

## Pengoptimuman Lapisan P3HT:PCBM Terdop CuI dalam Sel Suria Organik Jenis Songsang untuk Aplikasi Cahaya Dalam

(Optimization of CuI-Doped P3HT:PCBM Layers in Inverted-Type Organic Solar Cells for Indoor Light Applications)

FARAH LIYANA KHAIRULAMAN, CHI CHIN YAP\*, MOHAMMAD HAFIZUDDIN HI JUMALI & NOUR ATALLAH ISSA

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

*Diserahkan: 7 Julai 2022/Diterima: 1 September 2022*

### ABSTRAK

Dalam kajian ini, kesan kepekatan pendopan CuI dalam lapisan aktif poli (3-heksilthiofena-2,5-dil) (P3HT): (6,6)-fenil-C<sub>61</sub> butrik asid metil ester (PCBM) terhadap prestasi sel suria organik jenis songsang di bawah cahaya luar piawai (AM1.5 G) dan diod pemancar cahaya (LED) putih telah dikaji. Peranti dengan kepekatan pendopan CuI sebanyak 9 wt% memberi prestasi terbaik bagi kedua-dua keadaan pencahayaan dengan kecekapan penukaran kuasa (PCE) yang tertinggi pada 2.46% dan 5.17%, masing-masing di bawah cahaya luar dan dalam. Bagi pengoptimuman lanjut, kesan kepekatan larutan penyediaan lapisan aktif P3HT:PCBM terdop CuI terhadap prestasi sel suria organik telah dikaji. Didapati kepekatan optimum lapisan aktif adalah berbeza di bawah cahaya dalam dan luar. Peranti dengan kepekatan larutan lapisan aktif yang tinggi (50 mg/mL) memberikan prestasi terbaik di bawah cahaya LED dengan PCE 8.14% manakala lapisan aktif dengan kepekatan biasa (25 mg/mL) menunjukkan prestasi terbaik di bawah cahaya AM1.5G (2.46%).

Kata kunci: Aplikasi dalam; kepekatan larutan; kuprum iodida; pendopan; sel suria organik

### ABSTRACT

In this study, the effects of CuI doping concentration in poly(3-hexylthiophene) (P3HT): (6,6)-phenyl-C<sub>61</sub>-butyric acid methyl ester (PCBM) active layer towards the performance of inverted type organic solar cell under standard outdoor light (AM1.5 G) and white light emitting diode (LED) light have been studied. Device with 9 wt% CuI doping concentration gave the best performance for both illumination conditions with the highest PCE at 2.46% and 5.17%, under outdoor and indoor light, respectively. For further optimization, the dependence of the solution concentration of CuI-doped P3HT:PCBM active layer towards the performance of organic solar cell has been studied. It was found that the optimum solution concentration of the active layer is different under indoor and outdoor light. Device with higher active layer solution concentration (50 mg/mL) gave the best performance under LED light with PCE of 8.14% while active layer with standard concentration (25 mg/mL) showed the best performance under AM1.5G light (2.46%).

Keywords: Copper iodide; doping; indoor application; organic solar cell; solution concentration

### PENGENALAN

Penjanaan dan penggunaan tenaga adalah komponen yang penting dalam pembangunan sains dan teknologi. Fotovoltai dalam (IPV) yang berfungsi sebagai sumber tenaga di bawah keadaan cahaya keamatan rendah telah mula mendapat banyak perhatian kerana fotovoltai jenis

ini boleh memenuhi keperluan penjanaan tenaga bagi peranti kuasa rendah seperti internet benda (IoT) dan peranti boleh pakai (Ferdous, Reza & Siddiqui 2016). Sel suria organik (OSC) adalah salah satu jenis IPV yang berpotensi tinggi kerana sifatnya yang ringan, mudah lentur (Lechêne et al. 2016) dan berkos rendah (Li, Hou & Amaratunga 2021).

Sumber cahaya dalam seperti diod pemancar cahaya (LED), lampu berpendar fluor atau lampu halogen mempunyai keamatan sinaran dan spektrum pancaran yang berbeza dengan cahaya luar (AM1.5G). Oleh itu, pendekatan berbeza perlu digunakan mengikut keadaan cahaya yang berbeza bagi pengoptimuman prestasi. Cahaya LED secara khususnya mempunyai keamatan cahaya yang 100-500 faktor lebih rendah daripada cahaya luar yang akan menyebabkan penjanaaan fotoarus jauh lebih rendah. Jadi, untuk memaksimumkan penjanaaan fotoarus di bawah cahaya dalam, penghasilan OSC yang boleh menyerap lebih banyak cahaya dan mengurai lebih banyak eksiton adalah amat diperlukan (Cutting, Bag & Venkataraman 2016; Steim et al. 2011).

Bahan bukan organik mempunyai sifat seperti jurang jalur yang boleh ditala, pekali penyerapan yang tinggi serta kelincuhan pembawa cas intrinsik yang baik (Beek, Wienk & Janssen 2004; Sun et al 2005). Kajian lepas menunjukkan pendopan nanozarah bukan organik seperti ZnO (Bahtiar et al. 2015; Beek, Wienk & Janssen 2004), TiO<sub>2</sub> (Yun & Sulaiman 2011), NiO (Wu et al. 2020) dan CuO (Salim et al. 2019; Siddiqui et al. 2020) ke dalam lapisan aktif mampu meningkatkan prestasi OSC dengan meningkatkan penyerapan cahaya, menambah kecekapan penguraian eksiton, serta membantu pengangkutan dan pengumpulan pembawa cas.

Dalam kajian sebelum ini, penggunaan pengkonduksi lohong kuprum iodida (CuI) sebagai bahan dop dalam lapisan aktif poli(3-heksilthiofena-2,5-dil) (P3HT) dan (6,6)-fenil-C61 butrik asid metil ester (PCBM) didapati dapat meningkatkan prestasi OSC jenis songsang di bawah kedua-dua cahaya luar dan dalam disebabkan oleh pengumpulan lohong yang baik dan pengurangan penggabungan semula cas (Khairulaman, Yap & Jumali 2021). Namun, kepekatan pendopan CuI masih belum dioptimumkan.

