

## 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

AYI BAHTIAR\*, YULIA SARTIKA

Departemen Fisika Fakultas MIPA Universitas Padjadjaran,  
Jl. Raya Bandung-Sumedang Km 21, Jatinangor 45363

\*email : ayi.bahtiar@phys.unpad.ac.id

**Abstrak.** Pembuatan modul sel-surya perovskite dengan struktur tanpa lapisan transpor hole (PSC HTL-free) berbasis karbon memerlukan informasi nilai rasio optimum antara volume larutan metilamonium timbal iodida ( $\text{MAPbI}_3$ ) sebagai lapisan aktif perovskite terhadap luas area aktif sel-surya. Dalam penelitian ini, telah dilakukan studi variasi volume larutan  $\text{MAPbI}_3$  yang diinfiltrasikan ke dalam lapisan mesopori sel-surya perovskite HTL-free dengan struktur gelas/FTO/ $\text{TiO}_2$ / $\text{ZrO}_2$ /perovskite/Karbon. Variasi volume larutan  $\text{MAPbI}_3$  yang digunakan adalah 5 mL, 10 mL, 15 mL dan 20 mL, dengan tujuan untuk memperoleh nilai rasio optimum dari volume larutan  $\text{MAPbI}_3$  dengan luas area aktif PSC HTL-free berbasis karbon. Pembuatan dan pengukuran kinerja sel-surya dilakukan pada temperatur ruang dengan kelembaban udara yang tinggi di atas 80%. Luas area aktif sel surya adalah 1,5  $\text{cm}^2$ . Sumber cahaya yang digunakan dalam pengukuran karakteristik arus-tegangan sel-surya adalah LED putih dengan intensitas 100  $\text{mW}/\text{cm}^2$ . Hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai rapat-arus hubung-singkat ( $J_{\text{SC}}$ ) dan efisiensi konversi daya (PCE) sangat dipengaruhi oleh volume larutan  $\text{MAPbI}_3$ , sedangkan nilai tegangan hubung-terbuka ( $V_{\text{OC}}$ ) dan faktor pengisi (FF) hampir sama untuk semua variasi volume larutan  $\text{MAPbI}_3$ . Nilai PCE maksimum 2,63 % diperoleh untuk volume larutan 15 mL, sehingga rasio optimum untuk pengembangan modul PSC HTL-free dengan luas area aktif yang besar adalah 10  $\text{mL}/\text{cm}^2$ .

**Kata kunci:** perovskite, larutan  $\text{MAPbI}_3$ , sel-surya perovskite, HTL-free, luas area aktif

**Abstract.** Fabrication of perovskite solar modules with structure carbon-based hole-transport layer free or PSC HTL-free requires information on the optimum ratio between the volume of the infiltrated methylammonium lead iodide ( $\text{MAPbI}_3$ ) solution as the perovskite active layer into solar cells structure against the active area of solar cells. In this work, volume variations of  $\text{MAPbI}_3$  solutions which were infiltrated into all mesoporous layers in provskite solar cells carbon-based HTL-free with structure glass/FTO/ $\text{TiO}_2$ / $\text{ZrO}_2$ /perovskite/Carbon were studied. The volume variations of the  $\text{MAPbI}_3$  solution used were 5 mL, 10 mL, 15 mL and 20 mL, with the aim to obtain the value of optimum ratio between volume of  $\text{MAPbI}_3$  solution and the active area of carbon-based PSC HTL-free. The preparation of solar cells and their performances measurements have been conducted at room temperature with high air humidity above 80%. The active area of a solar cell is 1.5  $\text{cm}^2$ . The light source for measuring current-voltage of solar cells is a white LED with an intensity of 100  $\text{mW}/\text{cm}^2$ . The measurement results show that the short-circuit current-density ( $J_{\text{SC}}$ ) and power conversion efficiency (PCE) are strongly influenced by the volume of the  $\text{MAPbI}_3$  solution, while the open-voltage voltage ( $V_{\text{OC}}$ ) and fill factor (FF) are almost the same for all volume variations of  $\text{MAPbI}_3$  solution. The maximum PCE value of 2.63% is obtained for a 15 mL volume solution; therefore, the optimum ratio for the development of the PSC HTL-free module with a large active area is 10  $\text{mL} / \text{cm}^2$ .

