

## Penilaian Kitaran Hayat Sel Suria Terpeka Pewarna di Malaysia

(Life Cycle Assessment of Dye Sensitized Solar Cell in Malaysia)

Nur Ifthitah Mustafa<sup>a</sup>, Norasikin Ahmad Ludin<sup>a\*</sup>, Mohd Adib Ibrahim<sup>a</sup>, Azami Zaharim<sup>b</sup> & Norani Muti Mohamed<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Solar Energy Research Institute, Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia

<sup>b</sup>Fakulti of Engineering & Built Environment, Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia

<sup>c</sup>Centre of Innovative Nanostructures & Nanodevices (COINN), Universiti Teknologi PETRONAS, Malaysia

\*Corresponding author: sheekeen@ukm.edu.my

Received 4 July 2018, Received in revised form 28 October 2018

Accepted 30 January 2019, Available online 30 April 2019

### ABSTRACT

Solar energy is the most abundant nature resources on earth which easily exploitable, clean, long lasting and dependable which make it is desirable to generate electricity compared to other energy resources. However, conventional solar photovoltaic (PV) technologies such as silicon and thin film solar cells may provide significant environmental impacts over their life cycle due to complicated production process of these PV technologies. This make numerous scientists looking forward on the new emerging solar cells including dye sensitized solar cell (DSSC). Thus, the objective of this research is to analyse a comprehensive environmental impact assessment through life cycle assessment (LCA) from cradle-to-gate approach of this technology in Malaysia. Two environmental indicators were evaluated such as cumulative energy demand (CED) that affect the energy payback time (EPBT), and greenhouse gas (GHG) emissions. The results highlight that DSSC module has EPBT of 3.49 years, CED of 1190.29 MJ/m<sup>2</sup> and GHG emissions of 262.38 gCO<sub>2eq</sub>/kWh which were slightly higher compared to other researchers. Higher energy consumption in module fabrication and panel manufacturing process, lower conversion efficiency ( $\eta$ ) and solar irradiation (IR), and used of FTO glass substrate were recognized as main contributors to the results.

**Keywords:** Cumulative Energy Demand (CED); Dye Sensitized Solar Cell (DSSC); Energy Payback Time (EPBT); Greenhouse Gas (GHG) Emissions; Life Cycle Assessment (LCA)

### ABSTRAK

Tenaga suria adalah sumber alam yang paling banyak di bumi yang mudah dieksploitasi, bersih, tahan lama dan stabil yang menjadikannya sesuai untuk menghasilkan tenaga elektrik berbanding dengan sumber tenaga yang lain. Walau bagaimanapun, teknologi konvensional suria fotovolta (PV) seperti silikon dan sel suria filem nipis boleh memberikan kesan alam sekitar ke atas kitaran hayat mereka yang disebabkan oleh proses pengeluaran yang rumit. Ini menyebabkan ramai saintis mengkaji sel-sel suria yang baru termasuklah sel suria terpeka pewarna (DSSC). Oleh itu, objektif penyelidikan ini adalah untuk mengkaji penilaian impak alam sekitar secara komprehensif mengenai teknologi ini di Malaysia melalui penilaian kitaran hidup (LCA) bermula dari buaian hingga pagar (cradle-to-gate). Dua petunjuk alam sekitar telah digunakan dalam kajian ini iaitu kumulatif keperluan tenaga (CED) yang memberi kesan kepada masa bayaran balik tenaga (EPBT), dan pelepasan gas rumah hijau (GHG). Hasilnya menunjukkan bahawa DSSC mempunyai EPBT iaitu 3.49 tahun, CED yang berjumlah 1190.29 MJ/m<sup>2</sup> dan GHG sebanyak 262.38 gCO<sub>2eq</sub>/kWh yang lebih tinggi berbanding penyelidik yang lain. Penggunaan tenaga yang tinggi semasa proses fabrikasi modul dan pemasangan panel, kecekapan penukaran ( $\eta$ ) yang rendah, dan purata penyinaran suria (IR) yang rendah serta penggunaan substrat kaca FTO adalah beberapa faktor yang telah dikenal pasti sebagai penyumbang utama kepada keputusan ini.

**Kata kunci:** Kumulatif Keperluan Tenaga (CED); Masa Bayaran Balik Tenaga (EPBT); Penilaian Kitaran Hayat (LCA); Pelepasan Gas Rumah Hijau (GHG); Sel Suria Terpeka Pewarna (DSSC)

### PENGENALAN

Perubahan iklim global, pengurangan bahan api fosil, dan kekurangan tenaga di seluruh dunia telah menyebabkan sumber tenaga boleh diperbaharui sangat diperlukan sejak beberapa dekad yang lalu. Tenaga suria, angin, biogas dan biomas adalah contoh sumber tenaga boleh diperbaharui yang

mempunyai keupayaan untuk memenuhi jurang kekurangan tenaga. Antara sumber tenaga ini, tenaga suria memainkan peranan penting sejak beberapa tahun kebelakangan ini dengan menghasilkan sel suria yang dapat menukarkan tenaga matahari secara langsung menjadi tenaga elektrik (Sakib & Atiqur Rahman Ahad 2018). Sel suria ini boleh dibahagikan kepada tiga generasi iaitu generasi pertama yang terdiri

daripada silikon mono-hablur (mono-Si) dan silikon poli-hablur (poli-Si) dengan kecekapan sehingga ~23% (National Renewable Energy Laboratory 2017), kumpulan filem nipis seperti silikon amorfus (a-Si), kadmium telurida (CdTe) dan kuprum indium galium selenida (CIGS) dikategorikan sebagai sel suria generasi kedua, dan sel-sel suria yang baru muncul seperti sel suria terpeka warna (DSSC), sel suria perovskit (PSC) dan sel suria pemekaan titik kuantum (QDSSC) yang dimiliki oleh sel suria generasi ketiga. Antara sel-sel suria yang telah dinyatakan, DSSC telah mengagumkan penyelidik sejak sedekad yang lalu dalam mengatasi PV konvensional kerana ia dihasilkan dengan penggunaan tenaga yang rendah melalui proses fabrikasi yang mudah (Parisi et al. 2014), selain kecekapannya bekerja di kawasan yang teduh dan keadaan cahaya yang rendah (Fakharuddin et al. 2014).