Dalam kajian ini, pengoptimuman kepekatan pendopan CuI dalam lapisan aktif P3HT:PCBM dan kesannya terhadap prestasi OSC jenis songsang dijalankan di bawah cahaya luar dan dalam. Seterusnya, kesan kepekatan larutan penyediaan lapisan aktif P3HT:PCBM terdop CuI terhadap prestasi OSC jenis songsang di bawah cahaya luar dan dalam juga dikaji. Kepekatan pendopan CuI 9 bt% didapati memberikan prestasi peranti terbaik di bawah kedua-dua pencahayaan. Namun begitu, kepekatan larutan penyediaan lapisan aktif P3HT:PCBM terdop CuI yang optimum adalah berbeza mengikut keadaan cahaya.

## BAHAN DAN KAEDAH

### BAHAN

Bahan kimia yang digunakan ialah zink asetat dihidrat (Sigma Aldrich,  $\geq 99.0\%$ ), dietanolamina (DEA), (Sigma Aldrich,  $\geq 99.0\%$ ), CuI (Sigma Aldrich, 99.999%), P3HT (Rieke Metals) dan PCBM (Luminescence Technology Corp.).

### METOD

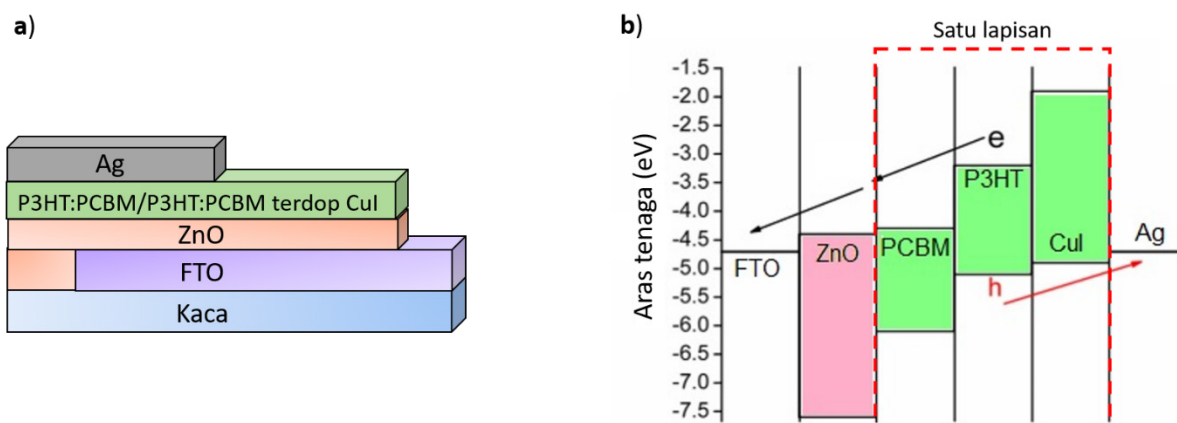
OSC jenis songsang berasaskan ZnO/P3HT:PCBM telah difabrikasi. Larutan sol-gel lapisan pengangkut elektron ZnO yang terdiri daripada campuran etanol, 0.2 M zink asetat dihidrat dan 0.2 M DEA dititiskan ke atas permukaan timah oksida terdop flourin (FTO) yang telah dibersihkan terlebih dahulu. Pemendapan lapisan ZnO dilakukan menggunakan kaedah salutan berputar pada kelajuan 3000 rpm selama 30 saat. Substrat kemudian dipanaskan pada suhu 100 °C selama 10 minit di atas plat pemanas bagi menyingkirkan sisa pelarut organik pada permukaan substrat. Proses ini dilakukan sebanyak 3 kali sebelum substrat disepuh lindap di dalam relau pada suhu 300 °C selama 60 minit. Seterusnya, larutan campuran P3HT:PCBM (15 mg:10 mg) dengan nisbah berat 1:0.67 dalam 1 mL klorobenzena (ditanda sebagai 0 bt%) dimendap di atas lapisan ZnO menggunakan kaedah salutan berputar pada kelajuan 900 rpm selama 1 minit diikuti dengan rawatan haba (130°C selama 30 minit). Lapisan aktif P3HT:PCBM terdop CuI dengan kepekatan berbeza disediakan dengan melarutkan CuI dengan nisbah berat 3 bt% (0.45 mg), 6 bt% (0.9 mg), 9 bt% (1.35 mg) dan 12 bt% (1.8 mg) terhadap P3HT dalam 1 mL klorobenzena dan diultrasonikasi selama 20 minit sebelum campuran P3HT:PCBM dimasukkan ke dalam larutan. Fabrikasi peranti disempurnakan dengan pemendapan elektrod atas perak (Ag) menggunakan kaedah pengewapan terma.

Setelah kepekatan dop CuI yang optimum ditentukan, peranti dengan kepekatan larutan lapisan aktif P3HT:PCBM terdop CuI yang berbeza difabrikasi. Untuk memperoleh ketebalan lapisan aktif yang lebih tebal dan lebih nipis daripada ketebalan lapisan aktif yang disediakan pada 25 mg/mL, larutan P3HT:PCBM terdop CuI (nisbah berat 1:0.67:0.09) dengan kepekatan yang berbeza iaitu 50, 25, 16.7 dan 12.5 mg/mL disediakan. Struktur peranti dan aras tenaga setiap lapisan ditunjukkan dalam Rajah 1.

## PENCIRIAN

Mikroskop elektron imbasan pancaran medan (FESEM) model Zeiss Merlin digunakan untuk mendapatkan imej keratan rentas sampel. Ujian spektroskopi ultralembayung-nampak (UV-Vis) dijalankan bagi memperoleh penyerapan cahaya sampel pada julat 300-800 nm. Model mesin yang digunakan ialah spektrometer Dynamica Halo DB-20. Ujian fotopendarahaya (PL) keadaan mantap dijalankan menggunakan spektrometer

PL model Edinburg FLS920 pada panjang gelombang pengujaan 495 nm. Parameter fotovoltaiik bagi peranti untuk aplikasi luar dan dalam diperoleh daripada unit pengukuran Keithley 2401 masing-masing di bawah pencahayaan simulator suria pada 100 mW/cm<sup>2</sup> (AM1.5G) dan LED putih pada 1000 lx. Akhir sekali, sistem Newport IPCE dengan frekuensi sebanyak 10 Hz digunakan untuk menganalisis kecekapan foton tuju kepada arus (IPCE) peranti.