**Keywords:** perovskite,  $\text{MAPbI}_3$  solution, perovskite solar cells, HTL-free, active area

## 1. Pendahuluan

Dalam sepuluh tahun terakhir, sel surya perovskite berbasis hibrida material organik-inorganik logam-halida, umumnya metilamonium timbal halida,  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$  atau  $\text{MAPbX}_3$  dengan X adalah halida seperti Cl, I dan Br telah banyak digunakan sebagai material aktif sel-surya karena memiliki sifat optik dan elektronik yang unggul seperti penyerapan spektra cahaya matahari yang lebar (400 – 800 nm), energi pengikat exciton kecil (10 meV), mobilitas muatan pembawa yang tinggi ( $10^{-4}$  –  $10$  cm<sup>2</sup>/Vs) dan panjang difusi muatan panjang (>1  $\mu\text{m}$ ) [1,2]. Oleh karena itu, sel-surya perovskite saat ini telah menghasilkan efisiensi konversi daya (*Power Conversion Efficiency*, PCE) di atas 22% [3].

Pada umumnya sel surya perovskite (*Perovskite Solar Cells*, PSC) memiliki struktur dengan konfigurasi gelas/(*Fluorinated Tin Oxide*) FTO/*Electron Transport Layer* (ETL)/perovskite/*Hole Transport Layer* (HTL)/Au. Titanium dioksida ( $\text{TiO}_2$ ) umumnya digunakan sebagai material ETL dan Spiro-OMeTAD (2,2',7,7'-Tetrakis-(N,N-di-4-methoxyphenylamino)-9,9'-spirobifluorene) atau polimer PTAA (Poly[bis(4-phenyl)(2,5,6-trimethylphenyl)amine]) sebagai HTL [4]. Namun, mahalnya harga material Spiro-OMeTAD (550 SGD per gram, Sigma-Aldrich) dan PTAA (3818 SGD per gram, Sigma-Aldrich) serta tidak stabil terhadap kelembaban karena sifat higroskopisnya [5,6], mengakibatkan biaya pembuatan sel-surya dengan struktur tersebut menjadi mahal, sehingga sulit untuk dikomersialisasi dan sulit bersaing dengan sel-surya silikon yang saat ini menguasai 70% pasar sel-surya. Disisi lain, perovskite seperti  $\text{MAPbI}_3$  memiliki mobilitas lubang yang tinggi, sehingga dapat berperan juga sebagai material *transport hole*, sehingga dapat dibuat sel-surya dengan struktur tanpa HTL atau *HTL-free* [7-9], tanpa mengurangi PCE sel-surya.

Emas (Au), umumnya digunakan sebagai elektroda sel surya perovskite bebas-HTM. Disamping harga material Au yang mahal, elektroda Au juga membutuhkan teknik evaporasi vakum tinggi sehingga meningkatkan biaya produksi sel-surya perovskite [10]. Oleh karena itu perlu dicari material lain untuk elektroda sebagai pengganti Au. Karbon, terutama grafit, karbon hitam dan karbon *nanotube* memiliki konduktivitas listrik yang tinggi (1 cm<sup>2</sup>/Vs) sehingga dapat digunakan sebagai material elektroda [11,12], mudah diperoleh, porositas yang dapat terkontrol, stabilitas kimia yang tinggi, ramah lingkungan dan murah (27 SGD per gram, Solaronix). Karbon juga memiliki fungsi kerja (-5,0 eV) yang hampir sama dengan Au (-5,1 eV) sehingga cocok untuk digunakan sebagai elektroda sel-surya perovskite (tingkat energi valensi sebesar -5,3 eV). Ku et al, melaporkan PSC *HTL-free* menggunakan struktur tiga-lapisan mesopori  $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2$ /perovskite/Karbon dengan PCE 6,64% [8]. Ketiga lapisan mesoskopik  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$  dan Karbon dibuat dengan teknik sablon (*screen-printing*) yang sederhana dan murah, sehingga memiliki prospek yang lebih baik untuk komersialisasi PSC [11]. Selanjutnya, dengan menggunakan ligan 5-AVA (*5-Ammonium Valeric Acid*) untuk meningkatkan kelarutan perovskite dan ikatan antara perovskite dan lapisan mesopori, PSC meningkat menjadi 12,84%, dan stabil dibawah penyinaran AM1,5G selama lebih dari 1000 jam [5]. Oleh karena itu PSC *HTL-free* berbasis karbon sebagai elektroda merupakan stuktur PSC yang menjanjikan untuk pengembangan sel surya berbiaya murah dengan PCE yang tinggi.