Fabrikasi DSSC yang pertama telah dilaporkan secara rasmi pada tahun 1991 oleh Michael Grätzel dan Brian O'Regan berdasarkan filem koloid titanium dioksida ( $\text{TiO}_2$ ) yang dikenali sebagai sel Grätzel (O'Regan & Gratzel, 1991). Sehingga kini, banyak kertas penyelidikan mengenai DSSC dalam bidang yang berbeza telah diterbitkan sebelum ini termasuklah penilaian kitaran hayat (LCA). Penilaian kitaran hayat (LCA) adalah kaedah yang komprehensif untuk mengkaji kitaran hayat sesuatu produk atau perkhidmatan, bermula dari penggunaan bahan mentah hingga akhir hayatnya; dari segi penggunaan tenaga dan kesan kepada alam sekitar (International Standards Organisation, 2006a; 2006b).

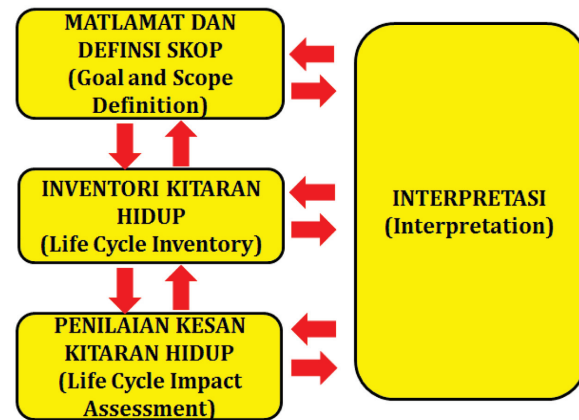
Kebanyakan penyelidik telah menjalankan kajian LCA terhadap beberapa sel suria seperti LCA silikon mono-hablur dan poli-hablur, kadmium telurida (CdTe) dan lain-lain dengan mengambil kira kumulatif keperluan tenaga (CED), masa bayaran balik tenaga (EPBT), dan pelepasan gas rumah hijau (GHG) (Alsema & de Wild-Scholten, 2004; Alsema, 2000; Frischknecht et al. 2015a; Fthenakis, 2009; Ito et al. 2010, 2011; Kim & Fthenakis, 2011; Kim et al. 2014; Lukač et al. 2016). Bagi penyelidikan LCA DSSC, kajian telah dimulakan oleh Greijer et al. pada tahun 2001 (Greijer et al. 2001) dan diikuti oleh de Wild-Scholten & Veltkamp (2007) dan Parisi et al. (2011; 2012; 2013; 2014).

Walau bagaimanapun, tiada kajian terdahulu telah dijalankan mengenai LCA DSSC di negara ASEAN (Kannan et al. 2006; Kim et al. 2014; Kittner et al. 2013; Luo et al. 2018). Justeru, kajian ini dijalankan bertujuan untuk menganalisa penilaian kitaran hayat (LCA) panel DSSC khususnya di Malaysia bermula dari fabrikasi modul dan pemasangan panel, pengangkutan dan pemasangan dan penggunaan PV melalui kaedah kumulatif keperluan tenaga (CED), masa bayaran balik tenaga (EPBT), dan pelepasan gas rumah hijau (GHG).

#### METODOLOGI KAJIAN

Menurut rangka kerja LCA (Sherwani et al. 2010), terdapat empat fasa metodologi LCA yang telah ditubuhkan oleh Organisasi Piawai Antarabangsa (ISO) seperti dalam Rajah 1 iaitu; Matlamat dan definisi skop (*Goal and scope*

*definition*), Inventori kitaran hayat (*Life Cycle Inventory*), Penilaian kesan kitaran hayat (*Life Cycle Impact Assessment*) dan Interpretasi (*Interpretation*) (International Standards Organisation 2006a; 2006b). Dalam analisis ini, LCA DSSC telah dijalankan mengikut Garis Panduan Metodologi Penilaian Kitaran Hidup (LCA) untuk Elektrik Fotovolta (Frischknecht et al. 2016; Fthenakis et al. 2011).



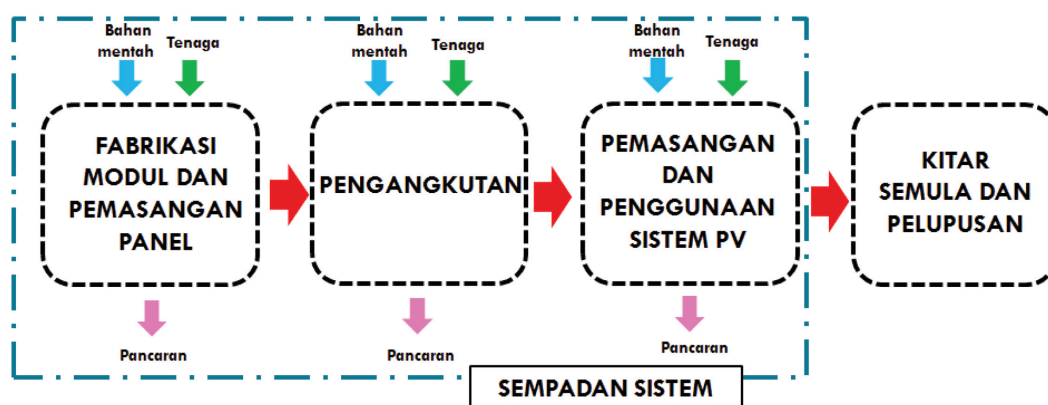
RAJAH 1. Rangka kerja penilaian kitaran hayat (LCA) (Sherwani et al. 2010; International Standards Organisation 2006a; 2006b)