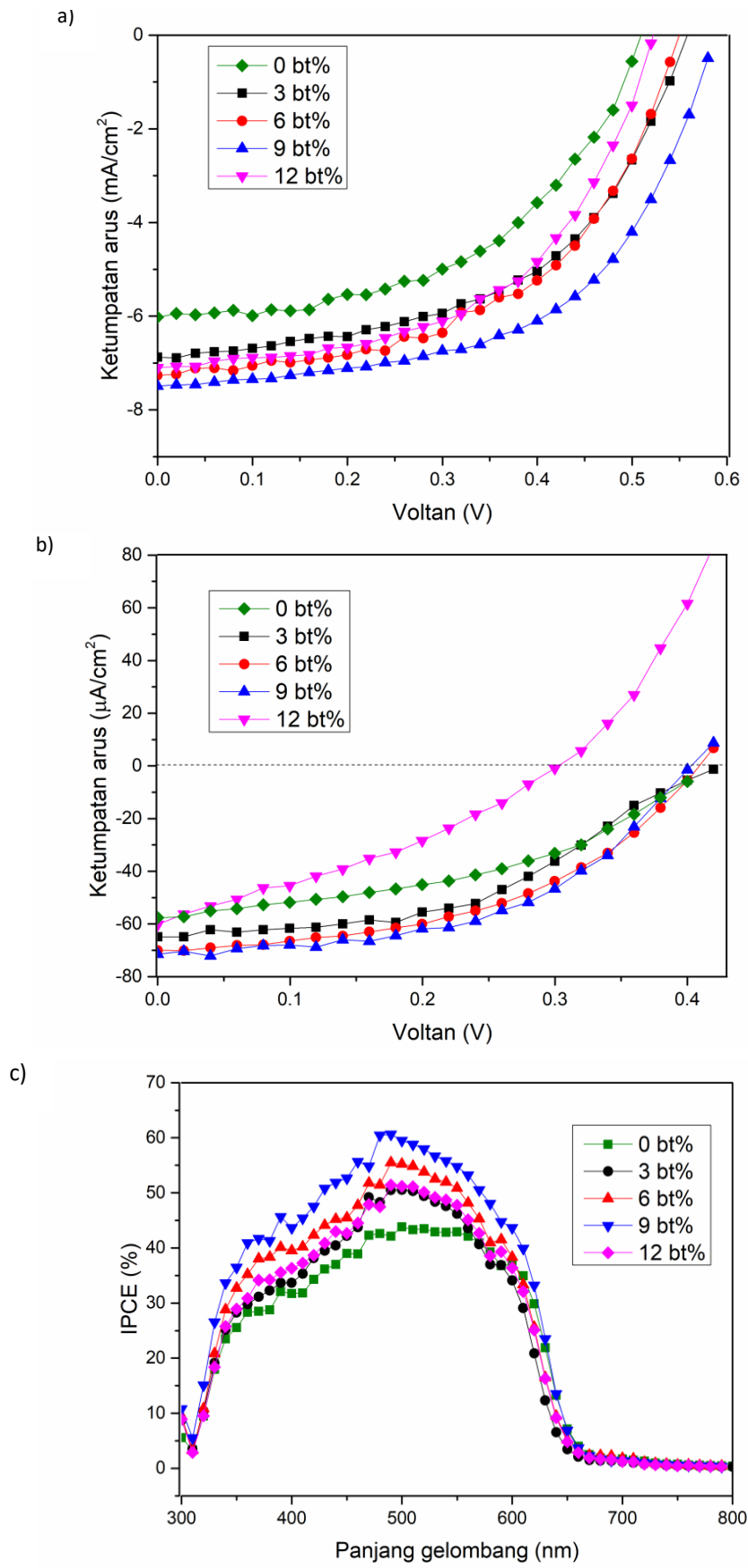
RAJAH 1. (a) struktur peranti dan (b) aras tenaga bagi OSC jenis songsang berasaskan ZnO/P3HT:PCBM

## KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Lengkuk pengukuran ketumpatan arus-voltan ( $J$ - $V$ ) di bawah simulator suria dan LED putih bagi peranti dengan kepekatan pendopan CuI yang berbeza ditunjukkan pada Rajah 2(a) dan 2(b) serta parameter fotovoltaiik yang dicerap daripada lengkung  $J$ - $V$  diringkaskan dalam Jadual 1 dan 2. Nilai parameter fotovoltaiik yang dilaporkan merupakan nilai optimum bagi sekurang-kurangnya enam peranti yang disediakan untuk setiap variasi. Di bawah pencahayaan simulator suria, peranti tanpa dop CuI memperoleh kecekapan penukaran kuasa (PCE) sebanyak 1.58%, dengan nilai voltan litar terbuka ( $V_{oc}$ ) 0.50 V, ketumpatan arus litar pintas ( $J_{sc}$ ) 6.02 mAcm<sup>-2</sup> dan faktor pengisi (FF) 53%. Setelah lapisan aktif didopkan dengan 3 bt% CuI, prestasi peranti meningkat dengan PCE pada 2.02% ( $V_{oc}$  = 0.54 V,  $J_{sc}$  = 6.87 mAcm<sup>-2</sup> dan FF = 54%). Prestasi bagi peranti terus meningkat dengan peningkatan kepekatan pendopan CuI dengan PCE tertinggi dicatatkan pada 2.46%

apabila kepekatan pendopan CuI 9 bt% digunakan dan kemudian merosot pada kepekatan 12 bt%. Aliran yang sama dapat dilihat bagi prestasi peranti di bawah pencahayaan LED putih. Peranti terdop CuI menunjukkan peningkatan prestasi seiring dengan peningkatan kepekatan pendopan CuI dan menurun apabila kepekatan pendopan CuI mencapai 12 bt%. PCE tertinggi diperoleh daripada kepekatan optimum 9 bt% iaitu 5.17% ( $P_{max}$  = 14.49  $\mu$ Wcm<sup>-2</sup>).

