

Kesan Suhu Rendaman dan Suhu Sepuh Lindap dalam Penyediaan Filem Nipis Bismut Sulfida (Bi_2S_3) terhadap Prestasi Sel Surya Organik Jenis Songsang Berasaskan P3HT: PCBM

(The Effect of Immersion and Annealing Temperatures in the Preparation of Thin Films of Bismuth Sulphide (Bi_2S_3) on the Performance of Inverted Type Organic Solar Cells Based on P3HT: PCBM)

NURUL NADHIRAH BINTI MD RIDZUAN & CHI CHIN YAP*

Jabatan Fizik Gunaan, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia

Diserahkan: 22 Julai 2022/Diterima: 6 Oktober 2022

ABSTRAK

Filem nipis bismut sulfida (Bi_2S_3) mempunyai jurang tenaga yang kecil dan boleh dihasilkan dengan mudah pada suhu yang rendah melalui proses pemendapan celupan kimia. Ia adalah bahan yang sesuai untuk digunakan sebagai lapisan pengangkut elektron (ETL) dalam sel suria organik jenis songsang (I-OSC) yang menggantikan zink oksida (ZnO) yang mempunyai jurang jalur tenaga yang besar dan memerlukan suhu sepuh lindap yang tinggi dalam proses penghasilan sel suria berprestasi tinggi. Kajian terdahulu mengenai kesan tempoh rendaman menunjukkan bahawa kecekapan penukaran kuasa (PCE) optimum yang dapat dicapai oleh filem nipis Bi_2S_3 adalah sehingga 2.32% dengan rendaman selama 30 minit dalam larutan Bi_2S_3 pada suhu bilik. Dalam kajian ini, suhu rendaman dan sepuh lindap pada penyediaan filem nipis Bi_2S_3 pula dikaji untuk memerhatikan kesannya terhadap prestasi fotovoltai I-OSC. Masa rendaman substrat dalam larutan Bi_2S_3 ditetapkan pada tempoh 30 minit tetapi suhu rendaman dibezakan. Hasil kajian menunjukkan suhu rendaman pada suhu bilik masih memberikan PCE tertinggi iaitu 1.79% dengan nilai ketumpatan arus litar pintas (J_{sc}), 8.01 mA.cm⁻² dan voltan litar terbuka (V_{oc}), 0.54 V. Selain itu, bagi suhu sepuh lindap, PCE menurun apabila suhu sepuh lindap yang tinggi dikenakan. Menariknya, apabila suhu sepuh lindap yang tinggi digunakan, kehabluran Bi_2S_3 bertambah baik, tetapi permukaan FTO lebih banyak terdedah kepada P3HT, mengakibatkan kebocoran arus yang tinggi. Kajian ini menunjukkan bahawa sampel yang disediakan pada suhu rendaman dan sepuh lindap yang tinggi tidak menghasilkan prestasi fotovoltai yang lebih baik.

Kata kunci: Bismut sulfida; lapisan pengangkut elektron; pemendapan celupan kimia; sel suria organik jenis songsang; suhu rendaman

ABSTRACT

Bismuth sulfide (Bi_2S_3) thin film has small energy band gap and can be easily synthesized at low temperature using chemical bath deposition process. It is a suitable material to be used as electron transport layer (ETL) in inverted organic solar cells (I-OSCs) to replace zinc oxide (ZnO) which has large energy band gap and requires high annealing temperature in process to produce high performance solar cells. Previous study on the effect of immersion duration showed that the optimum power conversion efficiency (PCE) that can be achieved by Bi_2S_3 thin film is up to 2.32% with 30 minutes of immersion in Bi_2S_3 solution at room temperature. In this work, immersion and annealing temperatures in preparation of Bi_2S_3 thin film were studied to observe their effects on the photovoltaic performance of I-OSCs. Immersion duration of substrate in Bi_2S_3 solution was fixed at 30 minutes but the immersion temperature was varied. The result showed the immersion temperature at room temperature still gave the highest PCE of 1.79% with short circuit current density (J_{sc}) of 8.01 mA.cm⁻² and open circuit voltage (V_{oc}) of 0.54 V. Besides, for annealing temperature, the PCE decreased when high annealing temperature was applied. Interestingly, as the high annealing temperature was applied, the crystallinity of Bi_2S_3 improved, but more FTO surface was exposed to P3HT, resulting in high leakage current. This study suggests that samples prepared at high immersion and annealing temperature did not result in better photovoltaic performance.

Keywords: Bismuth sulfide; chemical bath deposition; electron transport layer; immersion temperature; inverted organic solar cell

PENGENALAN

Sel suria organik adalah salah satu sel suria generasi ketiga yang mempunyai struktur paling nipis yang kini semakin popular dalam penyelidikan teknologi sel suria. Berbanding dengan sel suria berasaskan silikon, sel suria organik lebih ringan, fleksibel, berkos rendah dan berpotensi menjadi sel suria yang mesra alam sekitar (Al-hashimi, Kadem & Hassan 2018; Omar et al. 2013; Scharber & Sariciftci 2013). Dalam kajian yang terbaru pada tahun lepas, kecekapan penukaran kuasa (PCE) optimum yang dapat dicapai oleh sel suria organik telah memecah rekod dengan mencapai nilai sehingga 18.07% (Zhang et al. 2021) dan ia berpotensi dipasarkan secara komersial. Sel suria organik jenis songsang (I-OSC) diperkenalkan bagi meningkatkan kestabilan dan ketahanan sel suria organik. Struktur songsang ini dengan fungsi kerja logam yang tinggi bertindak sebagai lapisan atas katod dikatakan boleh meningkatkan jangka hayat sel suria organik iaitu dengan melindungi sel-sel daripada kerosakan oleh oksigen dan kelembapan udara (Zhang et al. 2011). I-OSC semakin mendapat perhatian kerana kestabilan udaranya yang tinggi dan ia boleh dihasilkan dengan kos yang rendah (Ho et al. 2014; Schumann et al. 2011). I-OSC berasaskan zink oksida (ZnO) sebagai lapisan pengangkut elektron (ETL) merupakan I-OSC konvensional yang popular dan sering mendapat perhatian dalam kajian I-OSC ini. Walau bagaimanapun, ZnO sebagai ETL mempunyai jurang jalur tenaga yang besar (Mahmud et al. 2017) dan

memerlukan suhu sepuh lindap yang tinggi (>300 °C) dalam proses menghasilkan sel suria berprestasi tinggi (Lim et al. 2015) dan ia tidak sesuai digunakan pada substrat fleksibel seperti plastik.

Kajian lepas mendapati bahawa prestasi sel suria berdasarkan nanorod bismut sulfida (Bi_2S_3) yang digabungkan dengan penderma polimer P3HT sebagai lapisan fotoaktif mampu mencapai PCE sebanyak 3.3% (Whittaker-Brooks et al. 2015), nilai PCE yang jauh lebih tinggi berbanding sel suria berasaskan ZnO. Jadual 1 menunjukkan nilai prestasi I-OSC bagi bahan ETL yang berbeza berdasarkan beberapa kajian lepas. Filem nipis Bi_2S_3 mampu menjadi bahan alternatif ETL yang menghasilkan I-OSC berkecekapan tinggi. Peningkatan pada PCE ini disumbangkan oleh kemampuan filem nipis Bi_2S_3 yang mempunyai pekali penyerapan yang tinggi dan jurang jalur tenaga yang lebih kecil (1.3 - 1.7 eV) (Cates & Bernechea 2018) untuk menyerap cahaya tampak dan mengubahnya menjadi arus elektrik. Selain itu, filem nipis Bi_2S_3 lebih mudah dihasilkan dengan kaedah pemendapan celupan kimia (Fazal et al. 2022; Harumi, Nair & Nair 2011; Li et al. 2012) yang dapat disintesis pada suhu yang rendah untuk penghasilan peranti sel suria berkecekapan tinggi (Lim et al. 2017). Berbanding dengan ZnO, kajian yang dilakukan terhadap Bi_2S_3 sebagai ETL dalam I-OSC adalah terhad (Maclachlan et al. 2014; Wang et al. 2010). Oleh itu, kajian ini dijalankan bagi mengenal pasti parameter optimum dalam penyediaan filem nipis Bi_2S_3 untuk meningkatkan prestasi I-OSC.