Umumnya, PSC dengan PCE lebih dari 22% dihasilkan oleh sel surya dengan luas area aktif yang sangat kecil ( $\ll 1$  cm<sup>2</sup>) [1]. Untuk tahapan komersialisasi (*scaling-*

up) dalam bentuk modul, diperlukan luas area aktif minimal  $1 \text{ cm}^2$  [11]. Oleh karena itu, pembuatan sel-surya dengan luas area aktif lebih dari  $1 \text{ cm}^2$  sangat penting untuk dikaji lebih serius. Dalam penelitian ini telah dilakukan pembuatan PSC mesopori *HTL-free* struktur gelas/FTO/TiO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub>/perovskite/Karbon dengan luas area aktif  $1,5 \text{ cm}^2$ . Lapisan TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> dan Karbon dibuat dengan teknik *screen printing* yang diproduksi oleh Solaronix dan lapisan aktif perovskite dibuat dengan meneteskan larutan metilamonium timbal iodida (MAPbI<sub>3</sub>) ke dalam ketiga lapisan mesopori tersebut. Sampai saat ini, belum ada studi tentang rasio optimum antara volume larutan MAPbI<sub>3</sub> yang diteteskan ke dalam lapisan mesopori dengan volume atau luas area aktif sel-surya yang menghasilkan PCE yang maksimum. Terlebih pembuatan PSC umumnya dilakukan pada kondisi inert tanpa oksigen dan kelembaban udara yang rendah ( $< 10\%$ ), karena perovskite sangat sensitif terhadap kelembaban udara. Oleh karena itu, dalam studi ini dilakukan pengujian pengaruh volume larutan MAPbI<sub>3</sub> ke dalam lapisan mesopori PSC *HTL-free* untuk memperoleh rasio volume larutan terhadap luas area aktif PSC yang menghasilkan PCE maksimum. Nilai rasio ini sangat penting untuk optimasi pembuatan modul PSC atau *scaling-up* PSC *HTL-free* berbasis karbon. Pembuatan PSC dilakukan pada kondisi ruang dengan temperatur  $25^\circ\text{C}$  dan kelembaban udara yang tinggi dan fluktuatif yaitu antara 80-90%.

## 2. Metode Penelitian

Bahan yang digunakan untuk pembuatan PSC *HTL-free* adalah bubuk timbal iodida (PbI<sub>2</sub> 99%), metilamonium iodide (CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>I atau MAI 98%), pelarut DMF (*N,N-Dimethylformamide*, anhydrous, 99,8%) produk Sigma Aldrich, kit sel-surya dengan struktur gelas/FTO/TiO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub>/Karbon, ligan 5-AVAI (*Ammonium Valeric Acid Iodide*), Karbon pasta (Elcocarb G/SP) dari Solaronix. Lapisan TiO<sub>2</sub> terdiri dari lapisan padat (*blocking layer*, bl) dan lapisan mesopori (mp).

Larutan MAPbI<sub>3</sub> dibuat dengan melarutkan campuran 159 mg MAI dan 462 mg PbI<sub>2</sub> ditambah 7,35 mg 5-AVAI ke dalam 1 ml DMF. Larutan kemudian di-*stirring* dengan kecepatan 300 rpm pada temperatur  $70^\circ\text{C}$  selama 30 menit. Selanjutnya larutan disentrifugasi dengan kecepatan 3000 rpm selama 15 menit untuk menghasilkan larutan MAPbI<sub>3</sub> yang transparan.