#### MATLAMAT DAN DEFINISI SKOP

Matlamat utama kajian ini adalah untuk mengenal pasti potensi penggunaan tenaga dan kesan alam sekitar bagi DSSC di peringkat fabrikasi modul dan pemasangan panel DSSC, pengangkutan, serta pemasangan dan penggunaan system PV di bawah purata penyinaran suria ( $IR$ ) di Ipoh, Malaysia iaitu  $1402.82 \text{ kWh/m}^2/\text{tahun}$  berdasarkan laman web NASA meteorologi permukaan dan tenaga suria (Stackhouse Jr. & Kusterer 2016). Dalam kajian ini, peringkat akhir hayat DSSC tidak dimasukkan dalam analisis kerana kekurangan data (Azzopardi & Mutale 2010; Parisi et al. 2014) dan tidak mempunyai pengalaman praktikal dalam mengitar semula panel DSSC (de Wild-Scholten & Veltkamp 2007). Sempadan sistem untuk LCA DSSC dalam kajian ini ditunjukkan seperti Rajah 2. Unit fungsi 1 kWj elektrik yang dijana daripada sistem 3 kWp DSSC PV yang dipasang di atas bumbung dan bersambung dengan grid telah dipilih (Parisi et al. 2014). Kecekapan penukaran ( $\eta$ ) panel DSSC diandaikan 4%, dan jangkaan kemerosotan ( $DE$ ) sebanyak 80% telah dianggarkan seperti yang disyorkan oleh Agensi Tenaga Antarabangsa (IEA) (Frischknecht et al. 2016). Jangka hayat seumur hidup ( $LE$ ) panel DSSC telah diandaikan selama 20 tahun seperti penyelidik-penyelidik yang lain (Greijer et al. 2001; Parisi et al. 2011, 2012, 2014), serta nisbah prestasi ( $PR$ ) sebanyak 0.75 telah diandaikan bagi sambungan sistem PV di atas bumbung (Frischknecht et al. 2016).

#### INVENTORI KITARAN HIDUP

Data primer untuk keperluan tenaga dan penggunaan bahan mentah bagi proses fabrikasi modul dan pemasangan panel DSSC telah dikumpulkan dari projek panel DSSC di makmal



RAJAH 2. Sempadan sistem LCADSSC dalam analisis ini

Pusat Nanostruktur dan Nanodevices Inovatif (COINN), Universiti Teknologi Petronas (UTP), Ipoh, Malaysia dan dari beberapa sorotan kajian sebelum ini. Data bagi keseimbangan sistem (BOS) juga dikumpulkan dari nilai kajian terdahulu yang menggunakan BOS pada organik fotovolt (OPV) (Azzopardi & Mutale 2010; Raugei et al. 2007). Sementara itu, data sekunder dipilih daripada pangkalan data Ecoinvent v3.3 (Ecoinvent Centre 2016) apabila data primer tidak tersedia (Parisi et al. 2011, 2014).

Data pembuatan panel DSSC diringkaskan dalam Jadual 1. Dalam kajian ini, kawasan panel DSSC diandaikan 1.0 m × 1.8 m (Mohamed et al. 2016) dengan kawasan aktif sebanyak 75% berdasarkan pra-perindustrian panel DSSC (Parisi et al. 2014). Pengambilan tenaga (kWj/m<sup>2</sup>) dikira berdasarkan pengeluaran 60 panel DSSC dengan setiap

panel diandaikan mempunyai kuasa 50 Wp/m<sup>2</sup> (Meyer et al. 2009).

Dalam analisis ini, sistem DSSC PV dan BOS adalah dipasang pada bumbung dengan kecondongan 30° menghadap ke selatan dan disambungkan ke grid (de Wild-Scholten & Veltkamp 2007; Toyoda et al. 2004) yang terdiri daripada struktur pemasangan seperti aluminium, besi, kabel untuk pemasangan elektrik dan inverter, seperti yang dinyatakan dalam Jadual 2. Sepanjang penggunaan sistem DSSC PV, inverter hanya akan digantikan sekali sahaja (Parisi et al. 2012). Oleh kerana panel DSSC ini dipasang di Malaysia, maka sumber penjanaan dari gas asli (46.3%), arang batu (41.0%), hidro (10.7%), diesel (1.0%), minyak (0.03%), dan lain-lain (0.8%) juga diambil kira dalam analisis ini (Suruhanjaya Tenaga 2016).