Rajah 2(c) menunjukkan spektrum IPCE bagi peranti tanpa dop CuI dan peranti dengan kepekatan pendopan CuI yang berbeza. Graf IPCE dilihat konsisten dengan aliran  $J_{sc}$  di bawah keadaan kedua-dua pencahayaan. Nilai  $J_{sc}$  yang diperoleh daripada analisis IPCE juga sepadan dengan nilai  $J_{sc}$  daripada lengkung  $J$ - $V$  di bawah simulator suria (0 bt% = 6.16 mAcm<sup>-2</sup>, 3 bt% = 6.31 mAcm<sup>-2</sup>, 6 bt% = 7.07 mAcm<sup>-2</sup>, 9 bt% = 7.95 mAcm<sup>-2</sup> dan 12 bt% = 6.96 mAcm<sup>-2</sup>) dengan kadar ketidakpadanan ~10%.



RAJAH 2. Lengkung J-V peranti dengan kepekatan pendopan CuI yang berbeza di bawah pencahayaan (a) simulator suria dan (b) LED putih serta (c) spektrum IPCE peranti yang berkaitan

JADUAL 1. Prestasi peranti dengan variasi kepekatan pendopan CuI di bawah simulator suria ( $100 \text{ mWcm}^{-2}$ )

Kepekatan CuI (bt%)	$V_{oc}$ [V]	$J_{sc}$ [ $\text{mAcm}^{-2}$ ]	FF [%]	PCE [%]	$R_s$ [ $\Omega\text{cm}^2$ ]	$R_{sh}$ [ $\Omega\text{cm}^2$ ]
0	0.50	6.02	53	1.58	31.5	251.8
3	0.54	6.87	54	2.02	27.1	518.0
6	0.54	7.26	54	2.10	24.0	588.9
9	0.58	7.49	57	2.46	21.6	626.2
12	0.52	7.10	54	1.99	22.3	405.2

JADUAL 2. Prestasi peranti dengan variasi kepekatan pendopan CuI di bawah cahaya LED putih ( $1000 \text{ lx} \approx 0.28 \text{ mWcm}^{-2}$ )

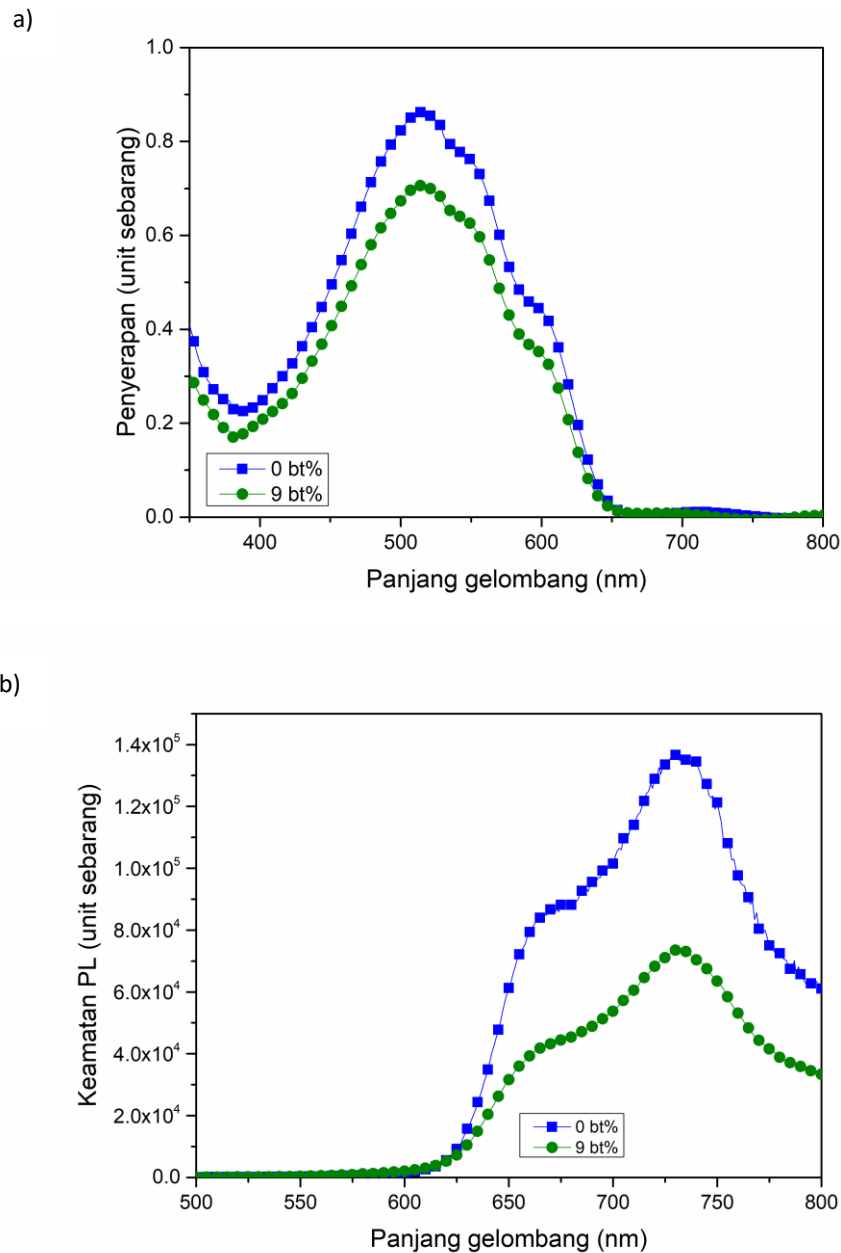
Kepekatan CuI (bt%)	$V_{oc}$ [V]	$J_{sc}$ [ $\mu\text{Acm}^{-2}$ ]	FF [%]	PCE [%]	$P_{max}$ [ $\mu\text{Wcm}^{-2}$ ]
0	0.40	57.64	44	3.62	10.15
3	0.42	64.88	46	4.48	12.55
6	0.40	70.03	48	4.84	13.55
9	0.40	71.44	51	5.17	14.49
12	0.30	60.14	33	2.10	5.89

