembawa muatan yang tinggi dan panjang difusi yang besar, yang memungkinkan mereka mengangkut muatan secara efisien untuk dikumpulkan di elektroda (Xing dkk., 2013).

2.3 Komponen PSC

Substrat, fotoelektroda, sensitizer, elektrolit dan elektroda balik adalah berbagai parameter struktur yang memengaruhi kinerja sel surya (Sengupta dkk., 2016). Struktur PSC pada penelitian ini terlihat seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Struktur Diagram PSC

Dalam struktur n-i-p, lapisan tipis ZnO bekerja sebagai bahan transpor elektron tipe-n (n-ETL), perovskit berfungsi sebagai penyerap atau absorber yang terletak di antara dua kontak selektif (p dan n), dan HTL (*Hole transport layer*) spiro-OMeTAD berperan sebagai kontak tipe-p.

2.3.1 Substrat

Lapisan substrat pada Gambar 2.3 memungkinkan sinar matahari melewati bahan aktif tanpa penyerapan spektrum matahari yang tidak diinginkan, resistivitas listriknya rendah sehingga mendukung proses transfer elektron dan mengurangi kehilangan energi. Selain itu, substrat mengumpulkan muatan sebagai pendukung fotoelektroda pada PSC (Gong dkk., 2012).

Tabel 2.1 Karakteristik Substrat PET

Karakteristik Substrat Fleksibel PET	
Kerapatan (g/cm^3)	1.39
Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	-50-150
Penyerapan air (%)	0.4-0.6
ketahanan pelarut	Baik
Stabilitas dimensi	Baik

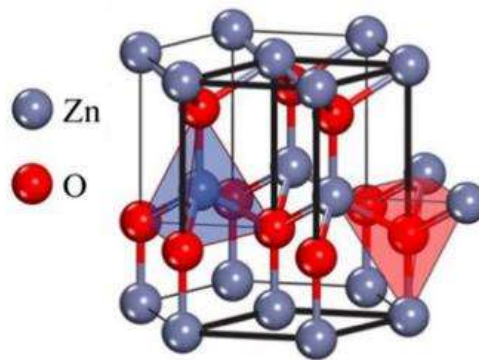


Gambar 2.3 Substrat Fleksibel PET

Substrat polimer, seperti *polietilen tereftalat* (PET), *polietilen naftalat* (PEN), dan *polimida* (PI), sebagian besar digunakan sebagai substrat fleksibel karena daya tekuk yang tinggi, bobot yang ringan, biaya rendah, ketahanan korosi yang tinggi, dan transparansi optik yang tinggi. Namun, ketahanan termal dari substrat polimer ini relatif buruk. Karakteristik untuk substrat polimer PET ditunjukkan pada Tabel 2.1 (Jung dkk., 2019). Temperatur maksimum PET adalah 150°C , deformasi substrat akan terjadi ketika suhu pemrosesan terlalu tinggi. Oleh karena itu, seluruh proses pembuatan perangkat harus dilakukan pada suhu rendah. Mempertimbangkan suhu pemrosesan film perovskit yang diperlukan biasanya lebih rendah dari 150°C , lebih banyak upaya telah dilakukan untuk menyiapkan lapisan pengangkut muatan dengan kualitas tinggi pada suhu rendah untuk meningkatkan kinerja fotovoltaik PSC fleksibel. Kelemahan lain dari substrat polimer adalah sifat penghalang air dan oksigen yang buruk (Lewis & Weaver, 2004).

2.3.2 Fotoelektroda

Apa pun jenis struktur perangkat yang dimiliki PSC, ETM (*Electron Transport Material*) yang berkualitas tinggi, penyerapan perovskit dengan sifat yang sangat baik selalu penting untuk kinerja perangkat yang baik, terutama untuk pembuatan dan pengumpulan pembawa muatan yang efisien, dan meminimalkan rekombinasi (Bergmann dkk., 2014). ETM adalah komponen terpenting dalam struktur PSC efisiensi tinggi, karena ETM selalu digunakan sebagai ETL (*Electron Transport Layer*) dalam mengekstraksi dan mengangkut elektron fotogenerasi dan secara bersamaan berfungsi sebagai lapisan pemblokiran *hole* untuk meminimalkan rekombinasi muatan dalam film perovskit (Dong dkk., 2014). Untuk lebih spesifik, ETM memberikan pengaruh langsung pada Voc, FF, dan Jsc dari perangkat fotovoltaik (Juarez-Perez dkk., 2014).