JADUAL 1. Penggunaan bahan bagi penghasilan 1 m<sup>2</sup> panel DSSC

Bahan	Jisim/Kawasan (g/m <sup>2</sup> )	Rujukan
Substrat kaca, FTO	15,000 (x2)	(de Wild-Scholten & Veltkamp, 2007; Parisi et al. 2014)
Titanium dioksida, TiO <sub>2</sub>	15	(Ito et al. 2008; Parisi et al. 2014)
Rutenium (N719)	0.1	(de Wild-Scholten & Veltkamp, 2007; Parisi et al. 2014)
Platinum	15.8	(Ito et al. 2008; Parisi et al. 2011)
Resin poliester	130	(de Wild-Scholten & Veltkamp, 2007; Parisi et al. 2011, 2012)
Iodin	24	(Ito et al. 2008; Parisi et al. 2014)
Pes silver	7.2	(de Wild-Scholten & Veltkamp, 2007; Parisi et al. 2014)
Air ternyahion	1000	Andaian kajian
Etanol	1000	Andaian kajian
Asetonitril	1000	(de Wild-Scholten & Veltkamp, 2007), Andaian kajian

JADUAL 2. BOS bagi sambungan sistem PV ke grid di atas bumbung

Bahan	Jisim/Kawasan (g/m <sup>2</sup> )	Rujukan
Aluminium (rangka)	1900	(Azzopardi & Mutale 2010; Raugei et al. 2007)
Besi (bahan sokongan)	25000	(Azzopardi & Mutale 2010; Raugei et al. 2007)
Cu (kabel dan kotak penghubung)	40	(Azzopardi & Mutale 2010; Raugei et al. 2007)
Plastik (kabel dan kotak penghubung)	40	(Azzopardi & Mutale 2010; Raugei et al. 2007)
Inverter	#items (1)	Ecoinvent database
Elektrik (Untuk pemasangan)	10 MJ/m <sup>2</sup>	(Azzopardi & Mutale 2010; Raugei et al. 2007)

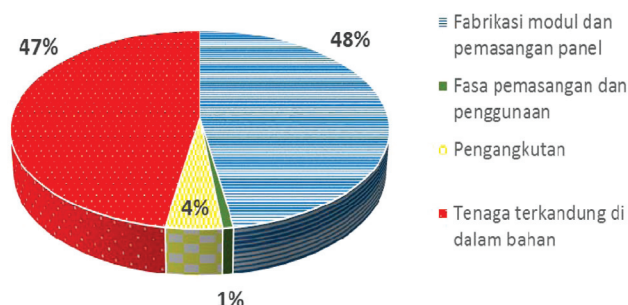
## PENILAIAN KESAN KITARAN HIDUP

Dalam peringkat penilaian kesan kitaran hidup (LCIA), dua indikator telah dikenal pasti dan dinilai dari data LCI seperti kumulatif keperluan tenaga (CED) yang mempengaruhi masa bayaran balik tenaga (EPBT) dan pelepasan GHG. Penilaian tenaga yang diperlukan sepanjang kitaran hidup DSSC bermula dari pembuatan modul dan panel, pengangkutan, pemasangan dan penggunaan sistem PV dianalisis dengan menggunakan kaedah CED versi 1.09 dalam perisian Simapro (Frischknecht et al. 2015b). Selain itu, EPBT yang menentukan jumlah tahun yang diperlukan untuk sistem tenaga boleh diperbaharui dikira berdasarkan jumlah tenaga yang diperlukan untuk menghasilkan DSSC sepanjang kitaran hayatnya dan dibahagikan dengan jumlah pengeluaran tenaga yang dihasilkan oleh panel DSSC seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan 1 (Fthenakis & Kim 2011). Manakala pelepasan GHG pula dianalisis dengan menggunakan kaedah *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2013* yang terdapat di dalam perisian Simapro (IPCC 2013).

$$EPBT = \frac{\text{(Kumulatif keperluan tenaga (CED))}}{\text{(Jumlah penjanaan tenaga)}} \quad (1)$$

## KEPUTUSAN DAN INTERPRETASI

Berdasarkan input yang diperolehi di peringkat LCI, data-data ini dimasukkan dalam perisian Simapro untuk mengira CED bagi DSSC bermula dari fasa fabrikasi modul dan pemasangan panel, pengangkutan, dan pemasangan system PV dan penggunaan serta tenaga yang terkandung di dalam bahan. Hasilnya, didapati bahawa jumlah CED bagi keseluruhan kitaran hidup DSSC adalah sebanyak 1190.29 MJ/m<sup>2</sup> seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3. Hasil kajian ini adalah sedikit tinggi berbanding dengan kajian awal oleh Parisi et al. 2014 yang menyatakan bahawa fabrikasi modul dan pemasangan panel CED DSSC adalah di antara 229 MJ/m<sup>2</sup> hingga 1010 MJ/m<sup>2</sup> (Parisi et al. 2014).



RAJAH 3. Kumulatif keperluan tenaga bagi 1 m<sup>2</sup> DSSC yang terdiri daripada fabrikasi modul dan pemasangan panel, fasa pemasangan dan penggunaan, pengangkutan, dan tenaga terkandung di dalam bahan

Daripada pengiraan CED ini, jumlah penggunaan tenaga untuk fabrikasi modul dan pemasangan panel bagi 1 m<sup>2</sup> DSSC adalah 565.24 MJ/m<sup>2</sup> (48%). Penggunaan tenaga utama dalam fabrikasi modul adalah kerana proses pengeringan

dan pensinteran pes TiO<sub>2</sub> untuk lapisan pertama dan kedua yang memerlukan suhu tinggi ~450°C (Greijer et al. 2001; Jasim 2011), dan diikuti oleh pensinteran platinum di dalam relau. Suhu yang tinggi adalah penting untuk menukarkan struktur TiO<sub>2</sub> sekaligus dapat meningkatkan kecekapan pengangkutan elektron pada nanopartikel TiO<sub>2</sub> (de Wild-Scholten & Veltkamp 2007; Parisi et al. 2011). Oleh itu, penggunaan suhu yang rendah (de Wild-Scholten & Veltkamp 2007), meminimumkan jumlah bahan yang digunakan dalam langkah pengeluaran (Greijer et al. 2001), mengoptimumkan penggunaan pencetakan pes TiO<sub>2</sub> dan platinum (Parisi et al. 2013) dan menggantikan proses pensinteran dengan teknik yang lain (Gong et al. 2015) adalah beberapa alternatif yang dapat mengurangkan penggunaan tenaga dalam penghasilan modul DSSC.

