

## PEROVSKITE SOLAR CELLS YANG STABIL UDARA DAN EFISIEN MENGGUNAKAN NANOSTRUKTUR ZnO SEBAGAI ELEKTRON TRANSPORT MATERIAL

Herna<sup>1</sup>, Farhan Lutfi<sup>2</sup>, Ebigail Nur Tabita Tambunan<sup>1</sup>, Yessi Meinarti<sup>3</sup>, Ari Sulistyono Rini<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Fisika FMIPA Universitas Riau

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin FT Universitas Riau

<sup>3</sup>Jurusan Kimia FMIPA Universitas Riau

\*E-mail korespondensi: [ari.sulistyono@lecturer.unri.ac.id](mailto:ari.sulistyono@lecturer.unri.ac.id)

### ABSTRACT

*The latest generation of photovoltaic cells are perovskite-based solar cells that can be fabricated through a simple and affordable process using high-efficiency solar power. This review also present zinc oxide (ZnO) adopted as an electron transport material (ETM) layer in the planar perovskite solar cells due to its simple synthesis and excellent electrical properties. ZnO ETM in conventional perovskite. Doping Aluminium (Al) with ZnO (AZO) was used the organic cation ( $\text{CH}_3\text{NH}^+$ ) of perovskite. The AZO ETM was prepared by spin coating technique with AZO sol-gel 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 and 3% Al doping. The perovskite solar cells with AZO ETM above 1.5% Al doping exhibits better and stable the performance cells because doing so can encourage the charge transporting and match the band energy with  $\text{MAPbI}_3$  compared to pure ZnO.*

**Keywords:** Perovskite Solar Cells, ZnO ETM, AZO ETM.

### ABSTRAK

*Sel fotovoltaik generasi terakhir adalah sel surya berbasis perovskite yang dapat difabrikasi melalui proses sederhana dan terjangkau dengan menggunakan tenaga surya efisiensi tinggi. Ulasan ini menyajikan seng oksida (ZnO) yang diadopsi sebagai bahan transpor elektron (ETM) pada sel surya perovskite planar karena sintesisnya yang sederhana dan sifat listrik yang sangat baik. ZnO ETM dalam sel surya perovskite konvensional menunjukkan efisiensi yang rendah karena ZnO akan bereaksi dengan kation organik ( $\text{CH}_3\text{NH}^+$ ) dari perovskite. Penyisipan unsur aluminium (Al) ke dalam ZnO (AZO) lazim digunakan untuk meningkatkan sifat fisikokimia ZnO. Pada ulasan ini akan dibahas tentang AZO ETM (Al-doped ZnO untuk ETM) yang dibuat dengan teknik spin coating dengan sol-gel pada 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 dan 3% doping Al. Sel perovskite dengan AZO ETM dengan konsentrasi doping Al >1,5% menunjukkan kinerja sel yang lebih baik dan pencocokan energi pita dengan  $\text{MAPbI}_3$  dibandingkan dengan ZnO murni.*

**Kata kunci:** Sel Surya Perovskite, ZnO ETM, AZO ETM.

Diterima 21-04-2022 | Disetujui 25-06-2022 | Dipublikasi 31-07-2022

### PENDAHULUAN

Sumber energi berbasis bahan bakar fosil sebagian besar memenuhi semua kebutuhan energi saat ini. Konsumsi energi meningkat secara eksponensial karena pertumbuhan penduduk yang cepat dan peningkatan energi per kapita [1]. Namun, seiring dengan meningkatnya permintaan energi penipisan bahan bakar fosil pun semakin cepat. Sehingga perlu dikembangkan teknologi energi bersih

untuk memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat. Energi matahari adalah sumber energi terbarukan yang paling melimpah, dimana melalui sel fotovoltaik energi matahari dapat langsung diubah menjadi energi listrik [2]. Sel surya adalah perangkat yang menggunakan tenaga surya dan diubah menjadi energi listrik menggunakan prinsip fotovoltaik.

Sel surya generasi terakhir yang merupakan pengembangan dari *dye sensitized solar cells* (DSSC) adalah *perovskite solar cells* (PSC).

