

Potensi ZnO/ZnS sebagai elektron transport material pada sel surya perovskit

Potential of ZnO/ZnS as electron transport materials on Perovskite Solar Cells

Ilham Yurestira, Arie Purnomo Aji, Muhammad Feri Desfri, Ari Sulistyono Rini* dan Yolanda Rati

Received 22 October 2020

Accepted 5 January 2021

Published April 2021

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Riau, 28293, Indonesia

Abstrak. Sel surya berbasis *perovskite* merupakan sel fotovoltaik generasi terakhir yang mampu memanfaatkan energi surya dengan efisiensi tinggi dan dapat difabrikasi melalui proses yang sederhana dan murah. Sejak diperkenalkannya *perovskite solar cell* (PSC), efisiensi konversi dayanya telah mencapai efisiensi di atas 23% dalam waktu yang relatif singkat diiringi dengan peningkatan publikasi ilmiah di bidang ini. Penggunaan semikonduktor ZnO sebagai *Electron Transport Material* (ETM) yang merupakan salah satu bagian utama dalam PSC mulai dilirik akibat proses pembuatan yang lebih sederhana dibandingkan TiO₂. Seng oksida (ZnO) masih memiliki kelemahan yang dapat diatasi dengan penambahan ZnS untuk mengurangi rekombinasi pembawa muatan dari lapisan *perovskite* ke ETM. Tujuan dari artikel ini adalah untuk menyajikan tinjauan singkat tentang status terkini mengenai komposit ZnO/ZnS sebagai elektron transport material pada sel surya perovskit. Ulasan ini juga membahas peran penambahan ZnS dalam memperbaiki morfologi dalam ukuran nano dan sifat optik material sekaligus meningkatkan kinerja PSC beserta penjelasan mengenai mekanisme dasar operasi piranti untuk memberikan pemahaman yang lebih baik tentang sifat dari ZnO/ZnS sebagai ETM pada sel surya perovskit.

Abstract. *Perovskite-based solar cells are the latest generation of photovoltaic cells capable of utilizing solar energy at high efficiency and can be fabricated through a simple and inexpensive process. Since the introduction of the perovskite solar cell (PSC), its power conversion efficiency has reached efficiencies above 23% in a relatively short period of time accompanied by an increase in scientific publications in this field. The use of ZnO semiconductors as Electron Transport Material (ETM), which is one of the main parts of PSC, has begun to be noticed due to the simpler manufacturing process compared to TiO₂. Zinc oxide (ZnO) still has a weakness which can be overcome by adding ZnS to reduce the recombination of the charge carriers from the perovskite layer to the ETM. The aim of this article is to present a brief overview of the current status of ZnO/ZnS composites as an electron transport material in perovskite solar cells. This review also discusses the role of addition of ZnS in improving morphology in nanosize and optical properties of materials as well as improving PSC performance along with an explanation of the basic mechanism of device operation to provide a better understanding of the properties of ZnO/ZnS as ETM in perovskite solar cells.*

Keywords: *Perovskite solar cell, Composite, ZnO, ZnS dan Electron Transport Material.*

Pendahuluan

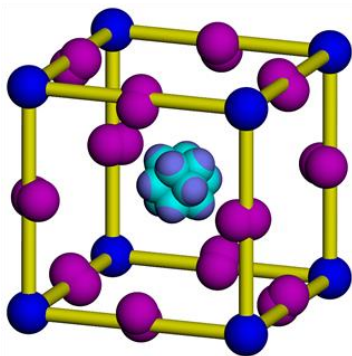
Sel surya merupakan suatu perangkat yang memanfaatkan energi cahaya matahari dan dikonversi menjadi energi listrik dengan prinsip fotovoltaik (Zhou *et al.*, 2018). Sel surya perovskit (PSC) merupakan sel surya generasi terakhir yang merupakan pengembangan dari *dye sensitized solar cells* (DSSC). Baru-baru ini PSC telah menarik perhatian banyak peneliti karena efektivitas biaya, kemudahan fabrikasi dan kinerja fotovoltaik yang sangat baik (Kojima *et al.*, 2009; Xing *et al.*, 2013). Saat ini, PSC menunjukkan efisiensi konversi daya (*Power Conversion Efficiency* - PCE) setinggi 23,7% pada 2019 (Chan *et al.*, 2019). Dalam pengoptimalan efisiensi sel surya perovskit, salah satu bahan yang berperan penting adalah bahan pentranspor elektron (*Electron Transport Material*-ETM) yang terbuat dari semikonduktor oksida logam seperti TiO₂ dan ZnO. TiO₂ merupakan material yang paling banyak digunakan sebagai bahan pentranspor elektron pada sel surya perovskit (Jeon *et al.*, 2014). Namun TiO₂ membutuhkan proses *annealing* pada suhu tinggi (diatas 450°C) untuk membentuk kristal TiO₂. Pada