Bagi tenaga yang terkandung di dalam bahan pula, jumlah tenaga yang diperlukan adalah 564.46 MJ/m<sup>2</sup> (47%) di mana substrat kaca FTO diiktiraf sebagai penyumbang terbesar dengan 396.39 MJ/m<sup>2</sup> (70.2%), diikuti oleh aseton, 64.85 MJ/m<sup>2</sup> (11.5%); etanol, 43.55 MJ/m<sup>2</sup> (7.7%); pes silver, 28.83 MJ/m<sup>2</sup> (5.1%); platinum, 16.49 MJ/m<sup>2</sup> (2.9%); resin poliester, 13.29 MJ/m<sup>2</sup> (2.4%); TiO<sub>2</sub>, 1.05 MJ/m<sup>2</sup> (0.2%), dan Rutenium (N719), 0.01 MJ/m<sup>2</sup> (0.0%). Daripada kajian ini, didapati bahawa substrat kaca FTO memerlukan tenaga yang tinggi dan dipersetujui oleh penyelidikan terdahulu (de Wild-Scholten & Veltkamp 2007; Greijer et al. 2001; Parisi et al. 2011, 2012, 2013, 2014) kerana penghasilan kaca menggunakan tenaga yang banyak (de Wild-Scholten & Veltkamp 2007) dan mereka menguasai jumlah jisim modul (Gong et al. 2015). Oleh itu, sebagai alternatif, penggantian substrat kaca dengan substrat lain seperti logam atau kerajang polimer (de Wild-Scholten & Veltkamp, 2007) dan substrat plastik PoliEtilena Teraftelat (PET) (Parisi et al. 2013, 2014) pada masa akan datang atau mengitar semula kaca FTO (de Wild-Scholten & Veltkamp 2007; Greijer et al. 2001) dapat mengurangkan keperluan tenaga.

Bagi proses pengangkutan pula, dianggarkan substrat kaca FTO dengan purata berat 15 kg/m<sup>2</sup> diimport dari Pelabuhan Klang, Selangor ke Universiti Teknologi Petronas (UTP), Ipoh, Perak menggunakan trak ringan dengan jarak purata 238 km. Dengan mengandaikan keperluan purata unit tenaga sebanyak 3.5 MJ/t/km (Wu et al. 2017), maka jumlah keperluan tenaga untuk pengangkutan adalah sebanyak 50.61 MJ/m<sup>2</sup> (4%). Selain itu, jumlah penggunaan elektrik bagi BOS dianggarkan hanya 10 MJ/m<sup>2</sup> (1%) dengan menggunakan kajian yang telah dilakukan oleh Azzopardi dan penyelidik yang lain untuk pemasangan bumbung yang bersambung ke grid (Azzopardi & Mutale 2010; Raugei et al. 2007). Konsep baru bagi pemasangan kabel dan sambungan BOS DSSC masih dalam kajian (Parisi et al. 2014).

Oleh kerana peringkat akhir hayat DSSC tidak dimasukkan dalam sempadan sistem, maka beberapa anggapan telah dibuat seperti substrat kaca FTO dan rutenium (N719) akan dikitar semula, bahan bukan organik akan dilupuskan di tapak pelupusan dan seluruh polimer akan dibakar (Azzopardi & Mutale 2010; Greijer et al. 2001; Parisi et al. 2011).

Masa bayaran balik tenaga (EPBT) pula dikira dengan membahagikan CED keseluruhan kitaran hayat DSSC dengan jumlah penjanaan tenaga tahunan untuk sistem DSSC PV mengikut Persamaan (1) (Fthenakis & Kim, 2011). Dalam kajian ini, untuk menilai 3 kWp sistem DSSC PV di atas bumbung, jumlah CED yang digunakan adalah sebanyak 126,302.06 MJ. Manakala, penjanaan tenaga tahunan untuk sistem PV DSSC dianggarkan sebanyak 4545.14 kWj/tahun berdasarkan Persamaan 2 seperti berikut (Fthenakis et al. 2008; Parisi et al. 2014):

$$\text{Penjanaan Tenaga} = A_{3\text{kWp}} \times IR_{\text{MY}} \times \eta \times PR \quad (2)$$

Di mana  $A_{3\text{kWp}}$  adalah kawasan aktif jumlah panel PV untuk kapasiti 3 kWp;  $IR_{\text{MY}}$  adalah purata penyinaran solar di Ipoh, Malaysia;  $\eta$  adalah kecekapan penukaran panel DSSC; dan  $PR$  adalah nisbah prestasi.

Berdasarkan data-data yang diberikan dalam Jadual 3, maka EPBT sebanyak 3.49 tahun telah diperolehi dengan mengambil kira input tenaga utama grid Malaysia iaitu 7.96 MJ/kWj (Kim et al. 2014). EPBT yang dikira dalam analisis ini adalah lebih tinggi berbanding penyelidik-penyelidik LCA DSSC yang lain seperti dilaporkan oleh Greijer et al. (2001), iaitu sebanyak 0.74 – 2.10 tahun, de-Wild Scholten et al. (2007), melaporkan sebanyak 0.6 – 1.4 tahun diikuti oleh Parisi et al. (2011; 2012), yang melaporkan EPBT sebanyak 1.58 tahun, dan 1.4 – 1.8 tahun (Parisi et al. 2014). Faktor utama perbezaan ini adalah kerana kecekapan penukaran ( $\eta$ ) bagi panel DSSC yang digunakan dalam kajian ini hanyalah sebanyak 4% berbanding dengan penyelidik lain yang menggunakan kecekapan penukaran ( $\eta$ ) sebanyak 8% (de Wild-Scholten & Veltkamp, 2007; Greijer et al. 2001; Parisi et al. 2011; 2012; 2013; 2014). Menurut Kim et al. (2014), modul kecekapan yang rendah menyebabkan kurang tenaga yang dijana daripada jumlah tenaga suria yang sama. Akibatnya, kecekapan yang lebih rendah daripada modul PV membawa kepada pengeluaran tenaga yang lebih rendah dan EPBT yang lebih lama (Alsema 2000; Vandeligt et al. 2010).