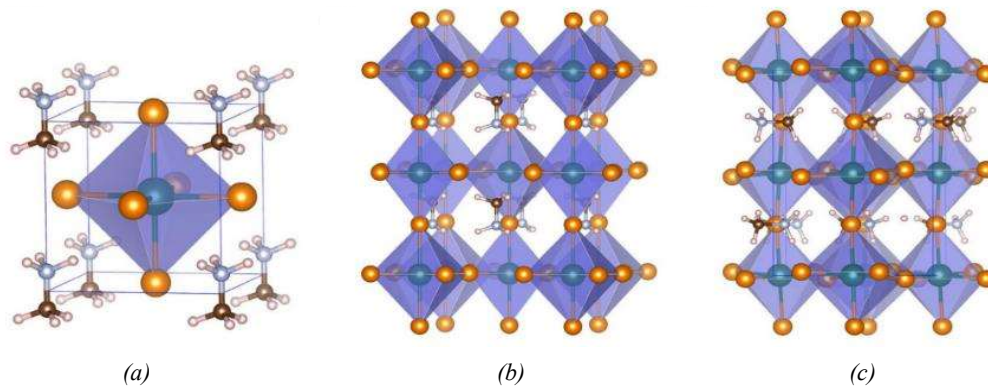


Gambar 2.4 Struktur Kristal Wurtzite ZnO (Samadi dkk., 2016)

Dalam fotoelektroda, umumnya menggunakan oksida logam semikonduktor celah pita lebar seperti TiO_2 , SnO_2 , ZnO , NbO_5 dan SrTiO_3 (Nazeeruddin dkk., 1997). ZnO pertama kali digunakan sebagai ETL untuk PSC fleksibel karena mobilitas elektron yang tinggi, *band gap* yang luas, dan kemampuan proses pada suhu rendah. Struktur kristal ZnO dapat dilihat pada Gambar 2.4, selain itu ZnO memiliki energi celah pita 3,2–3,4 eV, mirip dengan TiO_2 , dan posisi pitanya juga serupa. ZnO memiliki energi pengikat eksiton yang besar yaitu 60 meV, juga memiliki fabrikasi yang jauh lebih sederhana, menghasilkan biaya yang berpotensi lebih rendah untuk perangkat berbasis ZnO .

2.3.3 Sensitizer

Perovskit halida logam organik-anorganik yang paling sering diterapkan dalam bidang fotovoltaik adalah $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ yang terdiri dari kation organik besar, metilamonium (CH_3NH_3^+), timbal (Pb) yang merupakan kation yang lebih kecil dan yodium (I) sebagai anion halogen. Variasi senyawa ini sebagai bahan penyerap (sensitizer) dalam perangkat fotovoltaik. Perovskit memiliki banyak sifat yang diinginkan dalam sel surya (Li dkk., 2015). Lapisan perovskit dapat diendapkan dengan biaya rendah, menyiratkan bahwa kemajuan yang dibuat untuk sel surya akan dapat diperoleh pada sistem material baru ini (Ball dkk., 2013).

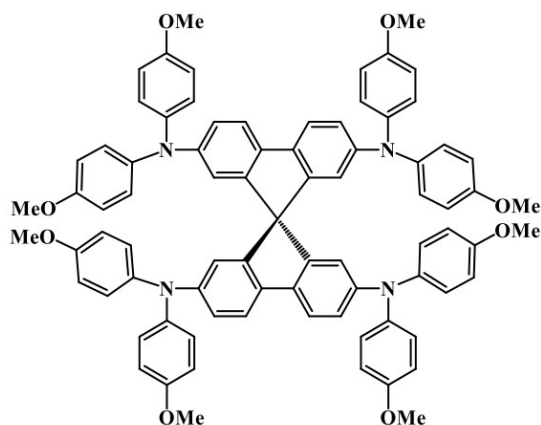


Gambar 2.5 Struktur Kristal $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ dalam Fase Yang Berbeda. (a) Fase Kubik, (b) Fase Tetragonal, (c) Fase Ortorombik (Green dkk., 2014)

Pada Gambar 2.5 menunjukkan struktur kristal $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, bola biru besar adalah atom Pb dan bola jingga besar adalah atom I. Bola kecil abu-abu dan biru muda masing-masing adalah atom N dan C dalam molekul organik sedangkan bola merah muda kecil adalah atom H.