sel surya perovskit berbasis ZnO kinerja yang diperoleh masih tergolong rendah (Nugroho, 2004) walaupun ZnO memiliki mobilitas elektron yang jauh lebih besar dibandingkan TiO₂ (Luo *et al.*, 2018). Keuntungan penggunaan ZnO yaitu harganya yang murah, persediaan di alam dalam jumlah yang melimpah, struktur kimia stabil, mudah disintesis, dan tidak beracun. Selain TiO₂ dan ZnO, terdapat ZnS (*Zinc Sulfide*) yang juga dapat dijadikan sebagai bahan transport elektron. ZnS memiliki pita konduksi minimum (*Conduction Band Minimum*-CBM) lebih cocok dengan orbital molekul terendah (*lowest un-occupied molecular orbital*, LUMO) dari material *perovskite* (*methyl ammonium plumbum triiodide*, MAPbI₃) daripada CBM dari ZnO (Ke *et al.*, 2016). ZnS adalah semikonduktor dengan celah pita lebar yang menunjukkan sifat fisis mirip dengan ZnO. ZnS juga memiliki mobilitas elektron yang tinggi dan sejauh ini dilaporkan berfungsi sebagai ETM untuk sel surya organik dan lapisan pasif antar muka untuk sel surya *quantum dot* DSSC (Xu *et al.*, 2012). Secara teori, tegangan sirkuit terbuka dari PSC didefinisikan sebagai perbedaan energi

antara pita konduksi minimum elektron transpor material dan pita valensi maksimum perovskit. Pergerakan elektron dari perovskit menuju ke permukaan ZnS menghasilkan tegangan keluaran sirkuit terbuka yang lebih tinggi dibandingkan perovskit berbasis ZnO (Yokoyama *et al.*, 2016). Selain itu, faktanya lapisan ZnS pada permukaan ZnO dapat berperan sebagai penghalang rekombinasi muatan antara ZnO dengan MAPbI₃ (bahan *perovskite*). Oleh karena itu, ZnS berpotensi meningkatkan arus sirkuit pendek (*short circuit current*) dari sel surya perovskit berbasis ZnO (Ke *et al.*, 2016).

Perovskite Solar Cells (PSC)

Sel surya perovskit (PSC) merupakan sel surya dengan bahan aktif material hibrida organik-anorganik halida berstruktur perovskit. Bahan berstruktur perovskit (sejenis mineral) pertama kali ditemukan di Pegunungan Ural oleh mineralogis asal Jerman bernama Gustav Rose pada tahun 1839 dan diberi nama *Perovskite* untuk menghormati Lev Perovski yang merupakan pendiri *Russian Geographical Society*.



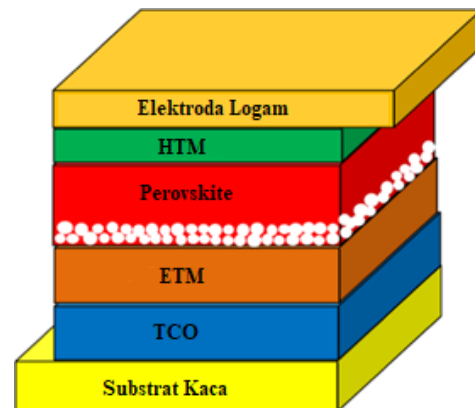
Gambar 1 Struktur *perovskite* (Oku, 2014)

Pada tahun 2009, ilmuwan Jepang Kojima dkk telah mengaplikasikan bahan *perovskite* yang berperan menggantikan pewarna (*dye*) sebagai penyerap cahaya dalam sel fotoelektrokimia. Kemampuan absorpsi dari perovskit ini lebih besar dibandingkan bahan sel surya lain (Kojima *et al.*, 2009). Sel surya perovskit atau yang dikenal sebagai PSC (*Perovskite Solar Cells*) telah mengalami perkembangan yang cukup pesat dalam hal peningkatan efisiensi dari 3,8% (Kojima *et al.*, 2009) hingga 23,7 (Chan *et al.*, 2019). Selain itu, bahan dan biaya produksi yang murah serta fabrikasi yang terbilang mudah menarik banyak minat para peneliti untuk terus melakukan penelitian agar memperoleh efisiensi yang tinggi. Gambar 1 merupakan stuktur dari perovskit.

Lapisan Penyusun Perovskite Solar Cell (PSC)

Struktur elektroda sel surya perovskit ditunjukkan pada Gambar 2. Sel surya berbasis perovskit tersusun atas lima lapisan, yaitu elektroda logam, lapisan pengangkut lubang (*hole transport material*, HTM), lapisan penyerapan perovskit, lapisan transpor elektron (seperti titanium

dioksida), lapisan katoda dari bahan oksida konduktif transparan (TCO) dan substrat kaca.



Gambar 2 Struktur elektroda sel surya perovskit (PSC) (Diao *et al.*, 2019)