JADUAL 1. Perbezaan PCE I-OSC menggunakan bahan ETL yang berbeza berdasarkan tinjauan kepustakaan yang lepas

Lapisan pengangkut elektron (ETL)	PCE (%)	Rujukan
ZnO	1.91	Lim et al. (2019)
TiO ₂	2.15	Chaudhary et al. (2021)
Bi ₂ S ₃	2.32	Lim et al. (2017)
SnO ₂	3.00	Trost et al. (2012)

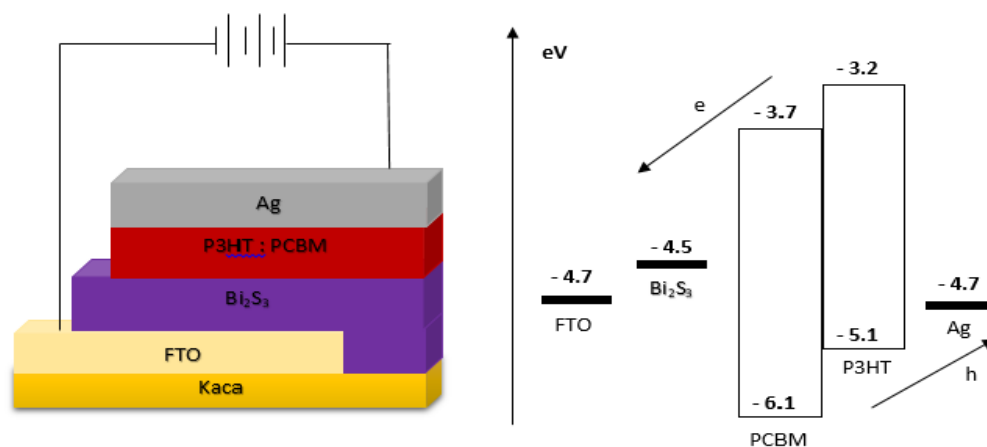
Dalam kajian lepas, penyediaan filem nipis Bi_2S_3 berdasarkan parameter tempoh masa rendaman telah dijalankan. Hasil kajian menunjukkan PCE tertinggi sebanyak 2.32% telah dicapai untuk peranti I-OSC dengan Bi_2S_3 sebagai ETL pada masa rendaman optimum

selama 30 minit (Lim et al. 2017). Oleh yang demikian, kertas kerja ini ditulis sebagai kajian susulan dengan mengubah parameter suhu rendaman dan suhu sepuh lindap filem nipis Bi_2S_3 . Tempoh pembentukan lapisan Bi_2S_3 pada permukaan kaca FTO dapat dipercepatkan

dengan mengenakan haba pada rendaman substrat dalam larutan Bi_2S_3 . Tempoh pemendapan filem nipis Bi_2S_3 pada permukaan kaca FTO selama 7 jam pada suhu bilik dan 3 jam untuk rendaman pada suhu 50°C menghasilkan ketebalan filem nipis yang hampir sama iaitu sekitar $0.16\ \mu\text{m}$ (Nair & Nair 1990). Ini menunjukkan dengan meningkatkan suhu rendaman, ia boleh mengurangkan tempoh masa pembentukan lapisan filem nipis Bi_2S_3 di atas permukaan substrat. Selain itu, suhu sepuh lindap merupakan salah satu parameter yang signifikan untuk dikaji bagi melihat prestasi I-OSC. Filem nipis Bi_2S_3 yang disepuh lindap melalui udara pada julat suhu 100°C - 200°C selama satu jam memberi peningkatan pada konduktiviti elektrik dan arus foto filem nipis Bi_2S_3 (Nair & Nair 1990) serta menghasilkan jurang jalur tenaga yang lebih kecil ($2.21 - 2.06\ \text{eV}$) berbanding filem nipis Bi_2S_3 yang tidak dikenakan sepuh lindap

($2.50\ \text{eV}$) (Hussain, Begum & Rahman 2014; Lim et al. 2017). Selain itu, aplikasi sepuh lindap pada filem nipis Bi_2S_3 menghasilkan struktur hablur yang mampu meningkatkan nilai ketumpatan arus litar pintas (J_{sc}) dan voltan litar terbuka (V_{oc}) (Al-hashimi, Kadem & Hassan 2018; Harumi, Nair & Nair 2011).

Rajah 1 menunjukkan I-OSC yang disusun berdasarkan struktur FTO/ Bi_2S_3 /P3HT:PCBM/Ag dan aras tenaga setiap lapisan bahan. Bahan fenil-C61-butirik asid metil ester (PCBM) digunakan sebagai bahan penerima elektron dan poli(3-heksiltiofen-2,5-diil) (P3HT) sebagai bahan penderma elektron. Peranti optimum menunjukkan nilai J_{sc} sebanyak $8.01\ \text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, V_{oc} , $0.54\ \text{V}$, faktor pengisi (FF), 0.42 dan menghasilkan nilai PCE sebanyak 1.79% . Penglibatan suhu dalam proses penyediaan filem nipis Bi_2S_3 telah mengubah struktur dan morfologi bahan yang memberi kesan kepada prestasi peranti I-OSC.



RAJAH 1. Struktur I-OSC dan aras tenaga setiap lapisan bahan yang digunakan dalam kajian ini

BAHAN DAN METOD

PENYEDIAAN FILEM NIPIS Bi_2S_3

Penyediaan filem nipis Bi_2S_3 dilakukan berdasarkan kaedah yang dilaporkan dalam kajian sebelum ini (Nair & Nair 1990). Secara ringkas, $2.425\ \text{g}$ bismut (III) nitrat pentahidrat ($\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) dilarutkan bersama-sama dengan $3.0\ \text{mL}$ air suling dan $7.0\ \text{mL}$ trietanolamin (TEA) dengan menggunakan pengaduk magnetik selama satu hingga dua jam. Larutan ini dicampurkan pula dengan $0.3\ \text{g}$ thioasetamida (TAM) yang dilarutkan dalam $4.0\ \text{mL}$ air suling selama 10 minit. Campuran

kedua-dua larutan ini menghasilkan larutan Bi_2S_3 pekat berwarna coklat gelap kehitaman. Kemudian, larutan Bi_2S_3 pekat ini dicampurkan dengan $43\ \text{mL}$ air suling untuk menghasilkan larutan Bi_2S_3 cair dengan isi padu $50\ \text{mL}$. Campuran akhir Bi_2S_3 yang dihasilkan harus berubah warna daripada coklat muda menjadi coklat gelap atau hitam.

FABRIKASI PERANTI

Substrat kaca bersalut FTO yang telah dibersihkan, disusun secara condong bersudut 45° di dalam bekas kaca

dan direndam di dalam 25 mL larutan Bi_2S_3 cair pada suhu rendaman yang berbeza iaitu 90 °C, 70 °C, 50 °C dan 26 °C (suhu bilik) selama 30 minit. Selepas itu, substrat yang sudah diselaputi lapisan filem nipis Bi_2S_3 dibawa keluar dan dibilas dengan air suling serta dikeringkan di udara. Untuk parameter kajian yang kedua, penghasilan filem nipis Bi_2S_3 divariasi dengan suhu sepuh lindap yang berbeza iaitu 200 °C, 150 °C, 100 °C dan 26 °C (tanpa sepuh lindap). Selepas substrat filem nipis Bi_2S_3 dikeringkan, lapisan fotoaktif P3HT:PCBM (10 mg PCBM dan 15 mg P3HT dicampur dan dilarutkan dalam 1 mL klorobenzena) (Khairulaman, Yap & Jumali 2021) disalut putar di atas permukaan filem nipis Bi_2S_3 selama satu minit dengan kelajuan 850 rpm, diikuti dengan proses pemanasan lapisan fotoaktif selama 30 minit di atas plat pemanas pada suhu 130 °C. Akhir sekali, lapisan perak (Ag) dimendap pada permukaan lapisan fotoaktif P3HT:PCBM pada tekanan 5×10^{-5} mbar menggunakan mesin penyejatan terma.