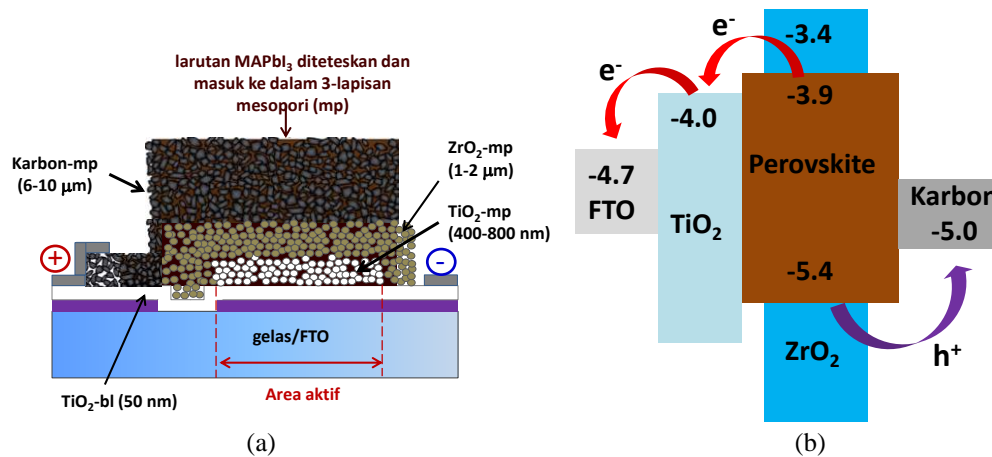
Karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan pada lapisan perovskite yang dibuat dengan meneteskan larutan MAPbI<sub>3</sub> ke dalam lapisan mesopori Karbon yang dibuat dengan *screen-printing* di atas gelas menggunakan *mesh* T15. Lapisan mesopori Karbon sebelumnya di-*annealing* pada temperatur  $350^\circ\text{C}$  selama 30 menit. Setelah peneteskan larutan MAPbI<sub>3</sub> di atas lapisan mesopori Karbon, kemudian di-*annealing* pada suhu  $70^\circ\text{C}$  selama 60 menit. Pengukuran XRD dilakukan di Pusat Survey Geologi (PSG) Bandung.

Sel-surya perovskite dibuat dengan meneteskan larutan MAPbI<sub>3</sub> ke dalam kit sel-surya melalui lapisan mesopori karbon, dengan variasi  $5\mu\text{L}$ ,  $10\mu\text{L}$ ,  $15\mu\text{L}$  dan  $20\mu\text{L}$ . Sebelum larutan diinfiltrasikan, terlebih dahulu dilakukan proses *annealing* terhadap kit sel surya tanpa perovskite pada temperatur  $350^\circ\text{C}$  selama 30 menit, untuk membuka lapisan mesopori karbon. Larutan yang diteteskan akan menyerap dan memenuhi semua lapisan mesopori (TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> dan karbon). Divais PSC, kemudian dipanaskan pada temperatur  $70^\circ\text{C}$  selama 60 menit agar terbentuk Kristal perovskite.

Kinerja sel surya perovskite diukur dengan mengukur arus-tegangan (I-V) dan menggunakan lampu LED putih dengan intensitas  $100 \text{ mW/cm}^2$  sebagai sumber cahaya. Pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan maju dari -0,8 Volt sampai 0,8 Volt dengan rentang 0,1 Volt. Pengukuran I-V dilakukan pada temperatur ruang ( $\sim 25^\circ\text{C}$ ) dan kelembaban udara relatif 80-90%.