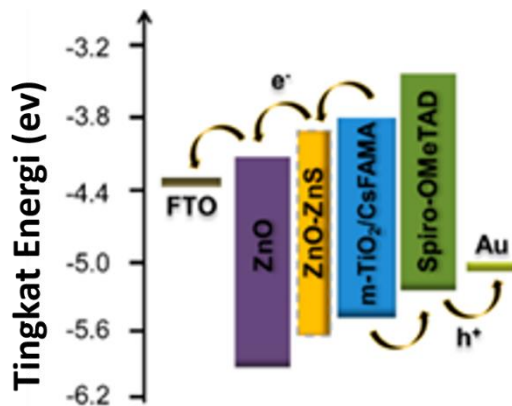
Bahan paling dasar (bawah) dalam susunan sel surya perovskit adalah substrat. Substrat yang digunakan adalah jenis *Transparent Conducting Oxides* (TCO) dengan konduktivitas listrik dan transparansi pada daerah visible yang tinggi (Ulya, 2012). Permukaan yang konduktif digunakan sebagai tempat pendeposisian ETM (*electron transport material*). Lapisan ETM berperan mengekstraksi elektron yang tereksitasi dari bahan perovskit dan membawanya menuju lapisan konduktif (substrat). Material ETM yang biasa digunakan adalah semikonduktor oksida logam dengan mobilitas elektron yang tinggi seperti seng oksida (ZnO) (Luo *et al.*, 2018) dan titanium dioksida (TiO₂) (Rini *et al.*, 2020). Bahan perovskit yang berada di atas lapisan ETM berperan sebagai lapisan penyerap cahaya. Bahan berstruktur perovskit yang sering digunakan sebagai penyerap cahaya adalah bahan logam halida organik-anorganik seperti *methylammonium lead trihalide* (CH₃NH₃PbX₃) dan *formamidinium lead trihalide* (H₂NCHNH₂PBX₃) karena memiliki celah pita energi yang sempit sehingga dapat menciptakan *exciton* yang banyak. Karakteristik bahan ini diantaranya memiliki sifat fotoelektrik yang sangat baik, koefisien penyerapan optik tinggi (hingga 10⁴ cm⁻¹) (Singh *et al.*, 2014), dan energi ikat eksiton rendah, sehingga elektron dan lubang dapat secara efektif ditransmisikan dan dikumpulkan (Sun *et al.*, 2014).

Lapisan *hole transport material* (HTM) berasal dari semikonduktor tipe-p. Bahan seperti Spiro-OMeTAD atau 2,2',7,7'-tetrakis[*N,N*-di(4-methoxyphenyl) amino]-9,9'-spirobifluorene dan poly [bis(4-phenyl)(2,4,6-trimethylphenyl)amine (PTAA) umumnya digunakan sebagai HTM karena memiliki kemampuan mobilitas lubang yang tinggi. Terakhir, terdapat elektroda elektroda logam yang berperan menerima elektron dari rangkaian luar. Elektroda yang biasa digunakan berasal dari bahan logam seperti emas (Au), perak (Ag) dan

platinum (Pt). Elektroda logam disini merupakan elektroda lawan dari substrat (anoda) yaitu sebagai katoda.

Prinsip Kerja Sel Surya Perovskit

Prinsip kerja PSC dijelaskan berdasarkan diagram pita energi seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Ketika sel terkena paparan cahaya matahari, lapisan perovskit akan menyerap foton dan elektron akan tereksitasi dari HOMO (*highest occupied molecular orbital*) ke LUMO (*lowest un-occupied molecular orbital*) sehingga tercipta eksiton (pasangan lubang dan elektron).



Gambar 3 Skema Diagram Tingkat Energi (Chen *et al.*, 2019)

Perbedaan energi ikat eksiton dari bahan perovskit mengakibatkan terbentuknya pembawa muatan bebas berupa elektron dan lubang untuk menghasilkan arus atau dapat bergabung kembali yang disebut peristiwa rekombinasi. Elektron bebas yang terakumulasi selanjutnya terdifusi menuju pita konduksi dari ETM. Sedangkan lubang bebas berdifusi menuju pita valensi pada HTM. Elektron selalu berpindah menempati tingkat energi yang lebih rendah, sedangkan lubang selalu menempati tingkat energi yang tinggi (Danilchuk *et al.*, 2016). Di ETM dan HTM, elektron dan lubang selanjutnya dibawa dan dikumpulkan ke FTO dan elektroda logam. Arus pada rangkaian luar mengalir dari sambungan FTO dan elektroda logam (Zhou *et al.*, 2018).

ZnO/ZnS Sebagai Electron Transport Material

Material ZnO yang diaplikasikan pada sel surya perovskit (PSC) berperan sebagai bahan pengangkut elektron (*electron transport material*-ETM). Selain itu, ZnO memiliki kemampuan ekstraksi elektron yang baik dan tingkat rekombinasi yang rendah (Yang *et al.*, 2017). Son dkk melaporkan bahwa ZnO *nanorod* mampu menggantikan TiO₂ sebagai ETM karena memiliki kemampuan mengumpulkan muatan yang efektif (Yang *et al.*, 2017). Kinerja PSC berbasis ZnO sebagai ETM masih lebih rendah dibandingkan dengan TiO₂. Masalah utama yang membatasi pengembangan lebih lanjut dari PSC berbasis ZnO, yaitu terjadinya rekombinasi pada

antarmuka *perovskite*/ETM. Rekombinasi antarmuka mengakibatkan penurunan kinerja PSC. Pada sel surya perovskit, material seng sulfida (ZnS) juga berfungsi sebagai bahan ekstraksi elektron yang secara efisien mampu mengurangi rekombinasi (Zhang *et al.*, 2018). Keunggulan seng sulfida mendapatkan perhatian banyak peneliti karena memiliki banyak potensi aplikasi (Zhang *et al.*, 2018). Penelitian sebelumnya telah berhasil menunjukkan penggunaan seng sulfida sebagai lapisan pengangkut elektron (ETM) dalam sel surya perovskit dengan efisiensi 1,64% (Oku, 2014). Bahan transpor elektron di sel surya perovskit, seperti TiO₂, tidak terlalu efisien untuk ekstraksi elektron di antarmuka sehingga menyebabkan histeresis tegangan-arus, dan juga mengalami degradasi di bawah penerangan UV. Bahan transpor elektron yang efisien harus memiliki keselarasan tingkat energi dengan lapisan aktif perovskit, mobilitas elektron tinggi untuk ekstraksi elektron dan struktur yang stabil untuk stabilitas jangka panjang (Yokoyama *et al.*, 2016).