PENCIRIAN

Pengukuran pembelauan sinar X (XRD) dijalankan dengan menggunakan mesin difraktometer model *Bruker/D8 Advance* dengan sinaran Cu $K\alpha$ (panjang gelombang 1.54 Å) pada sudut belauan antara 10° hingga 60° dengan sela imbasan 0.04°. Mikroskop elektron imbasan pancaran medan (FESEM) Zeiss, model Merlin digunakan untuk melihat morfologi permukaan atas sampel. Selain itu, pencirian spektrofotometer sinar ultralembayung - cahaya nampak (UV-Vis) dijalankan pada julat panjang gelombang 300 - 800 nm bagi mengukur keupayaan penyerapan cahaya sampel. Pencirian ketumpatan arus-voltan (J-V) diukur dengan menggunakan unit sumber pengukuran Keithley 2401 dengan cahaya dipancarkan kepada peranti I-OSC Bi_2S_3 menggunakan simulator solar dilengkapi dengan penapis AM1.5G. Keamatan cahaya diselaraskan pada $\sim 1000 \text{ W.m}^{-2}$ dengan menggunakan meter tenaga solar TM-206. Akhir sekali, kecekapan penukaran foton kepada arus (IPCE) diukur untuk setiap peranti menggunakan sistem IPCE Newport pada frekuensi 10 Hz.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Analisis XRD telah dijalankan bagi mengenal pasti kehadiran lapisan Bi_2S_3 yang terbentuk di atas substrat FTO. Graf pencirian XRD bagi parameter suhu rendaman 50 °C dan 90 °C ditunjukkan seperti dalam Rajah 2. Berdasarkan kepada kedua-dua graf XRD ini, tiada perbezaan yang ketara dapat dilihat pada

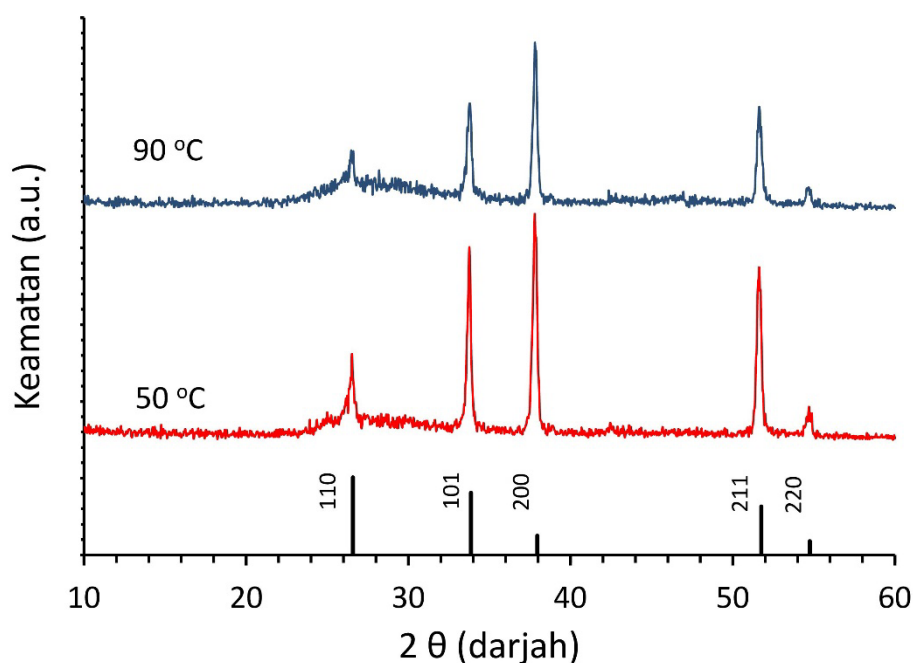
corak puncak graf yang terhasil. Puncak graf yang jelas terbentuk pada Rajah 2 adalah sepadan dengan struktur SnO_2 (fail pembelauan serbuk PDF 21-1250) yang merupakan komposisi utama lapisan FTO (Yoo et al. 2015). Filem nipis Bi_2S_3 yang dihasilkan pada suhu rendaman 50 °C dan 90 °C menunjukkan struktur amorfus disebabkan tenaga terma yang tidak mencukupi untuk adatom meresap pada permukaan substrat bagi proses pembentukan hablur (Kaleemulla et al. 2007). Namun begitu, perbezaan dapat dilihat pada julat sudut belauan 20° sehingga 30° dengan puncak yang lebih lebar dapat dilihat pada suhu rendaman 90°C, yang merupakan struktur amorfus bagi lapisan bahan Bi_2S_3 .

Berdasarkan kajian lepas oleh Lim et al. (2017), corak puncak graf XRD yang sama dilaporkan. Sampel di dalam kajian tersebut telah melalui rawatan terma pada suhu yang tinggi (300 °C) agar struktur hablur terbentuk dan puncak graf bagi komposisi bahan Bi_2S_3 dapat dilihat dengan jelas sekitar sudut 20° sehingga 35° menggunakan XRD. Oleh itu, graf XRD pada Rajah 2 bertepatan dengan keputusan kajian lepas dan lapisan Bi_2S_3 yang dihasilkan dengan kaedah pemendapan celupan kimia perlu menjalani rawatan terma (sepuh lindap) bagi membentuk struktur hablur supaya puncak bahan kimia yang terlibat dapat dilihat dengan jelas melalui pencirian XRD (Hussain, Begum & Rahman 2014). Pencirian XRD dalam kajian ini menunjukkan semakin tinggi suhu rendaman, semakin tebal lapisan Bi_2S_3 yang terbentuk di atas substrat. Puncak yang lebih lebar pada sudut 20° sehingga 30° bagi sampel suhu rendaman 90 °C menunjukkan kehadiran lapisan Bi_2S_3 yang lebih tebal berbanding sampel dengan suhu rendaman 50 °C.

Pencirian FESEM dijalankan pada permukaan sampel FTO/ Bi_2S_3 bagi mengkaji struktur morfologi sampel tersebut. Rajah 3 menunjukkan perbezaan struktur morfologi yang terhasil bagi sampel rendaman pada suhu bilik, 90 °C dan sampel rendaman suhu bilik dengan sepuh lindap pada suhu 200 °C. Berdasarkan Rajah 3, perbezaan bentuk dan saiz zarah yang terhasil dapat dilihat apabila suhu rendaman dan suhu sepuh lindap yang berbeza dikenakan ke atas sampel. Bentuk butiran FTO adalah tidak sekata dan bersaiz lebih besar berbanding zarah Bi_2S_3 , ini menjadikan permukaan FTO lebih kasar (Lim et al. 2017). Zarah Bi_2S_3 yang bersaiz nano kelihatan bertaburan secara rawak di atas permukaan FTO dan mempunyai ruang antara zarah (Chavez-Mendiola et al. 2018) bagi sampel rendaman pada suhu bilik (Rajah 3(a)). Apabila suhu rendaman dinaikkan pada suhu 90 °C (Rajah 3(b)), lapisan FTO

tidak dapat dilihat disebabkan oleh dominasi zarah Bi_2S_3 yang membentuk gumpalan dan menyelimuti keseluruhan permukaan sampel. Apabila suhu rendaman meningkat, saiz hablur (gumpalan) dan ketebalan filem nipis meningkat disebabkan oleh peningkatan resapan zarah Bi_2S_3 pada permukaan substrat. Suhu yang tinggi juga memberikan tenaga yang cukup untuk membolehkan

atom bergerak bebas dan bercantum antara satu sama lain lalu membentuk zarah yang lebih besar (Mageshwari & Sathyamoorthy 2012). Ini menjadikan permukaan sampel pada suhu rendaman 90°C lebih gelap berbanding sampel rendaman pada suhu bilik (rujuk Rajah 4) disebabkan oleh kehadiran butiran zarah Bi_2S_3 yang lebih banyak melekat pada permukaan sampel.