Seperti yang dilihat pada spektrum penyerapan cahaya sampel di Rajah 3(a), sampel dengan lapisan aktif terdop CuI mempunyai penyerapan cahaya yang lebih rendah berbanding sampel tanpa CuI. Hal ini mungkin berlaku kerana kewujudan zarah CuI telah menyebabkan isi padu cincin benzena P3HT dalam lapisan aktif berkurang (Yun & Sulaiman 2011). Jadi, peningkatan  $J_{sc}$  bukan disebabkan penyerapan foton yang lebih banyak. Analisis PL dalam keadaan mantap (Rajah 3(b)) menunjukkan pelindapan PL yang lebih baik berlaku apabila lapisan aktif didopkan dengan CuI. Hal ini membuktikan keberkesanan penguraian eksiton yang lebih tinggi berlaku dengan kehadiran CuI (Zhang et al. 2016). Apabila CuI didopkan ke dalam lapisan aktif, rantaian P3HT dan agregasi PCBM mungkin boleh terbentuk dengan lebih tersusun yang seterusnya membawa kepada peningkatan luas antara muka hasil daripada pemisahan fasa yang lebih baik (Xu et al. 2019). Selain itu, peningkatan nilai  $J_{sc}$  juga

boleh dikaitkan dengan rangkaian tambahan yang terhasil melalui zarah CuI yang boleh membantu pengangkutan dan pengumpulan lohong ke elektrod Ag (Wanninayake et al. 2015). Kedudukan jalur valensi CuI yang sesuai antara orbital terisi tertinggi (HOMO) P3HT dan aras tenaga Ag boleh membentuk struktur susun tangga lohong (Rajah 1(b)) yang turut menyumbang kepada pergerakan lohong ke elektrod Ag. Kebolehpayaan lapisan filem aktif terdop CuI untuk mengekstrak lohong ke Ag juga menjadi lebih baik dengan kurangnya rintangan seperti yang dibuktikan melalui nilai rintangan siri ( $R_s$ ) yang menurun seiring dengan peningkatan kepekatan pendopan CuI (Jadual 1). Rintangan pirau ( $R_{sh}$ ) peranti yang mencerminkan kadar penggabungan semula cas juga menunjukkan corak yang sama, bererti semakin tinggi kepekatan pendopan CuI, semakin rendah kadar penggabungan semula cas. Zarah CuI boleh meminimumkan penggabungan semula elektron dan lohong dengan memendekkan laluan bagi

lohong untuk diekstrak ke elektrod Ag (Lim et al. 2016). Kesannya, nilai FF meningkat. Nilai  $V_{oc}$  yang tertinggi bagi peranti 9 bt% di bawah simulator suria juga memberi indikasi terhadap kadar penggabungan semula cas yang minimum (Olewi et al. 2018) tetapi bagi aplikasi cahaya dalam, aliran  $V_{oc}$  tidak menunjukkan variasi kerana penggabungan semula cas di bawah cahaya LED adalah tidak kritikal (Park et al. 2018). Namun, dengan peningkatan kepekatan lebih daripada

kepekatan optimum (9 bt%), prestasi peranti merosot akibat pengagregatan zarah CuI yang tinggi. Zarah CuI mungkin beraglomerat dan membentuk kluster yang berkemungkinan mengurangkan rangkaian yang baik untuk pengangkutan dan pengumpulan lohong (Lakhotiya et al. 2019). Akibatnya, terdapat penurunan nilai  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$  dan FF yang seterusnya mendorong kepada penyusutan PCE.

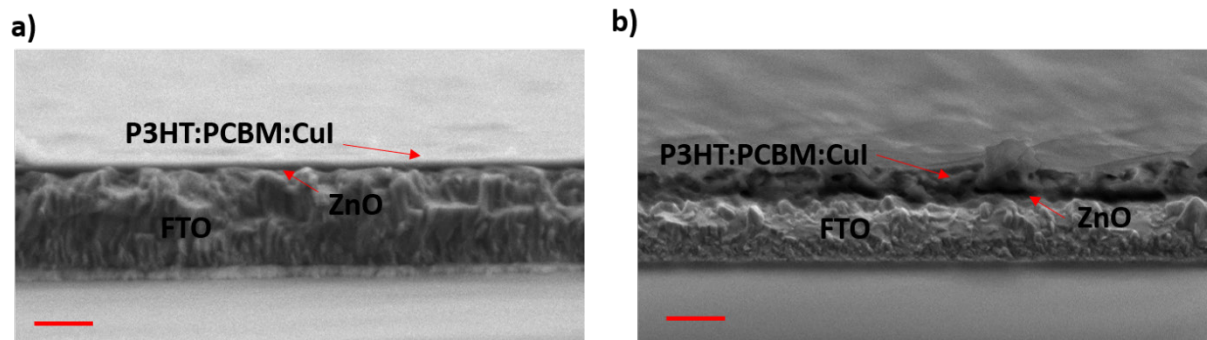


RAJAH 3. (a) Spektrum penyerapan cahaya dan (b) spektrum PL sampel tanpa CuI dan dengan pendopan 9 bt% CuI



Menggunakan kepekatan pendopan CuI yang optimum iaitu sebanyak 9 bt%, kesan kepekatan larutan penyediaan lapisan aktif P3HT:PCBM terdop CuI terhadap prestasi peranti juga dikaji. Imej FESEM keratan rentas sampel yang disediakan dengan kepekatan

larutan aktif 25 dan 50 mg/mL ditunjukkan pada Rajah 4. Ketebalan lapisan aktif yang dihasilkan dengan kepekatan larutan 25 mg/mL adalah ~140 nm. Ketebalan lapisan aktif meningkat dengan ketara menjadi ~380 nm apabila kepekatan larutan digandakan menjadi 50 mg/mL.