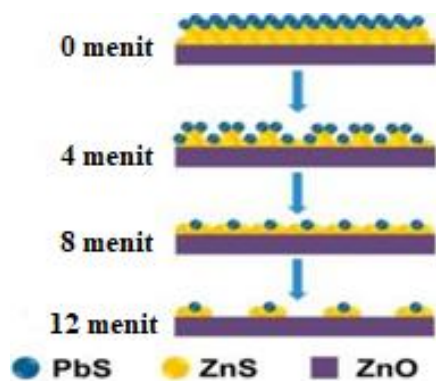
Belakangan ini, ZnO/ZnS mulai diaplikasikan pada sel surya perovskit sebagai ETM. Bahan ini bekerja mengumpulkan dan menghantarkan elektron yang tereksitasi dari bahan perovskit menuju substrat. Selain itu, ZnO/ZnS juga berperan menghambat terjadinya rekombinasi pembawa muatan pada antarmuka ZnO/perovskit sehingga transportasi muatan yang terjadi lebih efisien. Lapisan ZnO/ZnS yang dideposisikan di atas substrat juga berperan penting sebagai *hole blocking layer* untuk mencegah terjadinya interaksi antara lubang dengan substrat FTO (Oku, 2014).

Tabel 1 Perbandingan sifat listrik ZnO dan TiO₂ (Zhang *et al.*, 2018) dan ZnS (Stanislav and Sadovnikov., 2019)

Sifat	ZnO	TiO ₂	ZnS
Struktur Kristal	<i>Rocksalt, Zinc blende, Wurtzite</i>	<i>Rutile, Anatase, Brookite</i>	<i>Zinc blende, Cubic, Wurtzite</i>
Celah pita energi (eV)	3,2-3,3	3,0-3,2	3,50–3,76
Fungsi kerja permukaan (eV)	4,45-5,3	4,5-5,0	7
Mobilitas elektron (cm ² /V/S)	<i>Bulk ZnO: 205-300, Nanowire: 1000</i>	0,1-4	180
Indeks bias	2,0	2,5	2,42
Massa efektif elektron (m _e)	0,26	9	3,4
Konstanta dielektrik relatif	8,5	170	8,9
Koefisien difusi electron (cm ² /S)	<i>Bulk ZnO: 5,2, Electron: 1,7 x 10⁻⁴</i>	<i>Bulk TiO₂: 0,5, Electron: 10⁻⁸-10⁻⁴</i>	<i>Bulk ZnS: 3,68, Electron: 2,5 x 10⁻⁸</i>

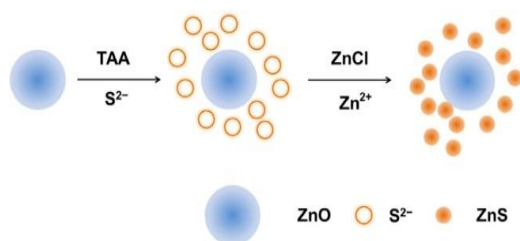
Sintesis ZnO/ZnS

Pembuatan ZnO/ZnS dengan cara mensintesis ZnS pada permukaan ZnO pernah dilaporkan menggunakan proses sulfidasi (Chen *et al.*, 2019; Ranjith *et al.*, 2018). Proses sulfidasi dilakukan dengan merendam substrat yang telah dilapisi ZnO ke dalam larutan thiourea ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$) melalui proses sputtering seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Skema proses sputtering (Sun *et al.*, 2014)

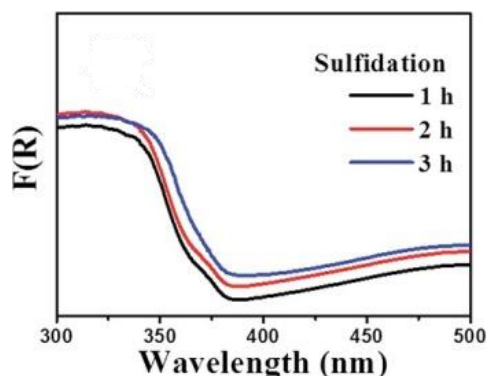
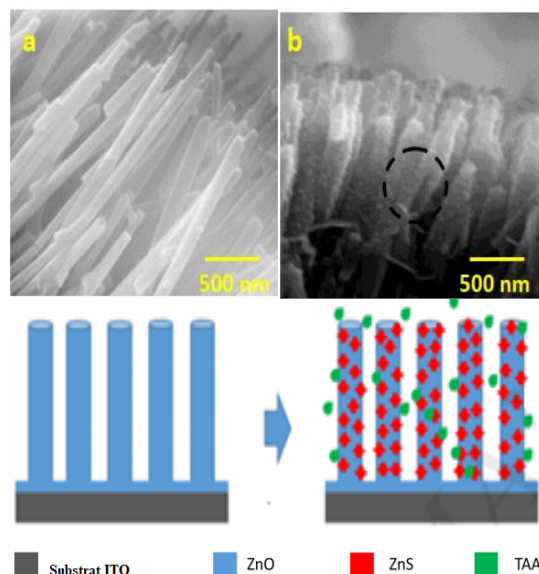
Walaupun proses pembuatannya dilakukan dalam waktu yang relatif singkat, namun untuk memperoleh lapisan ZnO/ZnS yang homogen masih menggunakan suhu yang tinggi.