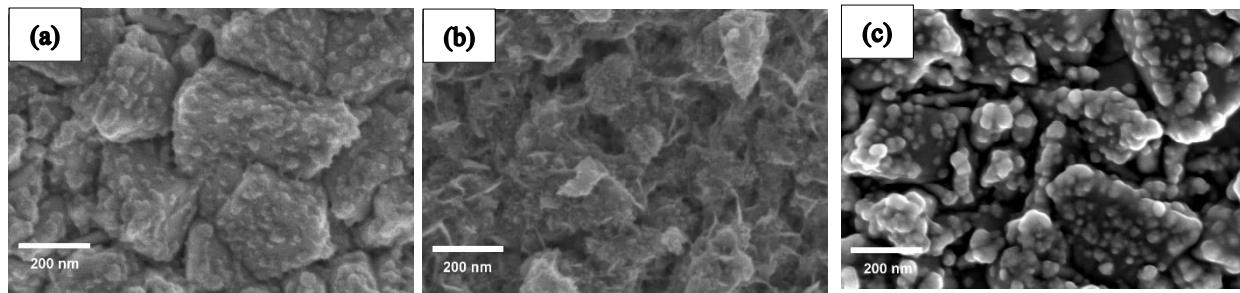


RAJAH 2. Spektrum XRD bagi filem nipis Bi_2S_3 yang dimendapkan atas lapisan FTO pada suhu rendaman 50°C dan 90°C

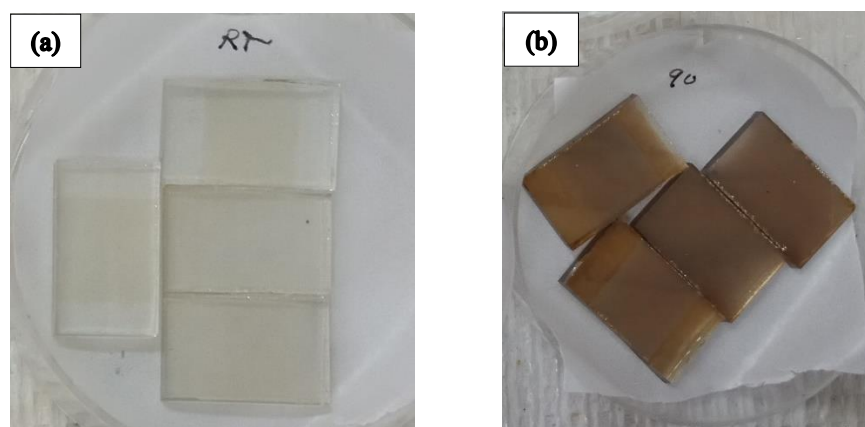
Dapat diperhatikan pada Rajah 3(b), hampir tiada butiran zarah dapat dilihat dengan jelas disebabkan oleh lapisan Bi_2S_3 yang berkeadaan amorfus (Li et al. 2016), bertepatan dengan keputusan yang ditunjukkan graf XRD (Rajah 2). Secara ringkasnya, peningkatan suhu rendaman memberikan kesan pada morfologi sampel. Semakin meningkat suhu rendaman, butiran zarah Bi_2S_3 semakin padat dan cenderung untuk bergumpal serta menyelimuti keseluruhan permukaan sampel, ini menjadikan permukaan sampel lebih sekata dan licin (Balasubramanian, Kumar & Sengottaiyan 2017; Fekadu & Ampong 2016; Fouad et al. 2011). Hal ini akan memberi kesan kepada pemendapan lapisan fotoaktif P3HT:PCBM dalam proses fabrikasi, seterusnya memberi kesan kepada prestasi kecekapan sel suria. Bagi sampel rendaman suhu bilik yang disepuh lindap pada suhu 200

$^\circ\text{C}$ seperti yang dilihat pada Rajah 3(c), butiran zarah Bi_2S_3 adalah lebih tersusun dan lebih jelas membentuk hablur. Proses sepuh lindap pada suhu yang tinggi menjadikan butiran zarah semakin besar (Ali et al. 2018; Balasubramanian et al. 2011) dan kehabluran meningkat (Dachraoui et al. 2018). Oleh itu, banyak ruang pada permukaan sampel yang lopong hasil daripada pergerakan zarah yang lebih cenderung untuk bergumpal antara satu sama lain.

Rajah 5(a) dan Rajah 5(c) masing-masing menunjukkan spektrum penyerapan cahaya bagi filem nipis FTO/ Bi_2S_3 dengan pelbagai suhu rendaman dan suhu sepuh lindap menggunakan spektrofotometer UV-VIS. Secara jelasnya, penyerapan cahaya adalah rendah pada panjang gelombang yang tinggi dan penyerapan cahaya tertinggi berlaku pada julat panjang gelombang



RAJAH 3. Pandangan atas imej FESEM yang menunjukkan morfologi filem nipis Bi_2S_3 pada skala bar 200 nm (dengan pembesaran 100 000) bagi substrat FTO yang direndam pada (a) suhu bilik, (b) 90 °C dan (c) suhu bilik yang disepuh lindap pada suhu 200 °C



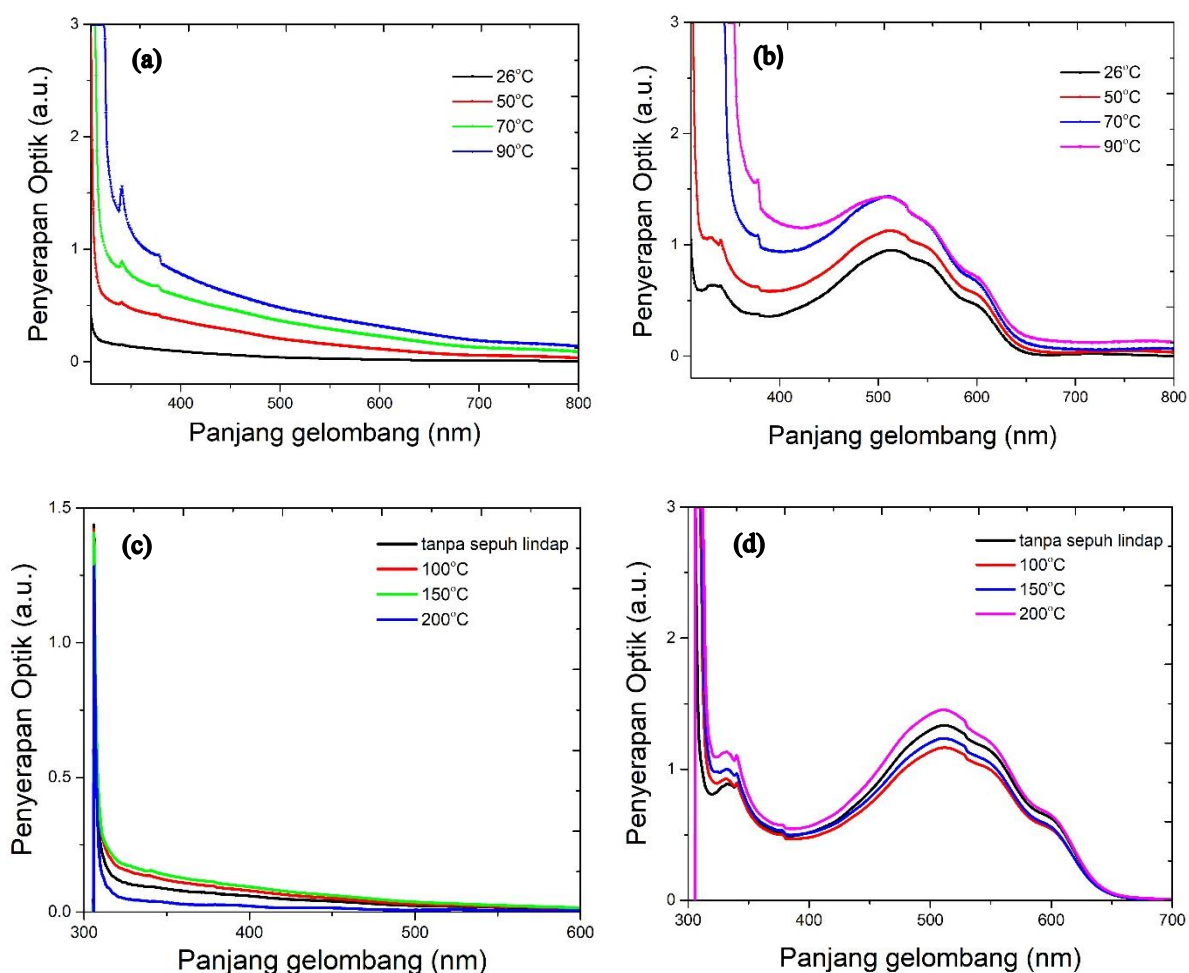
RAJAH 4. Substrat FTO yang disaluti lapisan Bi_2S_3 pada suhu rendaman (a) 26 °C (suhu bilik) dan (b) 90 °C

yang rendah iaitu sekitar 300 - 500 nm bagi kedua-dua parameter suhu rendaman dan suhu sepuh lindap. Selain itu, Rajah 5(a) menunjukkan penyerapan cahaya semakin meningkat apabila suhu rendaman semakin tinggi dan kehadiran zarah Bi_2S_3 yang lebih banyak. Semakin banyak kehadiran zarah Bi_2S_3 , semakin tinggi serapan cahaya yang mengandungi tenaga yang cukup untuk menguja elektron daripada jalur valensi ke jalur konduksi (Ismail 2018).