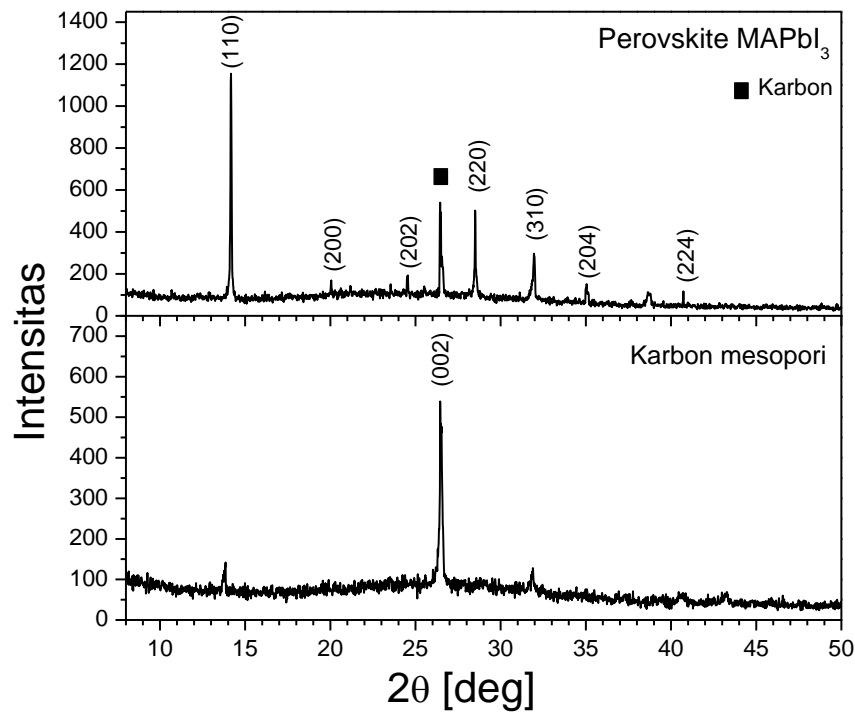
### 3. Hasil dan Pembahasan

Struktur PSC *HTL-free* dan skematik diagram tingkat energinya diperlihatkan pada Gambar 1. Kesesuaian fungsi kerja karbon (-5,0 eV) dengan tingkat energi valensi dari perovskite (-5,4 eV), membuat karbon dapat berfungsi sebagai elektroda, dimana *hole* akan mudah berpindah dari lapisan perovskite ke lapisan Karbon. Luas area aktif PSC adalah luas area yang terdiri dari lapisan FTO,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ , perovskite dan Karbon. Dalam penelitian ini, luas area aktif adalah  $1,50 \text{ cm}^2$ , sedangkan ketebalan masing-masing lapisan belum diketahui, karena diperlukan pengukuran penampang lapisan yang teliti menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM).

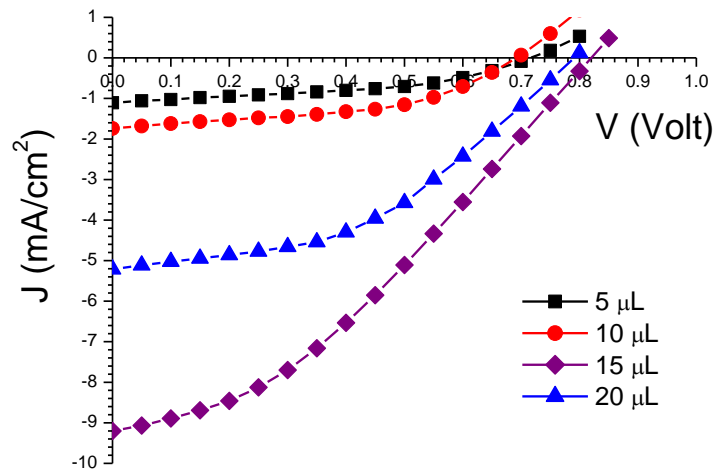


**Gambar 1.** (a) Skematik struktur PSC, dan (b) Diagram tingkat energi PSC HTL-free Berbasis Karbon

Gambar 2 menunjukkan pola XRD lapisan mesopori Karbon dan lapisan perovskite/karbon. Lapisan mesopori Karbon memiliki puncak difraksi dengan intensitas yang tinggi pada sudut  $2\theta = 26,44^\circ$  yang bersesuaian dengan bidang hkl (002). Pola XRD perovskite memperlihatkan puncak-puncak difraksi pada sudut  $14,15^\circ$ ;  $20,02^\circ$ ;  $24,51^\circ$ ;  $28,50^\circ$ ;  $31,94^\circ$ ;  $35,01^\circ$  dan  $40,73^\circ$  yang bersesuaian dengan puncak-puncak difraksi berturut-turut bidang kristal (110), (220), (202), (220), (310), (204) dan (224) [13, 14]. Pola XRD juga memperlihatkan puncak-puncak dominan pada sumbu x-y, yang berarti kristal perovskite terorientasi dalam arah bidang x-y. Tidak tampak puncak difraksi pada sudut sekitar  $12,66^\circ$  yang berasal dari  $\text{PbI}_2$  [14], artinya bahwa telah terbentuk kristal perovskite ( $\text{MAPbI}_3$ ) seluruhnya, tidak lagi ada material isolator  $\text{PbI}_2$  yang tidak terkonversi menjadi perovskite.