PSC telah mencapai *power conversion efficiency* (PCE) hingga mencapai 23,3% dalam beberapa tahun terakhir [3]. Perovskite halida hibrida adalah senyawa organik dan anorganik dengan rumus umum  $ABX_3$ , dimana A adalah kation ammonium ( $CH_3NH_3^+$ ), B adalah logam Pb/Sn dan X adalah anion halida (Cl, Br, atau I) [4, 5]. Struktur kristal senyawa tipe perovskite umumnya digunakan untuk sel surya seperti  $CH_3NH_3PbI_3$ ,  $CH_3NH_3PbCl_3$ ,  $CH_3NH_3PbBr_3$ ,  $CH_3NH_3GeCl_3$ , dan  $CH_3NH_3SnCl_3$ . Senyawa *methylammonium lead iodine perovskite*  $CH_3NH_3PbI_3$  atau  $MAPbI_3$  adalah perovskite halida hibrida pertama [4].

Stabilitas dan histeresis masih menjadi masalah yang menantang sehingga membatasi masalah komersialisasi PSC. Struktur perangkat tipikal untuk PSC berisi *electron transport layer* tipe-n (ETL), lapisan penyerap cahaya, dan *hole transport layer* tipe-p (HTL). Salah satu bahan yang berperan penting dalam pengoptimalan efisiensi PSC adalah bahan *electron transport material* (ETM) yang terbuat dari semikonduktor oksida logam seperti ZnO dan  $TiO_2$  [3].

Pemilihan bahan ETM dalam PSC harus memenuhi kriteria yaitu ETM harus sepenuhnya menutupi lapisan elektroda atau perovskite untuk mencegah lubang kecil dan *shunting*, ETM yang digunakan dalam struktur planar dan mesopori PSC harus memiliki transmisi optik yang tinggi dan indeks bias yang sesuai untuk mengurangi kehilangan energi optik [6], ETM harus memiliki keselarasan yang sesuai antara *conduction band minimum* (CBM) atau *lowest unoccupied molecular orbital* (LUMO) dan mobilitas elektron ETM harus cukup tinggi untuk efisiensi transpor elektron, serta ETM harus memiliki stabilitas yang baik dan kondisi fabrikasi yang sesuai dan kompatibel dengan bahan dan proses sebelum atau selanjutnya [7].

Seng oksida (ZnO) adalah ETM yang banyak digunakan sebagai alternatif untuk  $TiO_2$  di DSCC dan sel surya polimer [6]. Baru-baru ini PSC berbasis ZnO telah diteliti secara sistematis yang menunjukkan bahwa PSC berbasis ZnO memiliki keunggulan

dibandingkan  $TiO_2$  dan lainnya yaitu ZnO memiliki CBM serupa ( $\cong 4.3$  eV, relatif terhadap tingkat vakum dan lebar celah pita  $> 3$  eV) [7]. ZnO memiliki transmisi optik yang sangat tinggi. Selain itu, ZnO memiliki mobilitas elektron lebih tinggi yang berpotensi meningkatkan efisiensi transpor elektron dan serta mampu mengurangi terjadinya rekombinasi yang dapat menurunkan efisiensi sel. Sebagai ETM, ZnO mudah dibuat dengan proses larutan suhu rendah sehingga ZnO ideal untuk pengendapan substrat yang sensitif terhadap panas [7] sehingga ZnO memiliki sifat yang mudah dikristalisasi dan dapat diproduksi dengan biaya dan anggaran termal yang lebih rendah karena anil suhu tinggi tidak diperlukan dalam sebagian proses fabrikasi ZnO sehingga dapat digunakan dalam perangkat fleksibel [6].

Namun, cacat pada permukaan ZnO seperti gugus hidroksil dan kekosongan oksigen membawa degradasi PSC yang serius saat menggunakan nanostruktur ZnO sebagai ETL [8]. Baru-baru ini, strategi untuk mengatasi masalah yang disebutkan di atas termasuk modifikasi ZnO dengan memasukkan bahan organik dan anorganik untuk menghalangi kontak langsung antara perovskite dan ZnO [9] atau doping  $Li^+$ ,  $Cs^+$ , atau ion  $Al^{+3}$  untuk meningkatkan kinerja perangkat [10].

Pada artikel ini membahas tentang salah satu solusi yaitu ZnO doping Al atau yang disingkat dengan AZO. ZnO doping Al adalah lapisan ekstraksi yang sesuai untuk meningkatkan efek antarmuka ZnO/perovskite karena AZO ETM memiliki pencocokan pita yang lebih baik dengan perovskite dan lebih tahan terhadap asam daripada film ZnO [4]. AZO diterapkan sebagai ETL di PSC planar konvensional. AZO ETM secara signifikan dapat meningkatkan efisiensi sel perovskite dengan meningkatkan kepadatan pembawa muatan.