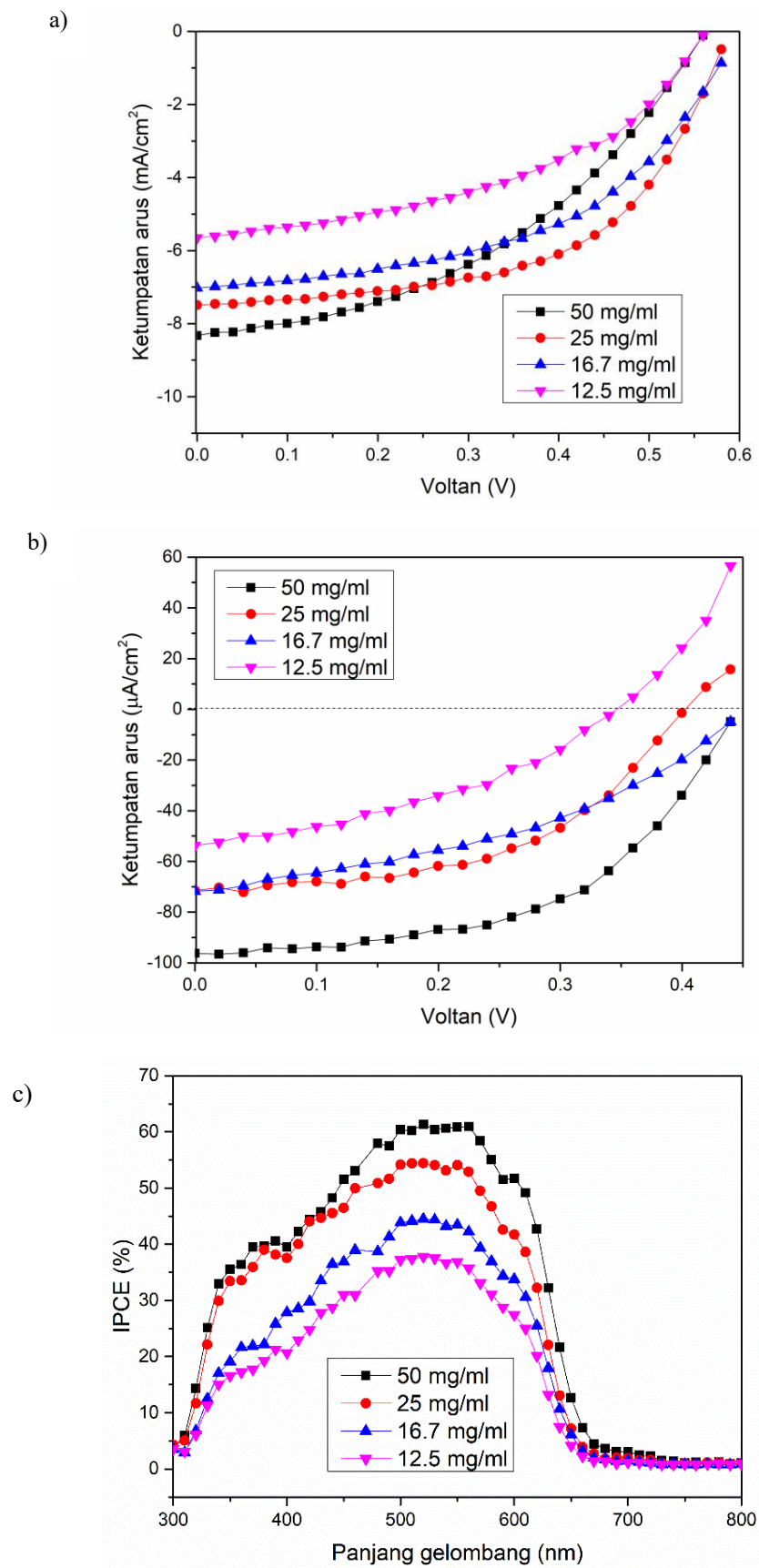


RAJAH 4. Imej FESEM keratan rentas sampel FTO/ZnO/P3HT:PCBM:CuI yang disediakan daripada larutan berkepekatan (a) 25 mg/mL dan (b) 50 mg/mL. Bar skala ialah 1  $\mu\text{m}$

Rajah 5(a) dan 5(b) masing-masing menunjukkan lengkung J-V di bawah pencahayaan simulator suria dan LED putih bagi peranti dengan kepekatan larutan penyediaan lapisan aktif yang berbeza. Ringkasan parameter fotovoltai peranti ditunjukkan dalam Jadual 3 dan 4. Di bawah cahaya simulator suria, didapati peranti dengan kepekatan larutan lapisan aktif sebanyak 25 mg/mL mencatatkan PCE yang paling tinggi berbanding kepekatan yang lain. Keadaan ini berbeza untuk kes pencahayaan LED putih, yang mana peranti dengan kepekatan larutan 50 mg/mL memberikan prestasi terbaik dengan PCE tertinggi 8.14% ( $P_{\text{max}} = 22.80 \mu\text{Wcm}^{-2}$ ). Nilai  $J_{\text{sc}}$  tertinggi di bawah simulator suria untuk peranti 50 mg/mL dilihat sepadan dengan keputusan IPCE pada Rajah 5(c).

Rajah 6 menunjukkan spektrum penyerapan cahaya bagi sampel tanpa pendopan CuI, sampel 50 dan 25 mg/mL. Kadar penyerapan cahaya bagi sampel 50 mg/mL dilihat lebih tinggi berbanding sampel 25 mg/mL dan juga sampel tanpa pendopan CuI. Oleh itu, nilai  $J_{\text{sc}}$  yang paling tinggi dalam kedua-dua keadaan pencahayaan ( $8.32 \text{ mAcm}^{-2}$  di bawah simulator suria dan  $96.18 \mu\text{Acm}^{-2}$  di bawah LED putih) boleh dikaitkan dengan penyerapan foton yang banyak. Namun, kepekatan larutan yang optimum bagi prestasi peranti adalah berbeza