JADUAL 3. Data-data yang diperlukan untuk mengira jumlah EPBT

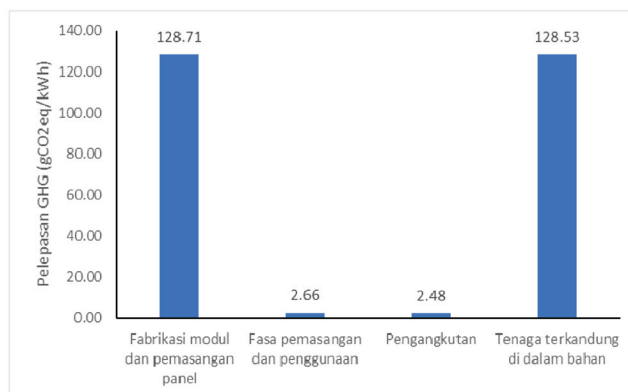
Parameter	Nilai
Kawasan aktif ( $A_{3\text{kWp}}$ )	108.0 (m <sup>2</sup> )
Penyinaran suria ( $IR_{\text{MY}}$ )	1402.82 (kWj/m <sup>2</sup> /tahun)
Kecekapan penukaran ( $\eta$ )	4%
Nisbah prestasi ( $PR$ )	0.75
Penjanaan tenaga	4545.14 kWj/tahun
Penggunaan tenaga	126,302.06 MJ
Input tenaga utama grid Malaysia	7.96 MJ/kWj
EPBT	3.49 tahun

Selain itu, penyinaran suria ( $IR$ ) juga turut memainkan peranan penting bagi sistem PV kerana ia berkadar langsung dengan penjanaan tenaga. Jika penyinaran suria adalah rendah, maka jumlah tenaga yang dihasilkan juga adalah rendah. Kenyataan ini turut disokong oleh penyelidik-

penyelidik yang lain (Alsema & Nieuwlaar 2000; Canada, 2010; de Wild-Scholten & Veltkamp 2007; Peng et al. 2013; Stoppato 2008). Dalam analisis ini, purata penyinaran suria di Ipoh, Malaysia hanyalah 1402.82 kWj/m<sup>2</sup>/tahun (Stackhouse Jr. & Kusterer 2016), berbanding purata penyinaran suria di Eropah yang lebih tinggi iaitu 1700 kWj/m<sup>2</sup>/tahun (de Wild-Scholten & Veltkamp 2007; Greijer et al. 2001; Parisi et al. 2011; 2012; 2013; 2014).

Selain EPBT, indikator alam sekitar yang turut dinilai dalam kajian ini adalah pelepasan gas rumah hijau (GHG), dinyatakan sebagai setara CO<sub>2-eq</sub>. Ia ditentukan dengan membahagikan jumlah pelepasan GHG sistem PV kepada jumlah elektrik yang dihasilkan sepanjang hayatnya. Dalam kajian ini, penggunaan tenaga CED sistem DSSC telah didarabkan dengan faktor pelepasan 0.69 kgCO<sub>2-eq</sub>/kWh untuk penggunaan elektrik Malaysia (Mohamed et al. 2016) untuk menilai jumlah pelepasan GHG. Dengan mengandaikan jangka hayat DSSC selama 20 tahun (de Wild-Scholten & Veltkamp, 2007; Greijer et al. 2001; Mohamed et al. 2016; Parisi et al. 2011; 2012; 2013; 2014), maka jumlah kadar pelepasan GHG yang dikira ialah 262.38 gCO<sub>2-eq</sub>/kWh. Kajian terdahulu LCA DSSC menunjukkan kadar pelepasan GHG sekitar 19 - 47 gCO<sub>2-eq</sub>/kWh (Greijer et al. 2001), 20-120 gCO<sub>2-eq</sub>/kWh (de Wild-Scholten & Veltkamp, 2007), 22 - 29 gCO<sub>2-eq</sub>/kWh (Parisi et al. 2011; 2012; 2014).

Terdapat beberapa faktor yang menyumbang kepada penghasilan GHG yang tinggi jika dibandingkan dengan kajian-kajian terdahulu. Antaranya adalah disebabkan oleh penghasilan tenaga yang tinggi semasa proses pembuatan modul DSSC jika dibandingkan dengan penyelidik-penyelidik yang lain. Hal ini kerana tenaga yang digunakan (CED) berkadar terus dengan pelepasan GHG (Fthenakis & Kim 2009). Dalam kajian ini, didapati bahawa penggunaan tenaga semasa peringkat fabrikasi modul dan pemasangan panel DSSC dikenalpasti sebagai penyumbang terbesar dalam pelepasan GHG iaitu sebanyak 128.71 gCO<sub>2-eq</sub>/kWh, diikuti dengan tenaga terkandung di dalam bahan 128.53 gCO<sub>2-eq</sub>/kWh, fasa pemasangan dan penggunaan sistem PV 2.66 gCO<sub>2-eq</sub>/kWh dan pengangkutan 2.48 gCO<sub>2-eq</sub>/kWh seperti yang dilampirkan dalam Rajah 4.