## METODE PENELITIAN

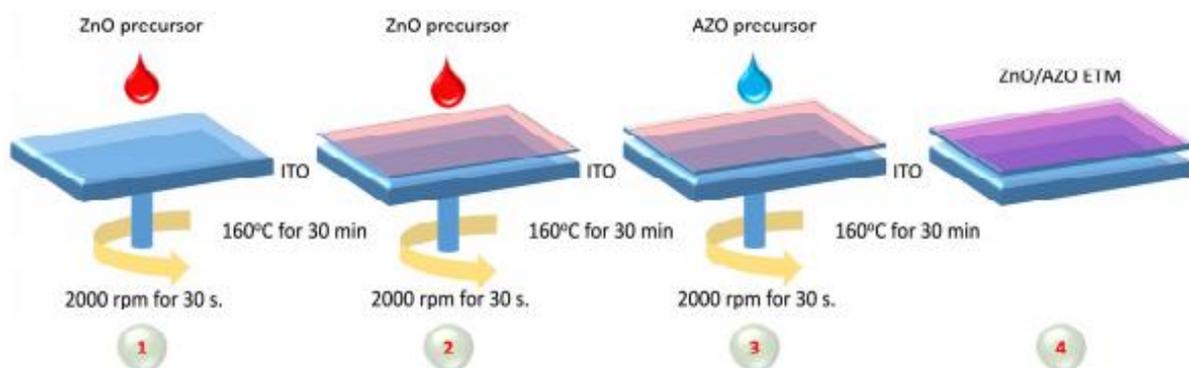
### Teknik Preparasi Film ZnO dan AZO ETM

Film tipis ZnO dan AZO yang dilapiskan pada substrat kaca *indium-doped tin oxide*

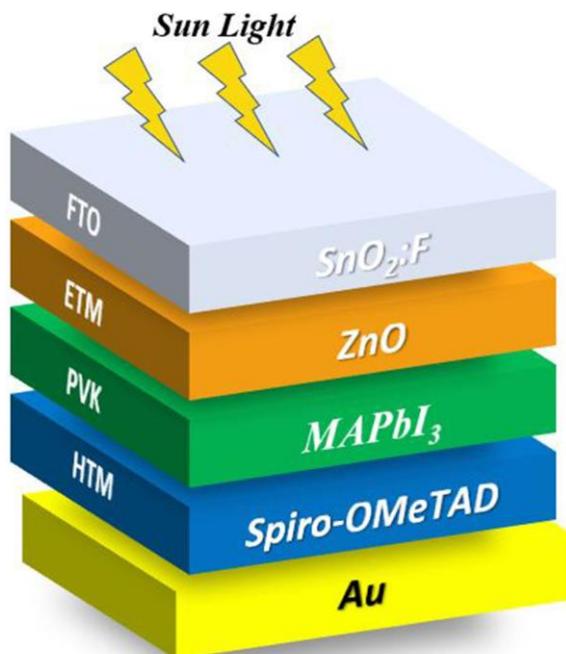
(ITO) yang dibuat dengan metode sol-gel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Pola ITO dibuat dengan menggunakan bubuk seng (Zn) dan larutan encer HCl [12]. Sebelum melakukan deposisi ETM yang dimodifikasi, substrat ITO yang telah di-*etching* terlebih dahulu dibersihkan di bawah sonikasi dengan larutan 2% deterjen pembersihalconox, air deionisasi, aseton, alkohol dan 2-proponal masing-masing selama 30 menit. Setelah itu substrat ITO dikeringkan dengan tembakan gas  $N_2$  dan dirawat dengan ozon ultraviolet selama 30 menit. Untuk larutan prekursor ZnO dibuat dengan cara melarutkan 0.75 seng asetat dihidrat ZnAc,  $(Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O)$  dalam 2-methoxyethanol (2-MOE,  $C_3H_8O_2$ ) dengan molar yang setara dengan rasio etanolamin (ETA,  $C_2H_7NO$ ), dan diaduk pada temperatur

$60^\circ C$  selama  $\pm 3$  jam, kemudian disimpan pada suhu ruang semalaman agar berbentuk larutan bening homogen. Selanjutnya, kondisi yang sama juga diterapkan pada larutan prekursor AZO yang menggunakan ammonium klorida heksahidrat ( $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ ) sebagai agen doping dengan rasio molar Al/(Al+Zn) berbeda 0%, 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0%, 2,5%, dan 3,0%. Substrat ITO yang dibersihkan dilapisi dengan larutan prekursor 0% pada 2000 rpm untuk 30 detik, dan dianil diatas pelat panas pada suhu  $160^\circ C$  selama 30 menit. Proses tersebut diulangi sebanyak 2 kali, lalu film AZO teratas dengan rasio doping yang berbeda dilapisi pada substrat ITO/ZnO dengan kecepatan dan durasi yang sama. Substrat dianil lagi pada suhu  $160^\circ C$  selama 30 menit.