mengikut sumber cahaya yang digunakan. Di bawah simulator suria, walaupun nilai  $J_{\text{sc}}$  bertambah seiring dengan peningkatan kepekatan larutan, PCE yang tertinggi iaitu 2.46% diperoleh pada kepekatan larutan 25 mg/mL. Pencapaian ini boleh dikaitkan dengan nilai  $R_s$  yang paling rendah dan  $R_{\text{sh}}$  yang paling tinggi dan seterusnya menyumbang kepada nilai FF yang tinggi. Kepekatan larutan yang terlalu rendah mungkin menyebabkan filem yang terbentuk tidak sekata akibat lapisan yang terlalu nipis, manakala kepekatan larutan yang terlalu tinggi akan mendorong kepada rintangan elektrik yang tinggi disebabkan lapisan yang lebih tebal (Shin et al. 2019). Kesannya, nilai  $R_s$  adalah lebih tinggi pada kedua-dua kepekatan larutan terkecil dan terbesar. Bagi  $R_{\text{sh}}$  pula, nilainya menaik dengan peningkatan kepekatan larutan daripada 12.5 kepada 25 mg/mL dan kemudian menurun pada kepekatan 50 mg/mL. Selain penggabungan semula cas,  $R_{\text{sh}}$  juga boleh dikaitkan dengan kebocoran arus dalam peranti (Steim et al. 2011). Dengan meningkatnya kepekatan larutan, kesan kebocoran arus dalam peranti dengan lapisan aktif yang lebih tebal dapat dikurangkan kerana liang jejarum yang dapat diminimumkan (Shin et al. 2019). Pada masa yang sama, kepekatan larutan yang terlalu tinggi juga menyebabkan kadar penggabungan semula cas meningkat



RAJAH 5. Lengkung J-V peranti dengan kepekatan larutan penyediaan lapisan aktif yang berbeza di bawah pencahayaan (a) simulator suria dan (b) LED putih serta (c) spektrum IPCE peranti yang berkaitan

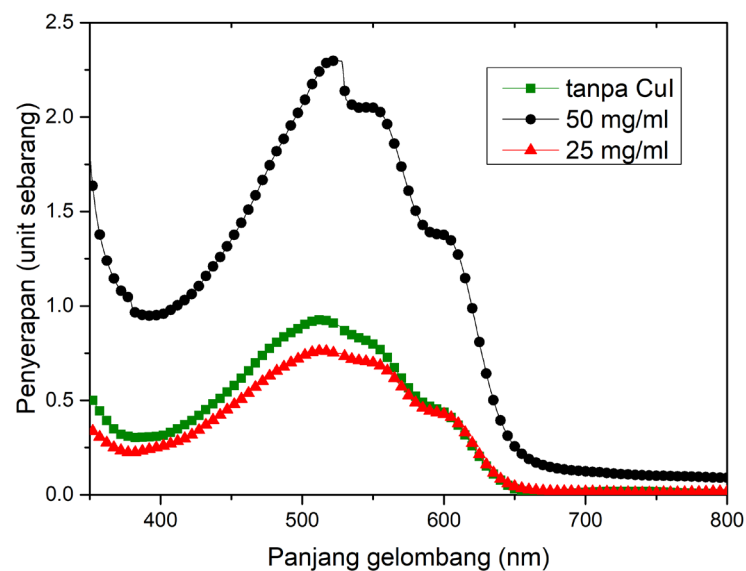


JADUAL 3. Prestasi peranti dengan variasi kepekatan larutan penyediaan lapisan aktif di bawah simulator suria ( $100 \text{ mWcm}^{-2}$ )

Kepekatan larutan lapisan aktif (mg/mL)	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ ( $\text{mAcm}^{-2}$ )	FF (%)	PCE (%)	$R_s$ ( $\Omega\text{cm}^2$ )	$R_{sh}$ ( $\Omega\text{cm}^2$ )
12.5	0.56	5.65	45	1.43	33.7	307.6
16.7	0.58	7.02	52	2.12	29.7	480.8
25.0	0.58	7.49	57	2.46	21.6	626.2
50.0	0.56	8.32	42	1.96	29.6	289.3

JADUAL 4. Prestasi peranti dengan variasi kepekatan larutan penyediaan lapisan aktif di bawah cahaya LED putih ( $1000 \text{ lx} \approx 0.28 \text{ mWcm}^{-2}$ )

Kepekatan larutan lapisan aktif (mg/mL)	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ ( $\mu\text{Acm}^{-2}$ )	FF (%)	PCE (%)	$P_{max}$ ( $\mu\text{Wcm}^{-2}$ )
12.5	0.34	53.69	39	2.54	7.12
16.7	0.44	71.79	41	4.67	13.08
25.0	0.40	71.44	51	5.17	14.49
50.0	0.44	96.18	54	8.14	22.80



RAJAH 6. Spektrum penyerapan cahaya sampel tanpa CuI dan sampel pada kepekatan larutan 25 dan 50 mg/mL

kerana pembawa cas perlu merentasi lapisan aktif yang lebih tebal. Bagi pencahayaan LED putih, peranti dengan kepekatan larutan tertinggi iaitu 50 mg/mL mempamerkan prestasi optimum dengan PCE 8.14%. Berbeza dengan keadaan pencahayaan di bawah simulator suria yang mampu menghasilkan banyak elektron dan lohong bebas, kadar penggabungan semula cas di bawah cahaya LED putih adalah jauh lebih rendah kerana bilangan elektron dan lohong bebas yang terhasil adalah sedikit (Park et al. 2018). Di bawah pencahayaan LED putih, kesan penyerapan cahaya yang tinggi oleh lapisan aktif yang tebal telah mengatasi faktor kadar penggabungan semula cas. Hasil ini menyebabkan kepekatan larutan optimum yang berbeza diperoleh di bawah sumber pencahayaan yang berbeza.

#### KESIMPULAN

Kesimpulannya, kesan kepekatan pendopan CuI dalam lapisan aktif P3HT:PCBM terhadap prestasi OSC jenis songsang di bawah cahaya luar dan dalam telah dikaji. Prestasi OSC meningkat dengan kepekatan pendopan CuI dan menurun apabila kepekatan optimum dicapai pada 9 bt%. Kehadiran CuI membolehkan eksiton dicerai dengan lebih berkesan dan pengangkutan lohong ke Ag berlaku dengan lebih lancar. Namun demikian, kepekatan pendopan CuI yang melampau (12 bt%) menyebabkan pengagregatan zarah CuI berlaku yang mampu membantutkan pengangkutan dan pengumpulan lohong. Apabila kepekatan larutan penyediaan lapisan aktif berubah, peranti didapati mempamerkan prestasi yang berbeza dalam dua keadaan pencahayaan iaitu di bawah simulator suria dan LED putih. Peranti dengan kepekatan larutan lapisan aktif yang paling tinggi menunjukkan PCE yang rendah di bawah simulator suria, manakala peranti yang sama boleh berfungsi dengan baik di bawah cahaya LED kerana hanya sedikit penggabungan semula cas berlaku di bawah cahaya keamatan rendah.