Manakala, graf pada Rajah 5(c) pula tidak menunjukkan perbezaan yang ketara bagi serapan cahaya apabila suhu sepuh lindap 100 °C dan 150 °C dikenakan ke atas sampel. Walau bagaimanapun, perbezaan yang signifikan dapat dilihat apabila suhu sepuh lindap ditingkatkan kepada 200 °C dengan butiran zarah Bi_2S_3 mula membentuk struktur hablur seperti yang ditunjukkan dalam pencirian FESEM (Rajah 3(c)). Pada suhu sepuh lindap yang sangat tinggi, kemungkinan

berlakunya pengoksidaan sebahagian bahan Bi_2S_3 pada udara, menjadikan komposisi zarah Bi_2S_3 semakin berkurang atau bertukar kepada bahan lain seperti bismut oksida (Bi_2O_3) (Silverman 1964). Hal ini boleh menyebabkan ketebalan filem nipis Bi_2S_3 yang melekat di atas permukaan FTO semakin berkurang. Oleh itu, sampel yang disepuh lindap pada suhu yang tinggi mempunyai keupayaan penyerapan cahaya yang rendah disebabkan oleh pengurangan kehadiran zarah Bi_2S_3 diatas permukaan sampel.

Selanjutnya, Rajah 5(b) dan Rajah 5(d) menunjukkan spektrum penyerapan cahaya bagi filem nipis FTO/ Bi_2S_3 bersama lapisan polimer P3HT dan PCBM. Kedua-dua rajah tersebut secara jelas menunjukkan dua puncak utama spektrum penyerapan. Puncak pertama sekitar panjang gelombang 330 - 340 nm merupakan jalur penyerapan PCBM sebagai penerima elektron seperti yang telah dilaporkan beberapa kajian yang



RAJAH 5. Spektrum penyerapan UV dan cahaya nampak bagi filem nipis Bi_2S_3 pada suhu rendaman yang berbeza, (a) tanpa, (b) dengan polimer P3HT:PCBM dan suhu sepuh lindap yang berbeza, (c) tanpa, (d) dengan polimer P3HT:PCBM

lepas (Jiangang et al. 2010; Liu et al. 2012; Muhammad & Sulaiman 2011). Manakala yang kedua pula adalah puncak luas yang terdiri daripada penyerapan cahaya pada julat panjang gelombang 508 - 513 nm yang menunjukkan kehadiran P3HT sebagai lapisan penyerap (Jiangang et al. 2010; Mihailetschi et al. 2006).

Selain itu, perbandingan spektrum penyerapan cahaya tanpa polimer dengan polimer P3HT:PCBM dapat dibuat dan dilihat perbezaannya. Rajah 5(a) menunjukkan peningkatan penyerapan cahaya yang agak ketara apabila suhu rendaman ditingkatkan. Tetapi Rajah 5(b) menunjukkan sebaliknya apabila spektrum penyerapan cahaya bagi suhu rendaman 70 °C dan 90 °C kelihatan bertindih (sama) pada julat jalur penyerapan P3HT. Ini menunjukkan pемendapan polimer P3HT di

atas permukaan sampel yang direndam pada suhu 90 °C berkurang dan tidak dapat meliputi secara menyeluruh permukaan filem nipis Bi_2S_3 . Hal ini kerana sampel yang direndam pada suhu 90 °C mempunyai permukaan yang lebih licin seperti yang diterangkan dalam pencirian FESEM (Rajah 3(b)). Tambahan lagi, perbezaan spektrum penyerapan cahaya juga dapat dilihat bagi parameter suhu sepuh lindap tanpa dan dengan pемendapan polimer P3HT:PCBM. Rajah 5(c) menunjukkan sampel dengan suhu sepuh lindap 200 °C mempunyai spektrum penyerapan cahaya terendah manakala penyerapan cahaya tertinggi berlaku pada sampel dengan suhu sepuh lindap 100 °C dan 150 °C. Tetapi, sebaliknya ditunjukkan pada Rajah 5(d) dengan penyerapan cahaya tertinggi berlaku pada sampel sepuh lindap 200 °C. Hal ini menunjukkan

sampel dengan suhu sepuh lindap 200 °C mempunyai liputan polimer P3HT:PCBM yang lebih baik dan menyeluruh disebabkan oleh struktur hablur zarah Bi_2S_3 yang terbentuk pada sampel tersebut (rujuk pencirian FESEM Rajah 3(c)).

Bagi menguji prestasi Bi_2S_3 sebagai ETL di dalam peranti sel suria, pengukuran ketumpatan arus-voltan (J-V) telah dijalankan di bawah pencahayaan 1000 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (AM1.5G) seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 6. Ringkasan analisis bacaan ketumpatan arus litar pintas (J_{sc}), voltan litar terbuka (V_{oc}), faktor pengisi (FF), kecekapan penukaran kuasa (PCE), rintangan siri (R_s) dan rintangan pintasan (R_{shunt}) bagi fotovoltaiik dengan perbezaan suhu rendaman dan suhu sepuh lindap dapat dilihat pada Jadual 2. Bagi parameter suhu rendaman, dapat dilihat bahawa nilai V_{oc} tidak berubah pada bacaan 0.54 V manakala nilai J_{sc} semakin menurun apabila suhu rendaman semakin meningkat. Nilai bacaan J_{sc} tertinggi diperoleh bagi sampel yang direndam pada suhu bilik dengan bacaan 8.01 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ yang mempunyai FF = 0.42, seterusnya menghasilkan PCE tertinggi iaitu pada 1.79%. Apabila suhu rendaman meningkat, nilai PCE berkurang sehingga 1.11% bagi suhu rendaman 50 °C ($J_{sc} = 5.41 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, FF = 0.38), 0.80% bagi suhu 70 °C ($J_{sc} = 3.37 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, FF = 0.44) dan 0.72% bagi suhu 90 °C ($J_{sc} = 2.88 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, FF = 0.46). Nilai PCE dijangka akan terus menurun apabila suhu rendaman ditingkatkan melebihi 90 °C disebabkan oleh faktor ketebalan ETL Bi_2S_3 yang semakin tinggi.

Selain itu, nilai R_s dan R_{shunt} semakin tinggi apabila suhu rendaman sampel semakin meningkat seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 2. R_s dalam peranti kebiasaannya berasal daripada rintangan pukal lapisan fotoaktif dan elektrod dan ia bergantung kepada sifat fizikal bahan tersebut dan rintangan pada sentuhan permukaan antara lapisan fotoaktif dan elektrod (Aniket et al. 2018). Manakala nilai R_{shunt} pula dikaitkan dengan kebocoran arus dan penggabungan semula cas bebas antara lapisan penderma dan penerima (Proctor & Nguyen 2015). Proses pengasingan elektron dan lohong berlaku di lapisan fotoaktif P3HT:PCBM. Walaupun berlaku penghasilan cas bebas, penggabungan semula cas masih boleh terjadi. Elektron yang bergerak dalam lapisan penerima boleh bertemu dengan pembawa bercas bertentangan (lohong) daripada sumber yang berbeza dan bergabung semula dengannya, ini dipanggil sebagai penggabungan semula dwimolekul (Lind 2018). Nilai R_{shunt} dan R_s ini boleh diukur daripada kecerunan lengkung pada graf songsang J-V (Thambidurai et al. 2014). Seperti ditunjukkan dalam Jadual 2, nilai R_s semakin

meningkat apabila suhu rendaman semakin tinggi. Hal ini disebabkan oleh peningkatan taburan zarah Bi_2S_3 pada suhu rendaman yang tinggi menyebabkan rintangan pukal lapisan ETL bertambah. Pada masa yang sama, nilai R_{shunt} juga meningkat kerana kebocoran arus akan menurun kerana tiada sentuhan langsung antara FTO dengan P3HT. Selain itu, apabila lapisan Bi_2S_3 semakin tebal, zarah cenderung untuk bergumpal yang mendorong kepada penggabungan semula dwimolekul pembawa cas antara jalur konduksi Bi_2S_3 dan orbit molekul tertinggi yang dihuni elektron (HOMO) P3HT (Lim et al. 2017; Zhao et al. 2010).