Gambar 5 Ilustrasi skematis mekanisme pembentukan nanopartikel ZnO/ZnS (Zheng *et al.*, 2018)

Zheng dkk. (Zheng *et al.*, 2018) telah melakukan sintesis komposit core-shell ZnO/ZnS dengan spin coating sebagai metode pendeposisian dan proses annealing dilakukan tanpa menggunakan suhu tinggi (Gambar 5). Proses ini dilakukan dengan mensintesis ZnS secara langsung pada nanopartikel ZnO dalam larutan 2-propanol dengan prekursor thioacetamide ($\text{C}_2\text{H}_5\text{NS}$) dan seng klorida (ZnCl_2) yang akan membentuk endapan dan dilarutkan kembali ke dalam butanol sebelum dilakukan spin coating. Sintesis dengan metode sederhana ini menghasilkan sebagian nanopartikel ZnO dan ZnO/ZnS. Sampel ZnO dan ZnO/ZnS menunjukkan penumbuhan *nanorod* yang tegak lurus di atas substrat dengan diameter rata-rata sekitar 70-90 nm. *Nanorod core-shell* ZnO/ZnS yang disintesis secara vertikal menunjukkan dinding dari *nanorod* terdapat lapisan pembungkus dibandingkan dengan ZnO yang polos. Dengan penambahan ZnS ini terjadi peningkatan pada diameter dan permukaan yang

kasar akibat sampel tersulfidasi. Hal ini menyiratkan keberadaan ZnS di atas permukaan ZnO *nanorod*. Terlihat juga susunan *nanorod* ZnO/ZnS yang terbentuk lebih rapat dan seragam. Hasil ini menjadikan ZnO/ZnS dapat dijadikan sebagai lapisan penyerap elektron dan penghambat *hole* dalam mekanisme kerja sel surya *perovskite*.

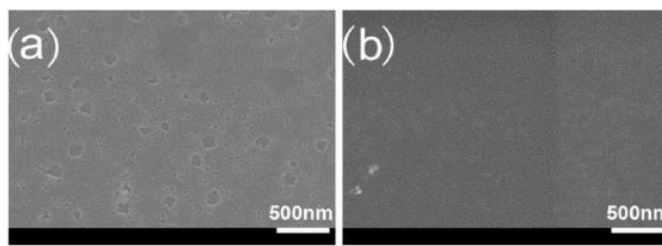


Gambar 7 Spektrum absorpsi optik komposit ZnO/ZnS (Liang *et al.*, 2018)

Kinerja Fotovoltalik ZnO/ZnS pada PSC

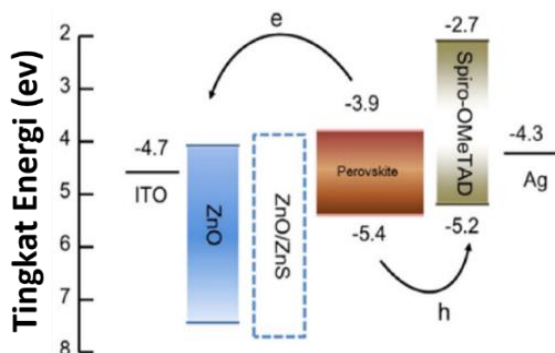
Liang dkk. (2018) meneliti pengaruh lamanya proses sulfidasi terhadap batang/rod ZnO/ZnS terhadap absorpsi permukaannya. Sulfidasi selama 3 jam menghasilkan permukaan butiran yang memiliki kerapatan tinggi yang sekaligus meningkatkan absorpsi (penyerapan) permukaan seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Kemampuan menyerap cahaya yang meningkat dari komposit ZnO/ZnS yang terbentuk diakibatkan oleh peningkatan pembentukan pusat kerusakan permukaan di lapisan kulit ZnS. Pembentukan lapisan seperti butiran permukaan meningkatkan hamburan cahaya selama sintesis, sehingga menciptakan jumlah butiran yang lebih tinggi dari pusat cacat permukaan dan akibatnya meningkatkan penyerapan cahaya serta aktivitas fotokatalitik (Liang *et al.*, 2018). Komposit ZnO/ZnS

core-shell yang disintesis menggunakan metode sintesis langsung ZnS di atas ZnO juga menunjukkan morfologi permukaan yang homogen dibandingkan dengan ZnO seperti yang terungkap dalam pemindaian mikroskop elektronik (SEM) (Ranjith *et al.*, 2018). Sel surya yang efisien dapat diperoleh dengan memastikan lapisan ETM yang terbentuk adalah kontinu, padat dan halus. Zheng dkk (Ranjith *et al.*, 2018) menggunakan filter untuk mendapatkan ukuran nanopartikel kecil dan seragam sebelum nanopartikel ZnO dan ZnO/ZnS di *spin-coated* pada substrat ITO.