**Gambar 1.** Ilustrasi skema deposisi ETM sekuensial yang dimodifikasi [12].



**Gambar 2.** Struktur sel surya berbasis [13].

### Preparasi Film Perovskite $MAPbI_3$

$MAPbI_3$  adalah bahan hemat biaya yang digunakan sebagai lapisan penyerap di PSC.  $MAPbI_3$  dibuat dengan metode dua langkah. Sebelum persiapan film  $MAPbI_3$  dilakukan, permukaan ETM dilapisi oleh Fenil-C<sub>60</sub>-butyric acid methyl ester (PBCM) (10 mg/ml) sebagai lapisan kompak untuk memblokir lapisan, dan disimpan pada suhu  $70^\circ C$  semalaman sebelum pendeposisian 80 mikroliter bagian larutan PBCM ke ETM pada 2000 rpm selama 30 detik. Langkah pertama, larutan 1 M  $PbI_2$  di dalam N, N-Dimetilformamida (DMF) disiapkan dan disimpan pada suhu  $70^\circ C$  selama semalaman. Lapisan  $PbI_2$  diendapkan ke permukaan ZnO/AZO dengan spin coating bagian 80

mikroliter untuk larutan  $\text{PbI}_2$  pada 3000 rpm selama 30 detik didalam  $\text{N}_2$ . Lalu, film yang telah disimpan dianil di atas plat panas (*hotplate*) pada suhu  $70^\circ\text{C}$  selama 10 menit. Langkah kedua, sebanyak 200 mikroliter dari 10 mg/ml metilamonium iodide (MAI) yang dilarutkan ke dalam 2-propanol adalah ditetaskan ke film  $\text{PbI}_2$  dan disimpan selama 40 detik sebelum dilakukan proses lapis putar (*spin coat*) pada 2000 rpm selama 30 detik sehingga terjadi pembentukan perovskite  $\text{MAPbI}_3$ . Kemudian film langsung dikeringkan pada suhu  $100^\circ\text{C}$  selama 3 menit.

### Persiapan Sel Surya

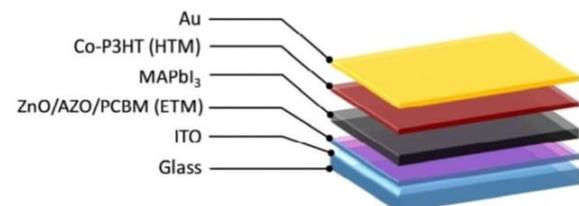
Setelah  $\text{MAPbI}_3$  film perovskite diendapkan, bahan pengangkut ketahanan (HTM) dilapisi dengan poli (3-hexylthiophene-2.5-diyI) (Co-P3HT) dengan spin coating bagian 80 mikroliter larutan Co-P3HT pada 1000 rpm selama 30 detik. Larutan Co-P3HT disiapkan dalam 2 langkah yaitu pertama, 30 mg P3HT dilarutkan dalam 1 ml chlorobenzene (CB) [12]. Setelah sonikasi selama 30 menit, larutan P3HT diaduk pada suhu kamar selama 2 jam. Lalu, 16 mikroliter asetonitril, 8 mikroliter 40tert-butil pridin (tBP) dan 8 mikroliter Co (II)-TFSI ditambahkan ke larutan P3HT, kemudian larutan Co-P3HT didiamkan pada suhu  $40^\circ\text{C}$  selama 1 jam lalu diaduk. Akhirnya, elektroda atas emas (Au) diuapkan secara termal ke film Co-P3HT dari sel surya perovskit. Struktur skematik ditunjukkan pada Gambar 3.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Morfologi dan Kristalinitas