Selain itu, bagi sampel yang menjalani proses suhu sepuh lindap yang berbeza, kelihatan tiada penambahbaikan berlaku pada nilai PCE peranti apabila suhu sepuh lindap semakin meningkat seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 6(b). Sampel Bi_2S_3 yang tidak dikenakan suhu sepuh lindap mempamerkan bacaan tertinggi V_{oc} sebanyak 0.54 V, J_{sc} 8.01 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, FF 0.42 dan PCE 1.79 %. Walau bagaimanapun, nilai bacaan V_{oc} , J_{sc} , dan PCE menunjukkan corak penurunan apabila suhu sepuh lindap dikenakan dan ditingkatkan. Apabila sampel Bi_2S_3 menjalani proses sepuh lindap pada suhu 100 °C, bacaan V_{oc} menurun kepada 0.40 V, J_{sc} menurun kepada 7.28 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, FF 0.47 dan menghasilkan PCE yang lebih rendah sebanyak 1.38%. Disusuli dengan suhu sepuh lindap 150 °C ($V_{oc} = 0.32 \text{ V}$, $J_{sc} = 7.22 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, FF = 0.42, PCE = 0.97%) dan 200 °C ($V_{oc} = 0.22 \text{ V}$, $J_{sc} = 4.53 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, FF = 0.32, PCE = 0.31%). Secara umumnya diketahui bahawa kebocoran arus merupakan salah satu faktor yang menyumbang kepada penurunan V_{oc} (Ginting et al. 2014). Oleh itu, penurunan nilai V_{oc} pada suhu sepuh lindap yang tinggi dapat dikaitkan dengan kebocoran arus yang berlaku di dalam peranti. Hal ini disokong dengan nilai bacaan R_{shunt} yang semakin rendah apabila suhu sepuh lindap semakin tinggi, menunjukkan berlaku kebocoran arus yang tinggi. Apabila suhu sepuh lindap yang tinggi dikenakan ke atas sampel, zarah Bi_2S_3 bertindak membentuk gumpalan yang menyebabkan wujudnya ruang (seperti yang ditunjukkan dalam analisis FESEM) yang membenarkan sentuhan langsung antara lapisan P3HT dan FTO, sekali gus membenarkan kebocoran arus berlaku. Selain daripada itu, nilai R_s juga semakin menurun seiring peningkatan suhu sepuh lindap pada sampel. Penurunan nilai rintangan antara permukaan lapisan Bi_2S_3 dan fotoaktif P3HT:PCBM ini menunjukkan keadaan lapisan Bi_2S_3 yang semakin menipis pada suhu sepuh lindap yang tinggi, kemungkinan disebabkan oleh berlaku pengoksidaan bahan Bi_2S_3 pada sekeliling

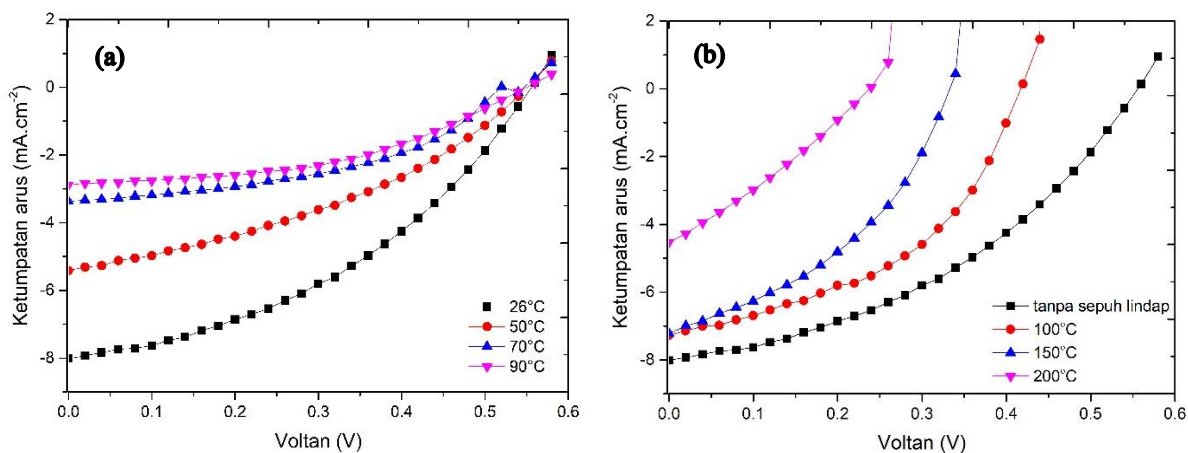
(Silverman 1964) dan akhirnya mengurangkan fungsi lapisan Bi_2S_3 sebagai ETL.

Spektrum IPCE I-OSC dengan Bi_2S_3 sebagai ETL bagi suhu rendaman dan suhu sepuh lindap yang

berbeza ditunjukkan dalam Rajah 7. Rajah 7(a) dan 7(b) memperlihatkan nilai IPCE dalam julat penyerapan cahaya bagi Bi_2S_3 (300 - 500 nm) berkurangan dengan suhu rendaman dan suhu sepuh lindap. Ia menunjukkan Bi_2S_3 tidak menyumbang secara keseluruhan kepada

JADUAL 2. Sifat fotovoltai I-OSC yang menggunakan Bi_2S_3 sebagai lapisan pengangkut elektron bagi suhu rendaman dan suhu sepuh lindap yang berbeza

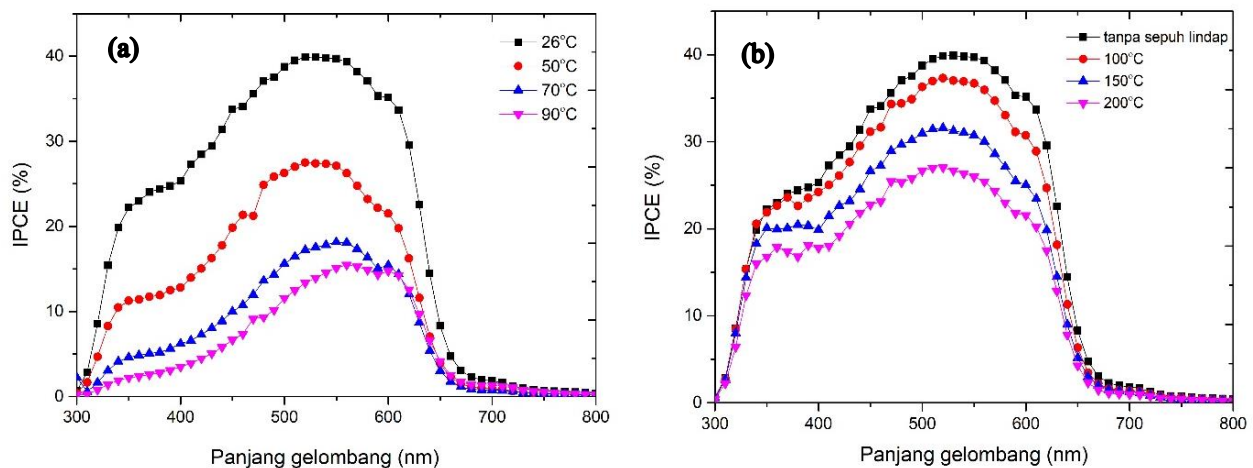
Suhu rendaman	J_{sc} [$\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$]	V_{oc} [V]	FF	PCE(%)	R_s [$\Omega\cdot\text{cm}^2$]	R_{shunt} [$\Omega\cdot\text{cm}^2$]
Suhu bilik (26 °C)	8.01	0.54	0.42	1.79	32.11	219.40
50 °C	5.41	0.54	0.38	1.11	46.4	278.52
70 °C	3.37	0.54	0.44	0.80	64.4	429.98
90 °C	2.88	0.54	0.46	0.72	80.3	714.84
Suhu sepuh lindap						
Tanpa sepuh lindap	8.01	0.54	0.42	1.79	32.11	219.40
100 °C	7.28	0.40	0.47	1.38	6.32	136.21
150 °C	7.22	0.32	0.42	0.97	2.22	99.65
200 °C	4.53	0.22	0.32	0.31	1.11	60.12