2.3.4 Elektrolit

Bahan perovskit yang digunakan sebagai sensitizer menghasilkan pasangan *hole*-elektron adalah faktor definitif yang memengaruhi kinerja fotovoltaiik sel surya (Yao dkk., 2015). Selanjutnya, ekstraksi *hole* terjadi di perovskit/permukaan HTL (*Hole Transport Layer*). HTL berperan sebagai lapisan pemblokiran elektron yang efisien, dan modifikasi permukaan yang efisien antara lapisan perovskit dan HTL (Gil-Escrig dkk., 2015).



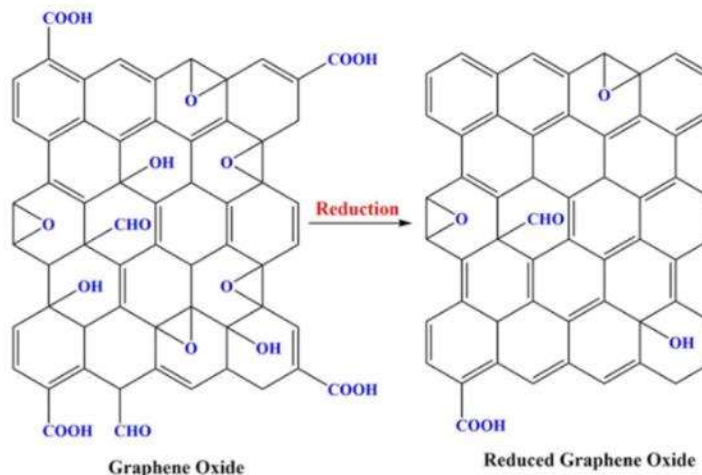
Gambar 2.6 Struktur Kristal Spiro-OMeTAD (Nhari dkk., 2021)

Dalam HTL, ekstraksi *hole* yang cepat dan efisien dapat memberikan transfer *hole* yang baik dan mengurangi kemungkinan rekombinasi muatan. Penggunaan spiro-OMeTAD sebagai HTM telah banyak dilaporkan untuk pembuatan PSC efisiensi tinggi, struktur spiro-OMeTAD dapat dilihat pada Gambar 2.6 (Mahmood dkk., 2014).

2.3.5 Elektroda Balik

Counter electrode atau elektroda balik pada dasarnya adalah substrat penghantar dengan lapisan katalis yang sesuai. Elektroda balik memiliki tiga fungsi yaitu, (1) Bertindak sebagai katalis dan mengurangi pergerakan bolak-balik redoks teroksidasi, (2) Untuk menerima elektron dari sirkuit luar dan menyelesaikan siklus elektron, dan (3) Memantulkan energi cahaya yang tidak dimanfaatkan untuk kembali ke sel agar meningkatkan penyerapan cahaya. Selain itu, katalis pada *counter electrode* harus memiliki luas permukaan yang tinggi untuk katalitik yang lebih baik. Aktivitas katalitik yang tinggi, harus transparan terhadap cahaya tampak, harus menunjukkan ketahanan

korosi yang sangat baik di lingkungan asam dan harus menjadi konduktor elektron yang sangat baik (Ahmad dkk., 2020).



Gambar 2.7 Struktur Kristal rGO (Gómez-Navarro dkk., 2010)

Graphene memiliki konduktivitas listrik yang sangat baik (mobilitas pembawa muatan $>15.000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ pada suhu kamar), dan selain itu, ia memiliki luas permukaan yang tinggi (Campbell & Manning, 2018). rGO yang memiliki struktur kristal seperti pada Gambar 2.7 telah digunakan untuk hal berikut: (1) untuk meningkatkan sifat mekanik polimer, (2) sebagai pendukung katalis, dan (3) untuk meningkatkan efisiensi konversi energi (Coroş dkk., 2019).