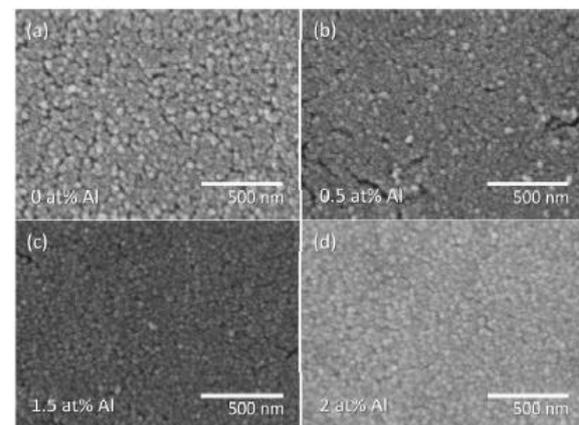
Morfologi permukaan dan penampang ETM dan  $\text{MAPbI}_3$  film perovskite diamati dengan mikroskop elektron pemindai emisi (FE-SEM). Kristalinitas  $\text{MAPbI}_3$  film perovskite diselidiki menggunakan geometri Bragg-Bretano dan difraktometri sinar-X (Cu K-alpha;  $\lambda = 0.154056 \text{ nm}$ ). Sifat optik diperoleh dengan spektroskopi UV-Vis. Tegangan arus foto (JV) karakteristik kurva sel surya perovskite diukur

menggunakan simulasi sinar matahari AM 1.5 pada  $100 \text{ mW/cm}^2$  dalam suasana ambien. Area aktif untuk penyinaran cahaya ditentukan dengan menggunakan photo mask seluas  $0.038 \text{ cm}^2$ . Dinamika muatan sel surya perovskite diselidiki menggunakan pengukuran tegangan sirkuit terbuka (OVCD).



**Gambar 3.** Skema diagram struktur PSC [11].

Gambar permukaan FE-SEM dari film ETM dengan coating setelah di anil pada  $160^\circ\text{C}$  seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Lapisan permukaan ZnO/AZO dengan 2% doping Al lapisan permukaan yang lebih halus, lebih padat dan lebih sedikit retakan dibandingkan dengan lapisan permukaan yang lainnya dengan doping 0% Al, 0.5% Al, dan 1.5% Al. Gambar 4. menunjukkan bahwa keretakan pada lapisan permukaan semakin berkurang dengan bertambahnya konsentrasi doping Al.



**Gambar 4.** FE-SEM lapisan permukaan film ZnO ETM dengan AZO pada (a) 0%Al (b) 0.5% Al (c) 1.5% Al dan (d) 2% Al [11].

### Sifat Optik dan Bahan Transport Elektron

Selain itu, film ZnO ETM dengan konsentrasi doping yang berbeda-beda menunjukkan transmisi rata-rata sekitar 80% pada rentang gelombang cahaya tampak (400-

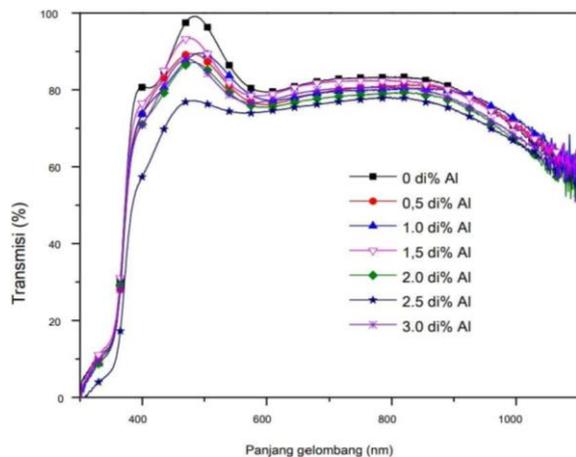
700 nm) dibandingkan dengan ITO seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Energi celah pita optik dapat dihitung menggunakan persamaan Beer-Lambert sebagai berikut:

$$(\alpha h\nu)^2 = C(h\nu - E) \quad (1)$$

dimana C adalah sebuah konstanta,  $h\nu$  adalah energi foton (eV) dan  $\alpha$  adalah singkatan dari koefisien absorpsi. Koefisien absorpsi didefinisikan sebagai berikut:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (2)$$

dimana T adalah transmisi dan d adalah ketebalan masing-masing.



**Gambar 5.** Sifat optik lapisan transpor elektron ZnO sol-gel AZO pada konsentrasi 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 dan 3% doping Al [11].

**Tabel 1.** Transmisi rata-rata (T) dan energi celah pita optik (E) dari film lapisan transpor elektron ZnO dengan sol-gel AZO.