Gambar 8. SEM sampel (a) ZnO dan (b) ZnO/ZnS (Ranjith *et al.*, 2018)

Gambar 8 menunjukkan hasil FESEM permukaan atas lapisan nanopartikel ZnO dan ZnO/ZnS. Gambar 8a menunjukkan substrat tidak dapat sepenuhnya tertutupi oleh nanopartikel ZnO. Beberapa lubang jarum (*pinhole*) dapat ditemukan pada substrat ITO. Setelah doping ZnS, pencampuran 0,05 M ZnS secara signifikan meningkatkan kualitas lapisan dan menghasilkan permukaan yang seragam, halus dan padat. Lapisan ZnS memiliki lubang jarum terkecil dan paling padat. Lapisan *pristine* ZnO dengan permukaan lubang jarum yang besar dapat mengakibatkan pengangkutan pembawa muatan yang buruk melalui kontak antarmuka yang rusak, sehingga rentan menyebabkan rekombinasi pembawa muatan (Ranjith *et al.*, 2018). Di sisi lain, pergeseran tingkat pita energi konduksi pada film ZnO/ZnS, seperti ditampilkan pada Gambar 9, menghasilkan penyelarasan tingkat energi yang lebih baik yang memfasilitasi ekstraksi muatan bertingkat. Pergeseran pita konduksi juga meningkatkan tegangan sirkuit terbuka (V_{oc}) PSC.



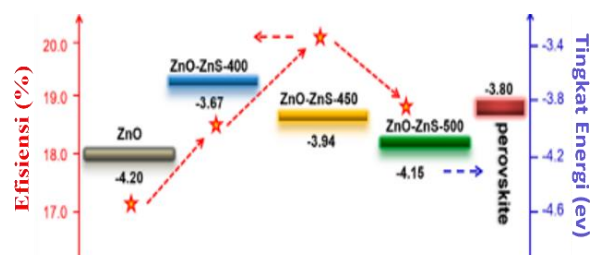
Gambar 9 Pergeseran tingkat pita energi konduksi pada film ZnO/ZnS

Kinerja PSC berbasis ZnO dan dengan pelapisan ZnO/ZnS ditunjukkan pada Tabel 2. Efisiensi yang didapatkan oleh piranti dengan ETM ZnO/ZnS memperoleh nilai yang lebih besar dibandingkan dengan ZnO. Hasil ini selaras dengan diagram tingkat energinya yang menyebabkan ETM ZnO/ZnS dapat mengekstraksi pembawa muatan sampai ke bahan *perovskite*.

Tabel 2 Kinerja fotovoltaiik PSC berdasarkan ETM ZnO dan ZnO/ZnS (Ranjith *et al.*, 2018)

ETM	ZnO	ZnO/ZnS
J_{sc} (mA/cm ²)	18.1 ± 0.8	21.2 ± 0.9
V_{oc} (V)	1.06 ± 0.02	1.08 ± 0.02
FF (%)	56.8 ± 2.0	60.1 ± 1.9
PCE (%)	10.9 ± 1.2	13.7 ± 1.2

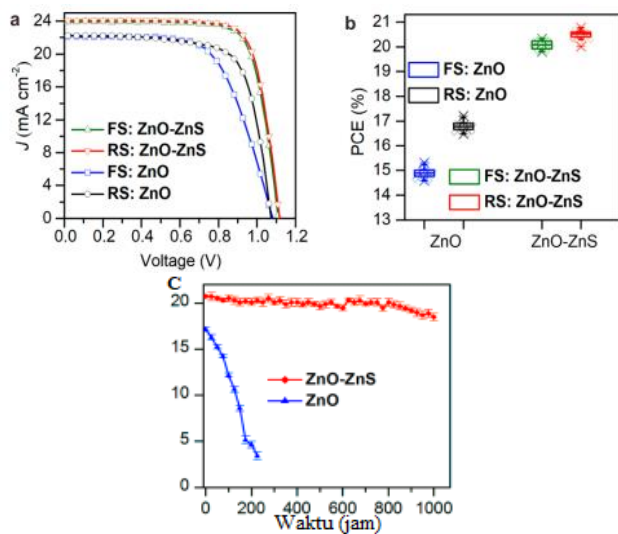
Kebergantungan efisiensi kerja PSC terhadap tingkat energi bahan ETM (ZnO dan ZnO/ZnS) yang diilustrasikan pada Gambar 10 juga menunjukkan ETM berbasis ZnO/ZnS memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel ZnO sebagaimana dilaporkan oleh Chen dkk. (2019). Strategi sederhana untuk mendapatkan lapisan ZnO/ZnS tersebut dilakukan melalui proses sulfidasi sehingga dapat diaplikasikan sebagai ETM pada PSC.