2.4 Sintesis PSC

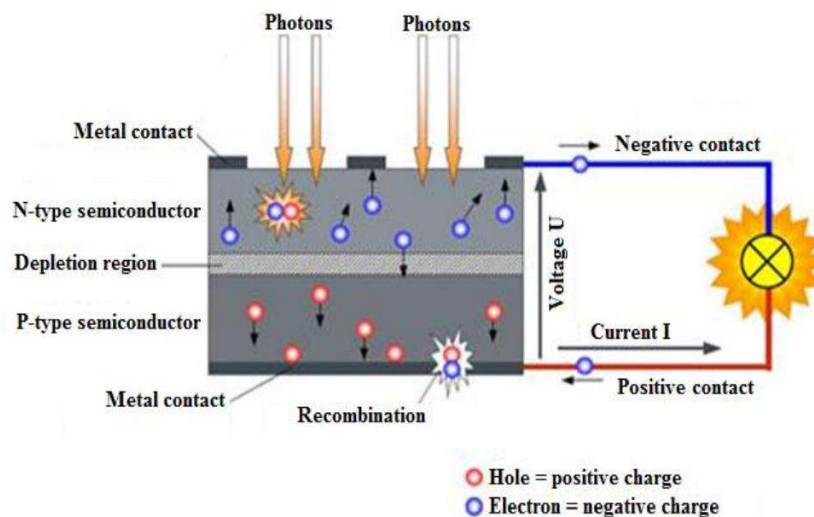
Sintesis *Perovskite solar cell* dilakukan dengan mendeposisi fotoelektroda ZnO ke atas substrat fleksibel PET, perovskit $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ditambahkan di atasnya, kemudian menambahkan elektrolit sebagai *hole transport material* yang berupa Spiro-OMeTAD dengan *spin-coating*, terakhir elektroda balik rGO yang telah dideposisi di atas substrat PET ditempelkan dengan resin sehingga membentuk konfigurasi *sandwich*.

ZnO dideposisi ke atas substrat PET dengan menggunakan metode *spin-coating*. Laju putaran dan durasi, viskositas larutan merupakan parameter penting yang perlu dipertimbangkan untuk membuat perangkat PSC dengan kualitas unggul (Bahtiar dkk., 2017). Tahap *spin-coating* dimulai dengan bahan pelapis yang akan *dispin-coating*

diletakkan ke atas substrat. Untuk sampel dalam jumlah kecil dapat dilakukan secara manual dengan pipet atau jarum suntik (Birnie dkk., 2005). Selanjutnya, *spin-coater* dipercepat ke kecepatan putaran yang lebih cepat (dalam kisaran beberapa ribu putaran per menit, RPM). Kecepatan dapat dicapai hampir secara instan dengan meningkatkan kecepatan tersebut selama beberapa detik tertentu. *Spin-coating* bertahap lebih baik untuk sel surya jangka panjang, tetapi detail laju *spin-coater* dan kecepatan putaran akhir memengaruhi ketebalan lapisan akhir dan dapat memengaruhi keseragaman lapisan juga. Oleh karena itu, kecepatan putaran akhir ini dipertahankan konstan untuk jangka waktu tertentu (biasanya 30-60 detik) (Washo, 1977).

2.5 Prinsip Kerja PSC

Sel surya dibangun oleh bahan semikonduktor yang mengubah sinar matahari menjadi energi listrik dengan menggunakan efek PV. Sel surya harus memiliki PCE (*Power Conversion Efficiency*) setinggi mungkin untuk membuat fungsinya memuaskan (Suresh Kumar & Chandra Babu Naidu, 2021). Oleh karena itu, penting untuk memahami proses dasar atau langkah-langkah yang dilakukan di lapisan sel surya dan fungsi masing-masing komponen untuk merancang sel surya yang berkinerja tinggi.



Gambar 2.8 Prinsip Kerja Sel Surya Perovskit

Ketika sel surya terkena cahaya, sebagian foton dengan energi lebih besar dari *bandgap* (energi celah pita) diserap oleh lapisan semikonduktor. Foton yang diserap yaitu yang memiliki energi eksitasi yang cukup ($E > E_{gap}$) menyebabkan transportasi *hole* dan elektron (*hole* di pita valensi dan elektron di pita konduksi) dalam arah yang berbeda, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. Karena perbedaan energi ikat eksiton di perovskit, eksiton dapat membentuk pembawa muatan bebas (*hole* dan elektron bebas) untuk menghasilkan arus atau bergabung kembali menjadi eksiton (Tao, 2014).