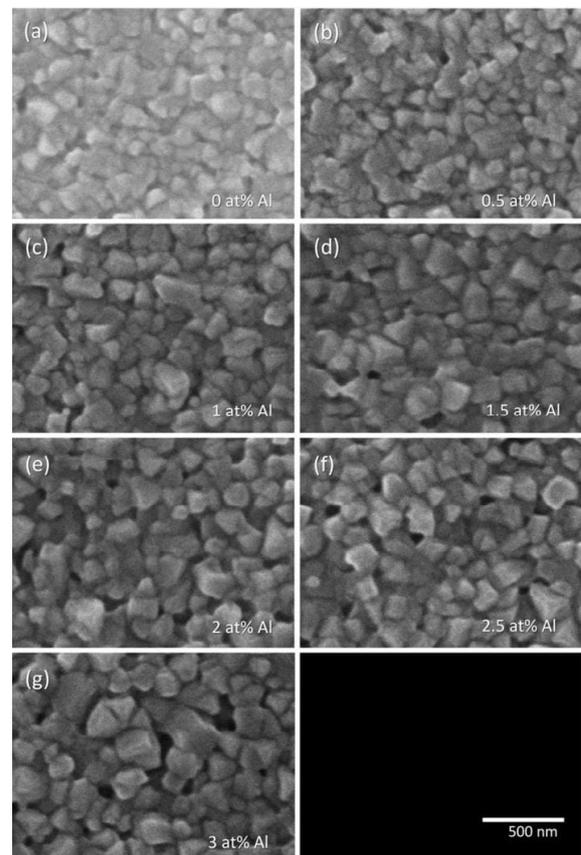
ZnO/AZO dengan doping pada % Al	T(%)	Eg(eV)
0	85.65	3.33 ± 0.01
0.5	80.98	3.33 ± 0.01
1	81.32	3.34 ± 0.01
1.5	83.27	3.33 ± 0.01
2	79.10	3.34 ± 0.01
2.5	73.81	3.32 ± 0.01
3	80.15	3.33 ± 0.01

Energi celah pita film lapisan transpor elektron ZnO dengan sol-gel AZO pada 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 dan 3% doping Al ditunjukkan

pada Tabel 1. berikut. Energi celah pita paling tinggi sekitar 3.32-3.34 eV. Sehingga, nilai energi celah pita tidak berkorelasi erat dengan konsentrasi doping Al karena memiliki kecil Al dalam struktur ZnO.

### Morfologi, Kristalinitas dari MAPbI<sub>3</sub> Bahan Perovskite dan Karakterisasi Perangkat PSC

Gambar 6. menunjukkan permukaan film perovskite MAPbI<sub>3</sub> yang dibuat dengan spin coating di atas lapisan transpor elektron ZnO dengan persentasi Al pada ZnO 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 dan 3%. Semua film mempunyai lubang kecil dan besar yang menyebabkan kontak langsung antara lapisan ETM dan HTM.

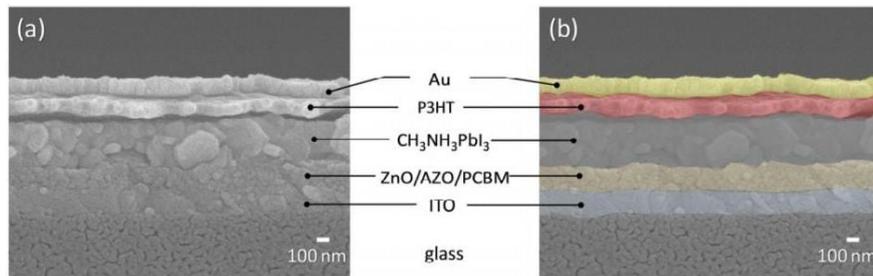


**Gambar 6.** FE-SEM dari MAPbI<sub>3</sub> film perovskite pada film ZnO dengan sol-gel AZO pada 0%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5%, dan 3% doping Al [11].