#### PENGHARGAAN

Pengarang ingin mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pengajian Tinggi Malaysia kerana menyokong projek penyelidikan menerusi geran FRGS/1/2020/STG07/UKM/02/4.

#### RUJUKAN

- Bahtiar, A., Tusaddiah, S.H., Mustikasari, W.P.S., Safriani, L., Kartawidjaja, M., Kanazawa, K., Enokida, I., Furukawa, Y. & Watanabe, I. 2015. Optical, structural and morphological properties of ternary thin film blend of P3HT: PCBM: ZnO nanoparticles. *Materials Science Forum* 827: 119-124. Trans Tech Publ.
- Beek, W.J.E., Wienk, M.M. & Janssen, R.A.J. 2004. Efficient hybrid solar cells from zinc oxide nanoparticles and a conjugated polymer. *Advanced Materials* 16(12): 1009-1013.
- Cutting, C.L., Bag, M. & Venkataraman, D. 2016. Indoor light recycling: A new home for organic photovoltaics. *Journal of Materials Chemistry C* 4(43): 10367-10370.
- Ferdous, R.M., Reza, A.W. & Siddiqui, M.F. 2016. Renewable energy harvesting for wireless sensors using passive RFID tag technology: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58: 1114-1128. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.332>
- Khairulaman, F.L., Yap, C.C. & Jumali, M.H.H. 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.
- Lakhotiya, G., Belsare, N., Arbuji, S., Kale, B. & Rana, A. 2019. Enhanced performance of PTB7-Th: PCBM based active layers in ternary organic solar cells. *RSC Advances* 9(13): 7457-7463.
- Lechêne, B.P., Cowell, M., Pierre, A., Evans, J.W., Wright, P.K. & Arias, A.C. 2016. Organic solar cells and fully printed super-capacitors optimized for indoor light energy harvesting. *Nano Energy* 26: 631-640.
- Li, B., Hou, B. & Amaratunga, G.A.J. 2021. Indoor photovoltaics, the next big trend in solution-processed solar cells. *InfoMat* 3(5): 445-459.
- Lim, E.L., Yap, C.C., Teridi, M.A.M., Teh, C.H. & Jumali, M.H.H. 2016. A review of recent plasmonic nanoparticles incorporated P3HT: PCBM organic thin film solar cells. *Organic Electronics* 36: 12-28.
- Olewi, H.F., Zakaria, A., Yap, C.C., Tan, S.T., Lee, H.B., Tan, C.H., Ginting, R.T., Alshangleh, A. & Talib, Z.A. 2018. Surface modification of ZnO nanorods with CdS quantum dots for application in inverted organic solar cells: Effect of deposition duration. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 29(4): 2601-2609.
- Park, S.Y., Li, Y., Kim, J., Lee, T.H., Walker, B., Woo, H.Y. & Kim, J.Y. 2018. Alkoxybenzothiadiazole-based fullerene and nonfullerene polymer solar cells with high shunt resistance for indoor photovoltaic applications. *ACS Applied Materials & Interfaces* 10(4): 3885-3894.
- Salim, E., Bobbara, S.R., Oraby, A. & Nunzi, J.M. 2019. Copper oxide nanoparticle doped bulk-heterojunction photovoltaic devices. *Synthetic Metals* 252: 21-28.
- Shin, S.C., Koh, C.W., Vincent, P., Goo, J.S., Bae, J.H., Lee, J.J., Shin, C., Kim, H., Woo, H.Y. & Shim, J.W. 2019. Ultra-thick semi-crystalline photoactive donor polymer for efficient indoor organic photovoltaics. *Nano Energy* 58(January): 466-475.
- Siddiqui, H., Parra, M.R., Pandey, P., Qureshi, M.S. & Haque, F.Z. 2020. Utility of copper oxide nanoparticles (CuO-NPs) as efficient electron donor material in bulk-heterojunction solar cells with enhanced power conversion efficiency. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices* 5(1): 104-110.

- Steim, R., Ameri, T., Schilinsky, P., Waldauf, C., Dennler, G., Scharber, M. & Brabec, C.J. 2011. Organic photovoltaics for low light applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95(12): 3256-3261. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.07.011>
- Sun, B., Snaith, H.J., Dhoot, A.S., Westenhoff, S. & Greenham, N.C. 2005. Vertically segregated hybrid blends for photovoltaic devices with improved efficiency. *Journal of Applied Physics* 97(1): 14914.
- Wanninayake, A.P., Gunashekar, S., Li, S., Church, B.C. & Abu-Zahra, N. 2015. Performance enhancement of polymer solar cells using copper oxide nanoparticles. *Semiconductor Science and Technology* 30(6): 64004.
- Wu, Z., Zhang, W., Xie, C., Zhang, L., Wang, Y., Zhang, Y., Liu, Q., Fu, Y., Li, Y. & Li, J. 2020. Bridging for carriers by embedding metal oxide nanoparticles in the photoactive layer to enhance performance of polymer solar cells. *IEEE Journal of Photovoltaics* 10(5): 1353-1358.
- Xu, B., Sai-Anand, G., Unni, G.E., Jeong, H-M., Kim, J-S., Kim, S-W., Kwon, J-B., Bae, J-H. & Kang, S-W. 2019. Pyridine-based additive optimized P3HT: PC61BM nanomorphology for improved performance and stability in polymer solar cells. *Applied Surface Science* 484: 825-834.
- Yun, T.W. & Sulaiman, K. 2011. Fabrication and morphological characterization of hybrid polymeric solar cells based on P3HT and inorganic nanocrystal blends. *Sains Malaysiana* 40(1): 43-47.
- Zhang, H., Cheng, J., Lin, F., He, H., Mao, J., Wong, K.S., Jen, A.K.-Y. & Choy, W.C.H. 2016. Pinhole-free and surface-nanostructured NiO x film by room-temperature solution process for high-performance flexible perovskite solar cells with good stability and reproducibility. *ACS Nano* 10(1): 1503-1511.

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