Pasangan elektron *hole* dihasilkan di wilayah medan (daerah deplesi), dan kemudian dipisahkan dibawah pengaruh medan. Akibatnya, elektron bergerak ke sisi-n dan *hole* ke sisi-p. Beberapa elektron dan *hole* terakumulasi di batas wilayah medan sisi-n dan sisi-p yang menetralkan bagiannya (rekombinasi), secara berurutan. Elektron dan *hole* yang tersisa mengalir di sirkuit luar ke muatan. *Hole* bebas dan elektron dikumpulkan secara bersamaan oleh HTL, ETL, kemudian oleh elektroda logam dan substrat (ITO PET), secara berurutan (Zhou dkk., 2018). Tidak hanya medan elektrostatis yang dapat mengimbangi bagian dari efek penghalang energi potensial tetapi juga menyebabkan wilayah p memiliki listrik positif dan wilayah n memiliki listrik negatif. Akibatnya, gaya gerak listrik dihasilkan antara kedua wilayah ini, arus mengalir jika *loop* sirkuit diterapkan (Dai dkk., 2020).

2.6 Penggunaan PSC Saat Ini di Dunia Nyata

Perovskite solar cell (PSC) normal akan menghasilkan 0,5-0,6 V tanpa beban (impedansi). Peringkat daya tergantung pada ukuran, efisiensi dan intensitas cahaya. Energi dari satu sel tidak cukup sehingga perlu menggunakan beberapa sel PV yang saling terhubung yang membentuk modul PV kemudian dihubungkan lagi untuk membentuk panel PV dan dengan cara serupa kita mendapatkan *array* PV (Arshad dkk., 2014).

Pada tahun 2014, Olga. M, Piotr. K dan Artur. K mendirikan sebuah perusahaan yang bernama Saule Technologies. Perusahaan tersebut merupakan perusahaan pertama yang memasarkan sel surya perovskit (PSC). Metode pembuatannya menggunakan teknik *printing* dengan menjadikan perovskit sebagai tinta. Pada tahun

2016, perusahaan tersebut berhasil membuat PSC untuk aplikasi charger *handphone*. Produk BIPV (*Building Integrated Photovoltaics*), saat ini dikembangkan bersama Skanska di wilayah terpilih. Foil perovskit semi-transparan, disegel di antara lembaran kaca dan diintegrasikan ke dalam fasad. Ada juga produk yang diberi nama *solar carport* yaitu stasiun pengisi daya kendaraan listrik. Kedepan, PSC akan mulai bersaing dengan sel surya berbasis silikon maupun lapisan tipis yang sudah lebih dahulu digunakan oleh masyarakat dunia.

2.7 Kinerja PSC dengan Ketebalan Lapisan Semikonduktor yang Berbeda

Celah pita, komposisi dan morfologi oksida logam serta ketebalan fotoelektroda memengaruhi pengumpulan muatan, transportasi, dan sifat pemanenan cahaya. Tabel 2.2 menunjukkan kinerja sel surya dengan ketebalan fotoelektroda yang berbeda berdasarkan penelitian sebelumnya.

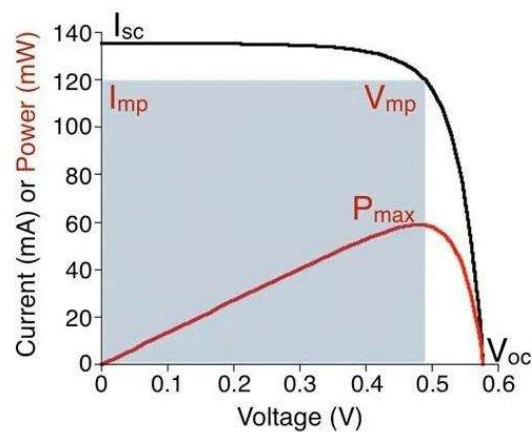
Tabel 2.2
PSC dengan Ketebalan yang Berbeda Berdasarkan Penelitian Sebelumnya