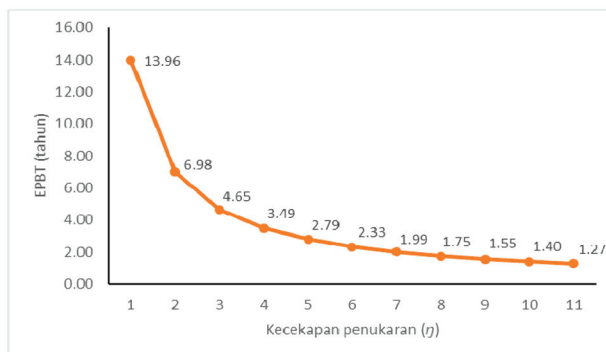


RAJAH 4. Jumlah pelepasan GHG untuk keseluruhan kitar hayat DSSC

Antara faktor lain yang turut dibangkitkan oleh penyelidik lain adalah mengenai pengaruh kecekapan penukaran ( $\eta$ ) panel dan jangka hayat panel suria kepada pelepasan GHG. Peningkatan kecekapan panel PV boleh mengakibatkan pengurangan pelepasan GHG (Alsema & Nieuwlaar 2000; Fthenakis et al. 2009; Ito et al. 2008; Pacca et al. 2007; Parisi et al. 2012; Zhang et al. 2015). Ini kerana kecekapan penukaran panel yang tinggi menyebabkan banyak tenaga yang dihasilkan dari jumlah tenaga suria yang sama (Kim et al. 2014), seterusnya mengurangkan pelepasan GHG pada alam sekitar. Berbeza dalam analisis ini, kecekapan penukaran yang digunakan adalah rendah (4%), maka jumlah pelepasan GHG adalah tinggi.

#### ANALISIS KEPEKAAN

Dalam kajian ini, analisis kepekaan telah dijalankan untuk mengkaji kesan perubahan kecekapan penukaran ( $\eta$ ) terhadap EPBT. Rajah 5 menunjukkan analisis kepekaan kecekapan penukaran ( $\eta$ ) yang berbeza bermula dari 1% hingga 11% terhadap EPBT. Hasilnya, EPBT berkurangan dari 13.96 tahun kepada 1.27 tahun dengan peningkatan kecekapan penukaran ( $\eta$ ) dari 1% sehingga 11% dibawah purata penyinaran suria ( $IR$ ) di Ipoh, Malaysia iaitu 1402.82 kWj/m<sup>2</sup>/tahun dan nisbah prestasi ( $PR$ ) 0.75. Hasil analisis kepekaan terhadap kecekapan penukaran ( $\eta$ ) ini adalah setanding dengan kajian terdahulu yang menunjukkan kecekapan penukaran ( $\eta$ ) panel DSSC yang lebih tinggi mengakibatkan EPBT yang lebih rendah (Alsema & Nieuwlaar 2000; Pacca et al. 2007; Parisi et al. 2012). Dengan mengurangkan luas permukaan panel DSSC atau PV, akan dapat meningkatkan kecekapan penukaran ( $\eta$ ) bagi sesuatu panel PV (Dai et al. 2004; Hinsch et al. 2012).



RAJAH 5. Analisis kepekaan kecekapan penukaran ( $\eta$ ) terhadap EPBT (tahun)

#### KESIMPULAN

Dalam kajian ini, analisis terhadap sel suria terpeka cahaya (DSSC) melalui penilaian kitaran hidup (LCA) telah dilakukan bermula dari fabrikasi modul dan pemasangan panel, pengangkutan, pemasangan dan penggunaan sistem PV telah dijalankan di Malaysia. Tiga indikator telah dikenal pasti dan dinilai seperti kumulatif keperluan tenaga (CED), masa bayaran balik tenaga (EPBT) dan pelepasan gas rumah

hijau (GHG). Hasil kajian ini mendapati bahawa CED yang dihasilkan sepanjang kitaran hidup DSSC adalah berjumlah 1190.29 MJ/m<sup>2</sup>, EPBT selama 3.49 tahun dan pelepasan GHG sebanyak 262.38 gCO<sub>2-eq</sub>/kWh. Penggunaan tenaga yang tinggi semasa proses fabrikasi modul dan pemasangan panel, penggunaan substrat kaca, kecekapan penukaran ( $\eta$ ) yang rendah, dan purata penyinaran suria ( $IR$ ) yang rendah adalah beberapa faktor yang telah dikenal pasti sebagai penyumbang kepada CED yang tinggi, seterusnya menyebabkan EPBT yang lama dan kadar pelepasan GHG yang tinggi.

#### PENGHARGAAN

Kajian ini disokong oleh Geran Universiti Penyelidikan (GUP-2015-037) dan (AP-2017-006/5) di bawah Institut Penyelidikan Tenaga Suria (SERI), Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM), Malaysia.