Gambar 10 Efisiensi kerja ETM berbasis ZnO, ZnO/ZnS-400, ZnO/ZnS-450, dan ZnO/ZnS-500 (Chen *et al.*, 2019)

Lapisan pemblokiran (*blocking layer*) ZnO disintesis melalui dekomposisi termal seng asetat pada FTO (oksida timah yang didoping fluor). Kemudian direndam dalam larutan alkohol dari bahan yang mengandung sulfur (misalnya, *tiourea*) dan akhirnya dianil di tungku peredam udara pada suhu tinggi (Chen *et al.*, 2019). Sulfidasi pada permukaan ZnO/ZnS berikatan kuat dengan Pb^{2+} (dari bahan *perovskite*) dan menciptakan jalur baru transpor elektron untuk mempercepat transfer elektron. Selain itu, komposit ZnO/ZnS ditemukan juga mampu mengurangi rekombinasi muatan antarmuka, sehingga menghasilkan efisiensi 20,7% dengan peningkatan stabilitas serta tidak terdapat histeresis yang terlalu besar (perbedaan pada pengukuran bias maju dan bias mundur). Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Chen dkk. (2019) menunjukkan kinerja sel surya perovskit berbasis ZnO/ZnS juga memiliki peningkatan efisiensi yang dapat

diketahui berdasarkan kurva karakteristik J_{sc} versus V_{oc} yang ditampilkan pada Gambar 11.



Gambar 11 Kinerja fotovoltaiik dari PSC berbasis ZnO dan ZnO/ZnS (a) Kurva J–V (b) PCE (c) Evolusi PCE piranti ZnO dan ZnO/ZnS dalam keadaan gelap di *drybox* (25 °C) (Chen *et al.*, 2019)

Piranti PSC berbasis ZnO/ZnS dengan area aktif $0,1 \text{ cm}^2$ memberikan nilai efisiensi (PCE-Power conversion efficiency) sebesar 20,71% pada bias mundur dan 20,33% pada bias maju, sedangkan perangkat ZnO saja menunjukkan PCE sebesar 17,14% pada bias mundur dan 15,21% pada bias maju. Efisiensi rata-rata PSC berbasis ZnO/ZnS yang didapatkan dari hasil pengujian J-V memberikan konsistensi nilai yang sangat baik. Selain itu, dalam hal stabilitas piranti ZnO/ZnS pada Gambar 11c jelas menunjukkan peningkatan secara substansial dan mempertahankan efisiensinya dari 20,71% hingga 18,23% setelah disimpan dalam keadaan gelap selama lebih dari 1000 jam. Sedangkan PSC yang berbasis ZnO mengalami penurunan efisiensi dengan cepat dari 15,21% menjadi 3,43% dalam waktu 200 jam di *drybox*. Piranti PSC berbasis ZnO yang dimodifikasi dengan sulfida mampu mempertahankan 88% dari kinerja awalnya selama 1000 jam dalam kondisi penyimpanan dan 87% selama 500 jam di bawah radiasi UV (Chen *et al.*, 2019). Pengaplikasian ZnO/ZnS telah terbukti dapat bertindak sebagai ETM bertingkat sekaligus sebagai lapisan pasif untuk meningkatkan kinerja PSC.

Kesimpulan

Hasil penelusuran literatur mengenai ETM berbasis ZnO/ZnS menegaskan bahwa lapisan ZnO/ZnS secara efektif mampu memperbaiki kinerja PSC melalui perbaikan morfologi, penyelarasan tingkat energi dan peningkatan stabilitas sel. Morfologi lapisan ZnO/ZnS yang terhasil menjadi lebih homogen, diiringi kemampuan penyerapan cahaya yang lebih lebih baik. Penyelarasan tingkat energi ZnO/ZnS memudahkan ekstraksi elektron

sekalius meningkatkan stabilitas piranti. Hal ini tentu saja menunjukkan bahwa morfologi permukaan, tingkat energi, penyerapan dan kestabilan sel bersinergi dalam peningkatan kinerja perangkat sel surya berbasis ZnO/ZnS. Tinjauan yang terfokus pada inovasi penggunaan bahan nanopartikel ZnO/ZnS sebagai bahan transpor elektron pada *perovskite solar cell* dapat menjadi sebuah referensi yang bermanfaat bagi pengembangan PSC.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih ditujukan kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan (Kemendikbud) yang telah memberikan hibah dana PKM-PE Tahun 2020. Tim penulis juga berterimakasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM), Universitas Riau yang telah memfasilitasi pelaksanaan kegiatan ini.

Referensi

- Chan S.H., Chang Y.H., dan Wu M.C. 2019. High Performance Perovskite Solar Cells Based on Low Temperature Processed Electron Extraction Layer. *Front. Mater.* 6:57. <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00057>.
- Chen, R., Cao, J., Duan, Y., Hui, Y., Chuong, T. T., Ou, D., Han, F., Cheng, F., Huang, X., Wu, B., dan Zheng, N. 2019. 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.
- Danilchuk, D., Nour, B., dan Dahal, L. 2016. Development of Low-cost Hybrid Perovskite Solar Cells. *Proceedings of The National Conference On Undergraduate Research*. 1–7.
- Diao, X., Tang, Y., Xie, Q., Chen, D., Li, S., and Liu, G. 2019. Study on the Property of Electron-Transport Layer in the Doped Formamidinium Lead Iodide Perovskite Based on DFT. *ACS Omega*. 4: 20024–20035.
- Jeon, N.J., Noh, J.H., Kim, Y. C., Yang, W. S., Ryu, S., Seol, S. 2014. Solvent engineering for high-performance inorganic-organic hybrid perovskite solar cells. *Nature Materials*. 13 : 897–903.
- Ke, S.M., Chen, C., Fu, N.Q., Zhou, H., Ye, M., Lin, P., Yuan, W.X., Zeng, X. R., Chen, L., Huang, H.T. 2016. Transparent Indium Tin Oxide Electrodes on Muscovite Mica for High-Temperature-Processed Flexible Optoelectronic Devices. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 8 : 28406–28411.
- Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., dan Miyasaka, T. 2009. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *Journal of the American Chemical Society*. 131 (17): 6050–6051.
- Liang, Y. C., & Wang, C. C. 2018. Surface crystal feature-dependent photoactivity of ZnO-ZnS composite rods: Via hydrothermal sulfidation. *RSC Advances*, 8(9), 5063–5070. <https://doi.org/10.1039/c7ra13061a>.
- Luo, J., Wang, Y., Zhang, Q. 2018. Progress in perovskite solar cells based on ZnO nanostructures. *Solar Energy*. 163 : 289-306.