Struktur Perangkat	Ketebalan (μm)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/m^2)	FF (%)	η (%)
TiO ₂ nanorod/CH ₃ NH ₃ PbI ₃ /spiro- MeOTAD/Au (Kim dkk., 2013)	0,56	0,955	15,60	63	9,40
	0,92	0,929	12,60	62	7,30
	1,58	0,865	11,20	61	5,90
TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI ₃ /spiro- MeOTAD/Au (Zhao & Zhu, 2013)	3,90	0,623	15,14	47	4,43
	5,80	0,573	10,38	43	2,57
	8,30	0,558	9,180	37	1,92
TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI ₃ /spiro- MeOTAD/Ag (Zhao dkk., 2014)	0,85	0,890	17,69	55	8,73
	1,05	0,878	17,16	49	7,39
	1,65	0,869	14,17	44	5,48
TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI ₃ (QD)/spiro- MeOTAD/Ag (Im dkk., 2011)	3,60	0,629	15,99	62	6,20
	5,50	0,616	14,31	59	5,19
	8,60	0,559	10,15	60	3,37

Ketebalan film TiO₂ yang berbeda diukur di bawah *Standard Solar Simulator 1,5 AM filter 100 mWcm⁻²*. Semakin meningkat ketebalan film, hasil efisiensi atau kinerja sel surya semakin rendah. Penurunan efisiensi sel untuk film TiO₂ disebabkan oleh berkurangnya FF atau J_{sc}, meskipun penyerapan meningkat untuk film TiO₂ yang lebih tebal namun transmitansi cahaya menurun. Penurunan transmitansi yang signifikan untuk film TiO₂ yang lebih tebal kemungkinan disebabkan oleh molekul TiO₂ yang semakin rapat.

2.8 Karakterisasi PSC

Proses karakterisasi dengan *solar simulator AM1,5G* memperoleh nilai densitas densitas arus *short-circuit* (J_{sc}), tegangan *open-circuit* (V_{oc}), *fill factor* (FF) yaitu sebagai sifat listrik sel surya dengan grafik seperti pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Karakteristik I-V Sel Surya (Tirado & Sumiccol, 2020)

Tegangan *open-circuit* (V_{oc}) didefinisikan sebagai tegangan maksimum yang tersedia dari sel surya saat arus bersih melalui perangkat nol. Jadi, untuk nilai V_{oc} yang tinggi, maka sel surya harus memiliki kecepatan rekombinasi permukaan yang rendah dan panjang difusi yang besar (Elsaeedy dkk., 2021).

Short-circuit current (I_{sc}) adalah arus ketika terminal terhubung satu sama lain atau ketika resistansi beban nol. J_{sc} meningkat ketika intensitas cahaya semakin tinggi karena intensitas yang lebih tinggi memberikan lebih banyak foton dan elektron. *Short-circuit current* yang dilambangkan dengan I_{sc} sebanding dengan luas sel surya yang disebut *short-circuit current density* yang disimbolkan dengan $J_{sc} = I_{sc}/A$. Untuk

memperoleh nilai I_{sc} yang tinggi sel surya harus memiliki refleksi permukaan yang minimum, transmitansi yang baik dan rekombinasi minimum (Tirado & Sumicol, 2020).

Fill factor (FF) perangkat sel surya organik tergantung pada mobilitas pembawa muatan *hole* dan elektron yang muncul dari komponen donor dan akseptor. Jika mobilitas *hole* dan mobilitas elektron lebih tinggi dan seimbang maka perangkat sel surya memiliki FF yang lebih tinggi. FF meningkat dengan bertambahnya celah pita (*band gap*) semikonduktor dan untuk sel surya yang baik, nilainya harus lebih besar dari 80% (Le, 2018).

$$FF = P_{\max} (\text{mWcm}^{-2}) / J_{sc} (\text{mAcm}^{-2}) \cdot V_{OC} (\text{V}) \quad (2.1)$$

Persamaan 2.1 dimana kombinasi V_{oc} dan I_{sc} , memperoleh nilai daya maksimum (P_{max}) yang dihasilkan oleh sel surya.