Gambar 2. Pola XRD lapisan mesopori karbon dan lapisan perovskite/karbon



Gambar 3. Kurva karakteristik rapat arus-tegangan (J-V) PSC dengan variasi volume larutan MAPbI<sub>3</sub>

Kurva karakteristik rapat arus-tegangan (J-V) PSC *HTL-free* untuk variasi volume larutan MAPbI<sub>3</sub> yang ditetaskan ke dalam kit sel-surya diperlihatkan pada Gambar 3. Pengukuran J-V dilakukan sesaat setelah proses *annealing* PSC dilakukan. Semua kurva J-V menunjukkan karakteristik dioda sambungan p-n. Hal ini berarti lapisan perovskite berfungsi sebagai lapisan-p dan karbon berfungsi sebagai lapisan penarik *hole* atau elektroda positif. Dengan demikian, walaupun struktur PSC ini tanpa HTL atau *HTL-free*, namun memperlihatkan karakteristik sambungan p-n. Kurva karakteristik J-V sangat dipengaruhi oleh jumlah volume larutan MAPbI<sub>3</sub> yang diinjeksikan ke lapisan mesopori PSC *HTL-free*, khususnya nilai rapat arus

hubung singkat ( $J_{SC}$ ), faktor pengisi atau *fill factor* (FF) dan efisiensi konversi daya (PCE). Sedangkan nilai tegangan hubung terbuka ( $V_{OC}$ ) hampir sama untuk semua volume larutan. Nilai parameter-parameter sel surya  $J_{SC}$ ,  $V_{OC}$ , F) dan PCE untuk semua variasi volume larutan MAPbI<sub>3</sub> ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Nilai-nilai parameter PSC HTL-free untuk variasi volume larutan MAPbI<sub>3</sub>

Volume larutan MAPbI <sub>3</sub> (μL)	$J_{SC}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{OC}$ (Volt)	FF	PCE (%)
5	1,11	0,725	0,44	0,35
10	1,74	0,675	0,49	0,58
15	9,07	0,825	0,35	2,63
20	5,21	0,775	0,44	1,79

Nilai  $J_{SC}$  meningkat seiring dengan meningkatnya volume larutan MAPbI<sub>3</sub> dari 5 μL sampai 15 μL, namun kembali berkurang jika volume ditambah menjadi 20 μL. Nilai  $J_{SC}$  untuk volume 15 μL meningkat 9 kali dibandingkan dengan volume 5 mL. Hal ini berarti volume 15 μL mampu menutupi seluruh lapisan mesopori mulai dari TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> sampai Karbon. Penambahan volume larutan mengakibatkan larutan meluber keluar permukaan Karbon dan merusak atau menutupi elektroda perak sebagai kontak. Nilai  $J_{SC}$  berkaitan erat dengan jumlah absorpsi cahaya/foton yang diserap yang dikonversikan ke dalam muatan-muatan bebas di lapisan aktif perovskite MAPbI<sub>3</sub> yang selanjutnya menjadi arus listrik atau dikenal sebagai *Incident Photon to Current Efficiency* (IPCE) sesuai dengan persamaan:

$$J_{SC} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} q \eta_{IPCE}(\lambda) N_{ph}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

dengan  $\lambda_{min}$  dan  $\lambda_{max}$  adalah batas rentang panjang gelombang yang diserap, dimana untuk perovskite MAPbI<sub>3</sub>, nilai  $\lambda_{min}$  adalah 400 nm dan nilai  $\lambda_{max}$  adalah 800 nm. Sedangkan  $q$  adalah muatan elektron ( $1,6 \times 10^{-19}$  C),  $\eta_{IPCE}$  adalah efisiensi IPCE dan  $N_{ph}$  adalah jumlah photon yang diserap oleh perovskite. Semakin banyak cahaya yang diserap oleh perovskite semakin banyak nilai  $N_{ph}$ , sehingga  $J_{SC}$  meningkat.