RAJAH 6. Pengukuran J-V bagi I-OSC Bi_2S_3 bagi kepelbagaian (a) suhu rendaman dan (b) suhu sepuh lindap

penjanaan arus foto di dalam sel suria (Lim et al. 2017). Malah, nilai bacaan IPCE tertinggi bagi setiap parameter berlaku berhampiran puncak penyerapan cahaya P3HT. Selain itu, nilai IPCE maksimum dengan bacaan 40% dicapai oleh I-OSC Bi_2S_3 yang direndam pada suhu bilik, tanpa dikenakan suhu sepuh lindap dan ia konsisten dengan nilai J_{sc} yang tertinggi berbanding sampel kajian lain. Sebaliknya, nilai IPCE maksimum berkurangan seiring peningkatan suhu rendaman ($50\text{ }^\circ\text{C} = 28\%$, $70\text{ }^\circ\text{C} = 18\%$, $90\text{ }^\circ\text{C} = 16\%$) dan suhu sepuh lindap (100

$^\circ\text{C} = 37\%$, $150\text{ }^\circ\text{C} = 32\%$, $200\text{ }^\circ\text{C} = 27\%$), bertepatan dengan nilai bacaan J_{sc} yang diukur melalui graf J-V. Peranti dengan suhu rendaman $90\text{ }^\circ\text{C}$ mengalami bacaan IPCE terendah (16%) walaupun spektrum penyerapan cahaya UV-VIS menunjukkan sebaliknya. Pengurangan yang besar dalam spektrum IPCE membuktikan ketebalan ETL Bi_2S_3 yang tinggi mampu mengehadkan penghantaran cahaya melalui sampel $\text{Bi}_2\text{S}_3/\text{FTO}$ yang menyebabkan proses pengujaan foton di dalam lapisan P3HT:PCBM berkurang, seterusnya menyumbang kepada pengurangan penghasilan elektron dan lohong.



RAJAH 7. Spektrum IPCE I-OSC dengan Bi_2S_3 sebagai ETL bagi perbezaan parameter (a) suhu rendaman dan (b) suhu sepuh lindap

KESIMPULAN

Kesimpulannya, kajian kesan suhu rendaman penyediaan filem nipis Bi_2S_3 dan kesan suhu sepuh lindap terhadap prestasi I-OSC dengan Bi_2S_3 bertindak sebagai ETL telah dijalankan. Kajian menunjukkan peningkatan suhu rendaman mampu mempercepatkan pemendapan Bi_2S_3 ke atas permukaan substrat FTO dan peningkatan suhu sepuh lindap menghasilkan struktur hablur yang lebih baik. Walau bagaimanapun, didapati PCE I-OSC semakin menurun apabila suhu rendaman yang tinggi dan suhu sepuh lindap yang tinggi dikenakan terhadap peranti. Dalam kajian ini, prestasi I-OSC yang terbaik ditunjukkan oleh peranti yang direndam pada suhu bilik tanpa dikenakan sepuh lindap dengan nilai PCE sebanyak 1.79%. Hal ini menunjukkan Bi_2S_3 mampu menjadi pilihan utama dalam penghasilan I-OSC yang berkost rendah, mempunyai kefleksibelen yang tinggi dan lebih mesra alam disebabkan keupayaan penghasilannya pada

suhu bilik, tanpa melalui proses fabrikasi suhu yang tinggi seperti ZnO. Hasil kajian ini juga menyokong kajian lepas yang mencadangkan Bi_2S_3 sebagai alternatif ETL yang ideal yang mampu menggantikan ETL konvensional dalam penghasilan aplikasi optoelektronik terutamanya dalam kajian berkaitan penghasilan peranti yang fleksibel.

PENGHARGAAN

Penyelidikan ini dibiayai oleh Kementerian Pengajian Tinggi Malaysia menerusi geran FRGS/1/2020/STG07/UKM/02/4.

RUJUKAN

Al-hashimi, M.K., Kadem, B.Y. & Hassan, A.K. 2018. Rutile TiO_2 films as electron transport layer in inverted organic solar cell. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 29: 7152-7160.

- Ali, N., Arshad, H., Ahmed, R., Omar, M. F., Sultan, M. & Fu, Y. Q. 2018. Crystallized InBiS₃ thin films with enhanced optoelectronic properties. *Applied Surface Science* 436: 293-301.
- Aniket, R., Kumar, A., Rahman, M.R., Vashistha, N., Kuldeep, K.G., Pandey, S., Sahoo, N.G., Chand, S. & Rajiv, K.S. 2018. Non-approximated series resistance evaluation by considering high ideality factor in organic solar cell. *AIP Advances* 8: 125121.
- Balasubramanian, V., Kumar, P.N. & Sengottaiyan, D. 2017. Effect of deposition temperature on structural, optical and electrical properties of copper bismuth sulphide (CuBiS₂) thin films deposited by chemical bath deposition. *Materials Science-Poland* 35(2): 329-334.
- Balasubramanian, V., Suriyanarayanan, N., Prabahar, S. & Srikanth, S. 2011. Effect of annealing temperature on structural and optical properties of chemically deposited bismuth sulphide thin films. *Chalcogenide Letters* 8(11): 671-681.
- Cates, N. & Bernechea, M. 2018. Research update: Bismuth based materials for photovoltaics. *APL Materials* 6: 084503.
- Chaudhary, D.K., Dhawan, P.K., Patel, S.P. & Bhasker, H.P. 2021. Large area semitransparent inverted organic solar cells with enhanced operational stability using TiO₂ electron transport layer for building integrated photovoltaic devices. *Materials Letters* 283: 128725.
- Chavez-Mendiola, E., Acosta-Enríquez, M.C., Carrillo-Castillo, A., Arellano-Tánorie, O., Rivera-Nieblas, J.O. & Castillo, S.J. 2018. Preparation of thin films bismuth sulfide by chemical bath deposition technique, a simplified formulation. *Chalcogenide Letters* 15(7): 395-404.
- Dachraoui, O., Merino, J.M., Mami, A., León, A. Caballero, R. & Meherzi, H. M. 2018. Annealing study and thermal investigation on bismuth sulfide thin films prepared by chemical bath deposition in basic medium. *Appl. Phys. A* 124: 166.
- Fazal, T., Iqbal, S., Shah, M., Ismail, B., Shaheen, N., Alharthi, A.I., Awwad, N.S. & Ibrahim, H.A. 2022. Correlation between structural, morphological and optical properties of Bi₂S₃ thin films deposited by various aqueous and non-aqueous chemical bath deposition methods. *Results in Physics* 40: 105817.
- Fekadu, G.H. & Ampong, F.K. 2016. Effect of deposition temperature on the structural, morphological and optical band gap of lead selenide thin films synthesized by chemical bath deposition method. *Materials Chemistry and Physics* 183: 320-325.
- Fouad, O., Rmili, A., Elidrissi, S.E.B., Bouaoud, A., Erguig, H. & Elies, P. 2011. Influence of bath temperature, deposition time and [s]/[cd] ratio on the structure, surface morphology, chemical composition and optical properties of cds thin films elaborated by chemical bath deposition. *Journal of Modern Physics* 2: 1073-1082.
- Ginting, R.T., Yap, C.C., Yahaya, M. & Salleh, M.M. 2014. Impedance spectroscopy characterization of inverted type organic solar cells based on poly(3-hexylthiophene-2,5-diy). *AIP Conf. Proc.* 1571: 29-34.
- Harumi, M.G., Nair, M.T.S. & Nair, P.K. 2011. Chemically deposited lead sulfide and bismuth sulfide thin films and Bi₂S₃/PbS solar cells. *Thin Solid Films* 519(7): 2287-2295.
- Ho, P.Y., Thiyagu, S., Kao, S.H., Kao, C.Y. & Lin, C.F. 2014. ZnO nanorod arrays for various low-band gap polymers in inverted organic solar cells. *Nanoscale* 6: 466-471.
- Hussain, A., Begum, A. & Rahman, A. 2014. Effects of annealing on nanocrystalline Bi₂S₃ thin films prepared by chemical bath deposition. *Materials Science in Semiconductor Processing* 21: 74-81.
- Ismail, N.N. 2018. Kesan kepekatan larutan bismuth sulfida terhadap prestasi sel suria organik jenis songsang. Tesis. Universiti Kebangsaan Malaysia (Tidak diterbitkan).
- Jiangang, L., Shao, S., Wang, H., Zhao, K., Xue, L., Gao, X., Xie, Z. & Han, Y. 2010. The mechanisms for introduction of n-dodecylthiol to modify the P3HT/PCBM morphology. *Organic Electronics* 11: 775-783.
- Kaleemulla, S., Sivasankar, R.A., Uthanna, S. & Sreedhara, R.P. 2007. Physical properties of flash evaporated In₂O₃ films prepared at different substrate temperatures. *Materials Letters* 61(21): 4309-4313.
- Khairulaman, F., Yap, C.C. & Jumali, M. 2021. Improved performance of inverted type organic solar cell using copper iodide-doped P3HT:PCBM as active layer for low light application. *Materials Letters* 283: 128827.
- Li, D., Hu, L., Xie, Y., Niu, G., Liu, T., Zhou, Y., Gao, L., Yang, B. & Tang, J. 2016. Low-temperature processed amorphous Bi₂S₃ film as an inorganic electron transport layer for perovskite solar cells. *ACS Photonics* 3(11): 2122-2128.
- Li, Y., Zhang, Y., Lei, Y., Li, P., Jia, H., Hou, H. & Zheng, Z. 2012. *In situ* fabrication of Bi₂S₃ nanocrystal film for photovoltaic devices. *Mater. Sci. Eng., B* 177: 1764-1768.
- Lim, E.L., Yap, C.C., Hj Jumali, M.H. & Khairulaman, F. 2019. Solution-dispersed copper iodide anode buffer layer gives P3HT:PCBM-based organic solar cells an efficiency boost. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 30: 2726-2731.
- Lim, E.L., Yap, C.C., Haji Jumali, M.H., Mat Teridi, M.A. & Chin, H.T. 2017. Inverted organic solar cells integrated with room temperature solution-processed bismuth sulfide electron selective layer. *Solar Energy* 157: 1108-1113.
- Lim, E.L., Yap, C.C., Yahaya, M., Salleh, M.M. & Haji Jumali, M.H. 2015. ZnO nanorod arrays pre-coated with DCJTb dye for inverted type hybrid solar cells incorporating P3HT donor. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron* 26: 719-725.
- Lind, S. 2018. Recombination losses in organic solar cells. Tesis. Karlstads University (Tidak diterbitkan).