Gambar 7. menunjukkan citra penampang lintang FE-SEM sel surya perovskite. Lapisan ZnO/AZO ETM dilapisi substrat kaca ITO dengan spin coating memiliki ketebalan sekitar

200 nm. MAPbI<sub>3</sub> lapisan yang dipintal ke permukaan lapisan ETM memiliki ketebalan sekitar 400 nm. Lapisan terakhir, ketebalan lapisan pengangkut lubang (HTM) dengan P3HT sekitar 120 nm. Elektroda sel surya

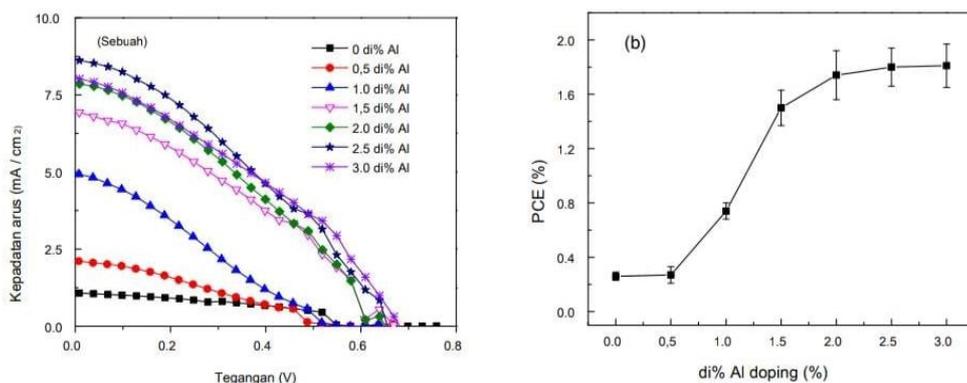
perovskite menggunakan teknik penguapan Au dengan ketebalan ±150 nm. Dibawah ini merupakan gambar perbedaan antara grafik sel surya perovskite asli dan sel surya perovskite dengan doping Al.



**Gambar 7.** Grafik sel surya perovskite (a) asli dan (b) didoping Al [11].

Karakteristik fotovoltaiik yang berbeda pada konsentrasi doping Al yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 8. Parameter fotovoltaiik seperti arus hubung singkat (Jsc), tegangan sirkuit terbuka (Voc), dan faktor pengisian (FF) dirangkum dalam Tabel 2. Awalnya, PCE sel untuk 0.5% doping Al menunjukkan sedikit peningkatan, tetapi ketika konsentrasi doping Al ditambah PCE sel meningkat secara signifikan dan stabilitas pada

doping Al > 1.5%. Karena ETM berbasis bisa bereaksi dengan kation organik (CH<sub>3</sub>NH<sup>+3</sup>) dari perovskite, sehingga sel surya perovskite berbasis ZnO ETM memiliki stabilitas dan efisiensi yang lebih rendah. Oleh sebab itu, AZO ETM digunakan untuk meningkatkan sifat fisikokimia ZnO karena AZO memiliki konduktivitas yang lebih tinggi, pencocokan pita yang lebih baik dengan MAPbI<sub>3</sub> dan lebih tahan terhadap asam daripada ZnO murni [13].



**Gambar 8.** Karakterisasi perangkat sel surya perovskite (a) JV kurva (b) PCE dari sel surya perovskite oleh transpor elektron lapisan film ZnO dengan sol-gel AZO pada 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 dan 3% doping Al [11].

**Tabel 2.** Parameter fotovoltaiik dari sel surya perovskite oleh lapisan film transpor.

ZnO/AZO (% Al)	Jsc (MA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	PCE (%)
0	1.02 ± 0.15	0.61 ± 0.03	0.40 ± 0.03	0.26 ± 0.03
0.5	1.70 ± 0.51	0.68 ± 0.10	0.23 ± 0.12	0.27 ± 0.12
1	4.55 ± 0.35	0.62 ± 0.03	0.27 ± 0.05	0.74 ± 0.05
1.5	6.59 ± 0.37	0.66 ± 0.02	0.35 ± 0.02	1.50 ± 0.02
2	7.71 ± 1.25	0.67 ± 0.03	0.34 ± 0.02	1.74 ± 0.02
2.5	8.46 ± 0.64	0.64 ± 0.01	0.34 ± 0.02	1.83 ± 0.02
3	8.59 ± 0.43	0.64 ± 0.02	0.33 ± 0.01	1.81 ± 0.01

## KESIMPULAN

Hasil penelusuran literatur mengenai ZnO/AZO yang diaplikasikan sebagai lapisan ETM pada sel surya perovskite planar menunjukkan kenaikan efisiensi yang signifikan akibat pendopingan Al pada ZnO. Doping Al dapat meningkatkan sifat fisikokimia ZnO. Sel surya perovskite berdasarkan AZO ETM menunjukkan Voc dan Jsc dengan lebih baik dan kinerja yang stabil. Oleh karena itu, doping Al dapat meningkatkan pengangkutan muatan dan kesesuaian pita energinya dengan MAPbI<sub>3</sub> yang lebih baik daripada ZnO murni. AZO ETM dapat meningkatkan reaksi antara sifat dasar ZnO dengan proton CH<sub>3</sub>NH<sup>3+</sup>.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan (Kemendikbud), Lembaga Pendidikan dan Pengabdian Masyarakat (LPPM), Universitas Riau yang telah memfasilitasi pelaksanaan kegiatan ini.