Nilai tegangan terbuka  $V_{OC}$  hampir sama untuk semua variasi volume larutan. hal ini karena  $V_{OC}$  hanya dipengaruhi oleh perbedaan fungsi kerja antara TiO<sub>2</sub> sebagai tipe-n dan tingkat energi valensi dari perovskite. Umumnya nilai  $V_{OC}$  untuk struktur PSC *HTL-free* berbasis karbon adalah 0,9 Volt [8,9]. Nilai  $V_{OC}$  yang masih rendah kemungkinan disebabkan oleh belum optimalnya kontak antara lapisan perovskite dengan TiO<sub>2</sub> sebagai ETL. Buruknya kontak antara lapisan perovskite dengan TiO<sub>2</sub> juga menyebabkan rendahnya nilai FF yang masih jauh dari ideal yaitu di atas 0,7 [1]. Diperlukan optimasi teknik infiltrasi perovskite atau perbaikan kontak antara perovskite dengan TiO<sub>2</sub> dan perovskite dengan Karbon melalui penambahan molekul aditif yang bersifat konduktif. Rekayasa antarmuka (*interface engineering*) antara lapisan provskite dengan TiO<sub>2</sub> dan antara perovskite dengan Karbon sangat

diperlukan untuk meningkatkan nilai FF dan PCE dari sel-surya. Baru-baru ini, Alharbi et al berhasil meningkatkan PCE sel-surya perovskite melalui modifikasi permukaan perovskite dengan ETL melalui pemberian garam amonium organik [15].

Nilai PCE maksimum sebesar 2,63 % diperoleh untuk volume larutan MAPbI<sub>3</sub> 15  $\mu\text{L}$ , yang merupakan kontribusi besar dari nilai J<sub>SC</sub> yang tinggi terkait dengan jumlah foton yang diserap sesuai dengan persamaan (1). Dari hasil tersebut, rasio optimum antara volume larutan MAPbI<sub>3</sub> dengan luas area aktif dalam PSC *HTL-free* adalah 10  $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ . Nilai ini dapat digunakan sebagai acuan untuk pembuatan sel-surya dengan luas area aktif yang besar dalam pembuatan modul PSC *HTL-free* berbasis karbon sebagai elektroda.

#### 4. Kesimpulan

Telah berhasil dilakukan pembuatan PSC *HTL-free* dengan luas area aktif 1,5 cm<sup>2</sup> pada kondisi temperatur ruang dan kelembaban udara yang tinggi dan fluktuatif. PSC *HTL-free* dibuat infiltrasi larutan metilamonium timbal iodida atau MAPbI<sub>3</sub> pada kit sel-surya dengan struktur gelas/FTO/TiO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub>/Karbon produk komersial dari Solaronix dengan variasi volume 5, 10, 15 dan 20  $\mu\text{L}$ . Hasil pengukuran karakteristik J-V menunjukkan bahwa parameter-parameter sel-surya dipengaruhi oleh volume larutan yang diinfiltrasikan/diteteskan, terutama nilai J<sub>SC</sub> dan PCE yang berkaitan dengan jumlah absorpsi cahaya oleh lapisan perovskite. PCE maksimum 2,63 % diperoleh untuk volume 15  $\mu\text{L}$ , sehingga rasio optimum untuk pengembangan PSC *HTL-free* dengan luas area aktif yang besar adalah 10  $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ .

#### Ucapan Terima Kasih

Riset ini dibiayai oleh Hibah Internal Universitas Padjadjaran (HIU) Skema Riset Kompetensi Dosen Unpad (RKDU) Tahun 2019, sesuai dengan Surat Perjanjian Pelaksanaan Riset Hibah Internal Universitas Padjadjaran Batch 1 Tahun Anggaran 2019, Nomor: 3332/UN6.D/LT/2019, tanggal 24 April 2019

#### Daftar Pustaka

1. M. K. Assadi, S. Bakhoda, R. Saidun, H. Hanaei, Recent progress in perovskite solar cells, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81 (2018), p. 2812–2822.
2. S.D. Stranks, G.E. Eperon, G. Grancini, C. Menelaou, M.J. Alcocer, T. Leijtens, L.M. Herz, A. Petrozza, H.J. Snaith, Electron-hole diffusion lengths exceeding 1 micrometer in an organometal trihalide perovskite absorber, *Science* Vol. 342 (2013), p. 341–344.
3. W.S. Yang, B.-W. Park, E.H. Jung, N.J. Jeon, Y.C. Kim, D.U. Lee, S.S. Shin, J. Seo, E.K. Kim, J.H. Noh, Iodide management in formamidinium-lead-halide-based perovskite layers for efficient solar cells, *Science* Vol. 356 (2017), p.1376–1379.
4. M. Grätzel, The light and shade of perovskite solar cells, *Nature Materials* Vol. 13 (2014), p. 838–842.
5. T.A. Berhe, W.-N. Su, C.-H. Chen, C.-J. Pan, J.-H. Cheng, H.-M. Chen, M.-C. Tsai, L.-Y. Chen, A.A. Dubale, B.-J. Hwang, Organometal halide perovskite

- solar cells: degradation and stability, *Energy Environmental Science* Vol. 9 (2016), p. 323–356.
6. P. Docampo, T. Bein, A long-term view on perovskite optoelectronics, *Accounts of Chemical Research* Vol. 49 (2016), p. 339–346.
  7. L. Etgar, P. Gao, Z. Xue, Q. Peng, A.K. Chanderan, B. Liu, M.K. Nazeeruddin, M. Grätzel, Mesoscopic CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> heterojunction solar cells, *J. of American Chemical Society* Vol. 134 (2012), p. 17396–17399.
  8. Z. Ku, Y. Rong, M. Xu, T. Liu, H. Han, Full printable processed mesoscopic CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> heterojunction solar cells with carbon counter electrode, *Scientific Reports* Vol. 3 (2013), 3132 (5-pages).
  9. A. Mei, X. Li, L. Liu, Z. Ku, T. Liu, Y. Rong, M. Xu, M. Hu, J. Chen, Y. Yang, M. Grätzel, H. Han, A hole-conductor-free, fully printable mesoscopic perovskite solar cell with high stability, *Science* Vol. 345 (2014), p. 295–298.
  10. K. Domanski, J.-P. Correa-Baena, N. Mine, M.K. Nazeeruddin, A. Abate, M. Saliba, W. Tress, A. Hagfeldt, M. Grätzel, Not all that glitters is gold: metal-migration-induced degradation in perovskite solar cells, *ACS Nano* Vol. 10 (2016), p. 6306–6314.
  11. H. Chen, S. Yang, Carbon-based perovskite solar cells without hole transport materials: the front runner to the market?, *Advanced Materials* Vol. 29 (2017), 1603994 (16-pages).
  12. R. Hu, L. Chu, J. Zhang, X.a. Li, W. Huang, Carbon materials for enhancing charge transport in the advancements of perovskite solar cells, *J. of Power Sources* Vol. 361 (2017), p. 259-275
  13. J. Burschka, N. Pellet, S. J. Moon, R. H. Baker, P. Gao, M. K. Nazeeruddin and M. Grätzel, Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells, *Nature*, vol. 499,( 2013), p. 316–319.
  14. A. Bahtiar, N. A. Syifa, E. S. Nurazizah, L. Safriani, Sifat Optik Dan Struktur Kristal Material Perovskite Yang Disintesis Dari Baterai Bekas Mobil, *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika* Vol. 01, No. 02 (2017), p. 86 – 93.
  15. E. A. Alharbi, A. Y. Alyamani, D. J. Kubicki, A. R. Uhl, B. J. Walder, A. Q. Alanazi, J. Luo, A. Burgos-Caminal, A. Albadri, H. Albrithen, M. H. Alotaibi, J.-E. Moser, S. M. Zakeeruddin, F. Giordano, L. Emsley, M. Graetzel, Atomic-level passivation mechanism of ammonium salts enabling highly efficient perovskite solar cells, *Nature Communications* Vol. 10 (2019), p. 1–9.