- Liu, H.W., Chang, D.Y., Chiu, W.Y., Rweib, S.P. & Wang, L. 2012. Fullerene bisadduct as an effective phase-separation inhibitor in preparing poly(3-hexylthiophene)-[6,6]-phenyl-C61-butyric acid methyl ester blends with highly stable morphology. *J. Mater. Chem* 22: 15586-15591.
- Maclachlan, A.J., O'Mahony, F.T.F., Sudlow, A.L., Hill, M.S., Molloy, K.C., Nelson, J. & Haque, S.A. 2014. Solution-processed mesoscopic Bi₂S₃: Polymer photoactive layers. *Chem. Phys. Chem.* 15: 1019-1023.
- Mageshwari, K. & Sathyamoorthy, R. 2012. Influence of substrate temperature on the physical properties of thermally evaporated nanocrystalline bismuth sulfide thin films. *Vacuum* 86(12): 2029-2034.
- Mahmud, A., Elumalai, N.K., Upama, M.B., Wang, D., Chan, K.H., Wright, M., Xu, C., Haque, F. & Uddin, A. 2017. Low temperature processed ZnO thin film as electron transport layer for efficient perovskite solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 159: 251-264.
- Mihailetchi, V.D., Xie, H., Boer, B.D., Koster, L.J.A. & Blom, P.W.M. 2006. Charge transport and photocurrent generation in poly(3-hexylthiophene): Methanofullerene bulk-heterojunction solar cells. *Adv. Func. Mater.* 16: 699-708.
- Muhammad, F.F. & Sulaiman, K. 2011. Photovoltaic performance of organic solar cells based on DH6T/PCBM thin film active layers. *Thin Solid Films* 519: 5230-5233.
- Nair, M.T.S. & Nair, P.K. 1990. Photoconductive bismuth sulphide thin films by chemical deposition. *Semicond. Sci. Technol.* 5: 1225-1230.
- Omar, A.A., Viney, S., Shawn, B., Enkeleda, D. & Alexandru, S.B. 2013. Organic solar cells: A review of materials, limitations, and possibilities for improvement. *Particulate Science and Technology* 31(5): 427-442.
- Proctor, C.M. & Nguyen, T.Q. 2015. Effect of leakage current and shunt resistance on the light intensity dependence of organic solar cells. *Appl. Phys. Lett.* 106: 083301.
- Scharber, M. & Sariciftci, N.S. 2013. Efficiency of bulk-heterojunction organic solar cells. *Progress in Polymer Science* 38: 1929-1940.
- Schumann, S., Da Campo, R., Illy, B., Cruickshank, A.C., McLachlan, M.A., Ryan, M.P., Riley, D.J., McComb, D.W. & Jones, T.S. 2011. Inverted organic photovoltaic devices with high efficiency and stability based on metal oxide charge extraction layers. *Journal of Materials Chemistry* 21: 2381-2386.
- Silverman, M.S. 1964. High temperature, high pressure synthesis of a new bismuth sulfide. *Notes* 3(7): 1041.
- Thambidurai, M., Kim, J.Y., Kang, C.M., Muthukumarasamy, N., Song, H.J., Song, J., Ko, Y., Velauthapillai, D. & Lee, C. 2014. Enhanced photovoltaic performance of inverted organic solar cells with In-doped ZnO as an electron extraction layer. *Renewable Energy* 66: 433-442.
- Trost, S., Zilberberg, K., Behrendt, A. & Riedl, T. 2012. Room-temperature solution processed SnOx as an electron extraction layer for inverted organic solar cells with superior thermal stability. *J. Mater. Chem.* 22(32): 16224-16229.
- Wang, Z., Qu, S., Zeng, X., Liu, J., Tan, F. & Jin, L. 2010. Influence of interface modification on the performance of polymer/Bi₂S₃ nanorods bulk heterojunction solar cells. *Applied Surface Science* 257: 423-428.
- Whittaker-Brooks, L., Gao, J., Hailey, A.K., Thomas, C.R., Yao, N. & Loo, L. 2015. Bi₂S₃ nanowire networks as electron acceptor layers in solution-processed hybrid solar cells. *Journal of Materials Chemistry* 3: 2686-2692.
- Yoo, K.S., Han, S.D., Moon, H.G., Yoon, S.J. & Kang, C.Y. 2015. Highly sensitive H₂S sensor based on the metal-catalyzed SnO₂ nanocolumns fabricated by glancing angle deposition. *Sensors* 15: 15468-15477.
- Zhang, F., Xu, X., Tang, W., Zhang, J., Zhuo, Z., Wang, J., Wang, J., Xu, Z. & Wang, Y. 2011. Recent development of the inverted configuration organic solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 95: 1785-1799.
- Zhang, M., Zhu, L., Zhou, G., Hao, T., Qiu, C., Zhao, Z., Hu, Q., Bryon, W.L., Zhu, H., Ma, Z., Tang, Z., Feng, W., Zhang, Y., Thomas, P.R. & Liu, F. 2021. Single-layered organic photovoltaics with double cascading charge transport pathways: 18% efficiencies. *Nat. Commun.* 12(309): 1-10.
- Zhao, N., Osedach, T.P., Chang, L.Y., Geyer, S.M., Wanger, D., Binda, M.T., Arango, A.C., Bawendi, M.G. & Bulovic, V. 2010. Colloidal PbS quantum dot solar cells with high fill factor. *ACS Nano* 4: 3743-3752.

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: ccyap@ukm.edu.my