- Nugroho, P. 2004. *Devais Mikroelektronika ZnO*. Teknik Elektro UGM : Yogyakarta.
- Oku, T. 2014. Crystal Structures of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ and Related Perovskite Compounds Used for Solar Cells. *Solar Cells - New Approaches and Reviews*. 3: 76-101.
- Ranjith, K.S., Castillo, R.B., Sillanpaa, M., Kumar, R.T.R., 2018. Effective shell wall thickness of vertically aligned ZnO - ZnS core-shell nanorod arrays on visible photocatalytic and photo sensing properties. *Applied Catalysis B: Environmental*. 237: 128-139.
- Rini, A.S., Deraf, M.P., Yanuar, H., Umar, A.A. 2020. Liquid Phase Deposition of TiO_2 Films for Electron Transport Layer of Perovskite Solar Cells. *Journal Of Nano-And Electronic Physics*. 8 (3): 03019.
- Singh, S. P., dan Nagarjuna, P. 2014. Organometal halide perovskites as useful materials in sensitized solar cells. *Dalton Transactions*. 43 (14): 5247–5251.
- Stanislav I, Sadovnikov. 2019. Synthesis, properties and applications of semiconductor nanostructured zinc sulfide. *Russian Chemical Reviews*. 88 (6). <https://doi.org/10.1070/RCR4867Zhou, D.,>
- Sun, S., Salim, T., Mathews, N., Duchamp, M., Boothroyd, C., Xing, G., Sum, T. C., dan Lam, Y. M. 2014. The origin of high efficiency in low-temperature solution-processable bilayer organometal halide hybrid solar cells. *Energy and Environmental Science*. 7 (1): 399–407.
- Ulya, N. 2012. Pengantar nanoteknologi: *Indium Tin Oxide (ITO) untuk Aplikasi Solar Cell* 238–246. Bandung: ITB.
- Xing, G.C., Mathews, N., Sun, S.Y., Lim, S.S., Lam, Y.M., Gratzel, M.L., Mhaisalkar, S., dan Sum, T.C. 2013. Long-range balanced electron- and hole-transport lengths in organic-inorganic $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$. *Science* 342 (2013) 344–347.
- Xu, G., Ji, S., Miao, C., Liu, G., Ye, C. 2012. Effect of ZnS and CdS coating on the photovoltaic properties of CuInS_2 -sensitized photoelectrodes. *Journal of Materials Chemistry*. 22 : 4890–4896.
- Yang, W.S., Park, B.W., Jung, E.H., Jeon, N.J., Kim, Y.C., Lee, D.U., Shin, S.S., Seo, J., Kim, E.K., Noh, J.H. Seok, S.I. 2017. Iodide Management in Formamidinium Lead Halide Based Perovskite Layers for Efficient Solar Cells. *Science*. 356 : 1376-1379.
- Yokoyama, T., Cao, D. H., Stoumpos, C.C., Song, T. B., Sato, Y., Aramaki, S., Kanatzidis, M. G. 2016. Overcoming Short-Circuit in Lead-Free $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$ Perovskite Solar Cells via Kinetically Controlled Gas–Solid Reaction Film Fabrication Process. *Journal Phys. Chem. Lett.* 7 : 776–782.
- Zhang, P., Wu, J., Zhang, T., Wang, Y., Liu, D., Chen, H., Ji, L., Liu, C., Ahmad, W., Chen, Z. D., & Li, S. 2018. Perovskite Solar Cells with ZnO Electron-Transporting Materials. *Advanced Materials*, 30(3). <https://doi.org/10.1002/adma.201703737>.
- Zhang et al., Popa, M., Zakhidov, A., & Tiginyanu, I. 2018. Perovskite solar cells with ZnS as electron transport layer. *Proceedings of the Romanian Academy Series A - Mathematics Physics Technical Sciences Information Science*, 19(4): 559–566.
- Zheng, E., Wang, Y., Song, J., Wang, X. F., Tian, W., Chen, G., dan Miyasaka, T. 2018. ZnO/ZnS core-shell composites for low-temperature-processed perovskite solar cells. *Journal of Energy Chemistry*. 27 (5): 1461–1467.
- Zhou, T., Tian, Y., Zhu, X., dan Tu, Y. 2018. Perovskite-Based Solar Cells: Materials, Methods, and Future Perspectives. *Journal of Nanomaterials*. Available at: <https://doi.org/10.1155/2018/8148072>.