## REFERENSI

1. Benami, A. (2019). Effect of CZTS parameters on photovoltaic solar cell from numerical simulation. *J. Energy Power Eng*, **13**, 32-36.
2. Et-taya, L., Ouslimane, T., & Benami, A. (2020). Numerical analysis of earth-abundant Cu<sub>2</sub>ZnSn (S<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub>)<sub>4</sub> solar cells based on Spectroscopic Ellipsometry results by using SCAPS-1D. *Solar Energy*, **201**, 827-835.
3. Chen, R., Cao, J., Duan, Y., Hui, Y., Chuong, T. T., Ou, D., ... & Zheng, N. (2018). High-efficiency, hysteresis-less, UV-stable perovskite solar cells with cascade ZnO-ZnS electron transport layer. *Journal of the American Chemical Society*, **141**(1), 541-547.
4. AitDads, H., Bouzit, S., Nkhaili, L., Elkissani, A., & Outzourhit, A. (2016). Structural, optical and electrical properties of planar mixed perovskite halides/Al-doped Zinc oxide solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **148**, 30-33.
5. Suhaili, N., Taib, M. F. M., Yaakob, M. K., Hassan, O. H., & Yahya, M. Z. A. (2017). Properties of lead-free hybrid organic-inorganic halide perovskite CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>BX<sub>3</sub> using density functional theory. *Materials Today: Proceedings*, **4**(4), 5154-5160.
6. Li, S., Zhang, P., Wang, Y., Sarvari, H., Liu, D., Wu, J., ... & Chen, Z. D. (2017). Interface engineering of high efficiency perovskite solar cells based on ZnO nanorods using atomic layer deposition. *Nano Research*, **10**(3), 1092-1103.
7. Li, N., Song, L., Jia, Y., Dong, Y., Xie, F., Wang, L., ... & Zhao, N. (2020). Stabilizing perovskite light-emitting diodes by incorporation of binary alkali cations. *Advanced Materials*, **32**(17), 1907786.
8. Song, J., Bian, J., Zheng, E., Wang, X. F., Tian, W., & Miyasaka, T. (2015). Efficient and environmentally stable perovskite solar cells based on ZnO electron collection layer. *Chemistry Letters*, **44**(5), 610-612.
9. Si, H., Liao, Q., Zhang, Z., Li, Y., Yang, X., Zhang, G., ... & Zhang, Y. (2016). An innovative design of perovskite solar cells with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inserting at ZnO/perovskite interface for improving the performance and stability. *Nano Energy*, **22**, 223-231.
10. An, Q., Fassel, P., Hofstetter, Y. J., Becker-Koch, D., Bausch, A., Hopkinson, P. E., & Vaynzof, Y. (2017). High performance planar perovskite solar cells by ZnO electron transport layer engineering. *Nano Energy*, **39**, 400-408.
11. Bhoomanee, C., Ruankhama, P., Choopun, S., Prathan, A., & Wongratanaphisan, D. (2019). Effect of Al-doped ZnO for electron transporting layer in planar perovskite solar cells. *Materials Today: Proceedings*, **17**, 1259-1267.

12. Ruankham, P., Wongratanaphisan, D., Gardchareon, A., Phadungdhithhada, S., Choopun, S., & Sagawa, T. (2017). Full coverage of perovskite layer onto ZnO nanorods via a modified sequential two-step deposition method for efficiency enhancement in perovskite solar cells. *Applied Surface Science*, **410**, 393-400.
13. Ouslimane, T., Et-Taya, L., Elmaimouni, L., & Benami, A. (2021). Impact of absorber layer thickness, defect density, and operating temperature on the performance of MAPbI<sub>3</sub> solar cells based on ZnO electron transporting material. *Heliyon*, **7**(3), e06379.



Artikel ini menggunakan lisensi  
[Creative Commons Attribution  
4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)