#### RUJUKAN

- Alsema, E. A. 2000. Energy Pay-back Time and CO<sub>2</sub> Emissions of PV Systems. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 8(1): 17-25.
- Alsema, E. A. & de Wild-Scholten, M. J. 2004. Environmental life cycle assessment of advanced silicon solar cell technologies. *19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, hlm. 2-5.
- Alsema, E. A. & Nieuwlaar, E. 2000. Energy viability of photovoltaic systems. *Energy Policy* 28(14): 999-1010.
- Azzopardi, B. & Mutale, J. 2010. Life cycle analysis for future photovoltaic systems using hybrid solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(3): 1130-1134.
- Vandeligt, K., Pelland, S. & Poissant, Y. 2012. Assessment of the Environmental Performance of Solar Photovoltaic Technologies. *Environment Canada*.
- Dai, S., Weng, J., Sui, Y., Shi, C., Huang, Y., Chen, S., Pan, X., et al. 2004. Dye-sensitized solar cells, from cell to module. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 84(1-4): 125-133.
- de Wild-Scholten, M. J. & Veltkamp, A. C. 2007. Environmental life cycle analysis of dye sensitized solar devices; status and outlook. In *22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 3-7.
- Ecoinvent Centre. 2016. Database ecoinvent v3.3 Swiss Centre for Life Cycle Inventories. <http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-33/ecoinvent-33.html> [19 September 2017].
- Fakharuddin, A., Jose, R., Brown, T. M., Fabregat-Santiago, F. & Bisquert, J. 2014. A perspective on the production of dye-sensitized solar modules. *Energy Environ. Sci.* 7(12): 3952-3981.
- Frischknecht, R., Heath, G., Raugei, M., Sinha, P. & de Wild-Scholten, M. 2016. *Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity 3rd*

- Edition*. United States of America: U.S. Department of Energy. Office of Scientific and Technical Information (OSTI).
- Frischknecht, R., Itten, R., Sinha, P., de Wild-Scholten, M., Zhang, J., Fthenakis, V., Kim, H. C., Raugei, M. & Stuck, M. 2015a. *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems*. International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-02: 2011.
- Frischknecht, R., Wyss, F., Büsser Knöpfel, S., Lützkendorf, T. & Balouktsi, M. 2015b. Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20(7): 957-969.
- Fthenakis, V. 2009. Sustainability of photovoltaics: The case for thin-film solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(9): 2746-2750.
- Fthenakis, V., Frischknecht, R., Raugei, M., Hyung Chul, K., Alsema, E., Held, M. & de Wild-Scholten, M. 2011. *Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity*. IEA-PVPS-TASK 12.
- Fthenakis, V. & Kim, H. C. 2009. Land use and electricity generation: A life-cycle analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(6-7): 1465-1474.
- Fthenakis, V. M. & Kim, H. C. 2011. Photovoltaics: Life-cycle analyses. *Solar Energy* 85(8): 1609-1628.
- Fthenakis, V. M., Kim, H. C. & Alsema, E. 2008. Emissions from Photovoltaic Life Cycles. *Environmental Science and Technology* 42(6): 2168-2174.
- Fthenakis, V. M., Kim, H. C., Held, M., Raugei, M. & Kronen, J. 2009. Update of PV energy payback times and life cycle greenhouse gas emissions. *In the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Germany* 4412-4416.
- Gong, J., Darling, S. B. & You, F. 2015. Perovskite Photovoltaics: Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts. *Energy & Environmental Science* 8(7): 1953-1968.
- Greijer, H., Karlson, L., Lindquist, S.-E. & Hagfeldt, A. 2001. Environmental aspects of electricity generation from a nanocrystalline dye sensitized solar cell system. *Renewable Energy* 23(1): 27-39.
- Hinsch, A., Veurman, W., Brandt, H., Loayza Aguirre, R., Bialecka, K. & Flarup Jensen, K. 2012. Worldwide first fully up-scaled fabrication of 60 x 100 cm<sup>2</sup> dye solar module prototypes. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 20(6): 698-710.
- IPCC. 2013. IPCC 2013 GWP 100a, Climate Change 2013. *IPCC fourth assessment report, the physical science basis*. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.html> [5 January 2018].
- Ito, M., Kato, K., Komoto, K., Kichimi, T. & Kurokawa, K. 2008. A comparative study on cost and life cycle analysis for 100 MW very large scale PV (VLS-PV) systems in deserts using m-Si, a-Si, CdTe, and CIS modules. *Progress in Photovoltaics Research and Applications*. 16(1): 17-30.
- Ito, M., Komoto, K. & Kurokawa, K. 2010. Life-cycle analyses of very-large scale PV systems using six types of PV modules. *Current Applied Physics* 10(2): S271-S273.
- Ito, M., Kudo, M., Nagura, M. & Kurokawa, K. 2011. A comparative study on life cycle analysis of 20 different PV modules installed at the Hokuto mega-solar plant. *Progress in Photovoltaics Research and Applications*. 19(7): 878-886.
- Ito, S., Murakami, T. N., Comte, P., Liska, P., Gratzel, C., Nazeeruddin, M. K. & Gratzel, M. 2008. Fabrication of thin film dye sensitized solar cells to electric power conversion efficiency over 10%. *Thin Solid Films* 516(14): 4613-4619.
- Jasim, K. E. 2011. Dye Sensitized Solar Cells – Working Principles, Challenges and Opportunities. *Solar Cells-Dye-Sensitized Devices* 171-204.
- Kannan, R., Leong, K. C., Osman, R., Ho, H. K. & Tso, C. P. 2006. Life cycle assessment study of solar PV systems: An example of a 2.7 kWp distributed solar PV system in Singapore. *Solar Energy* 80(5): 555-563.
- Kim, H. C. & Fthenakis, V. M. 2011. Comparative life-cycle energy payback analysis of multi-junction a-SiGe and nanocrystalline/a-Si modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 19(2): 228-239.
- Kim, H., Cha, K., Fthenakis, V. M., Sinha, P. & Hur, T. 2014. Life cycle assessment of cadmium telluride photovoltaic (CdTe PV) systems. *Solar Energy* 103: 78-88.
- Kittner, N., Gheewala, S. H. & Kamens, R. M. 2013. An environmental life cycle comparison of single-crystalline and amorphous-silicon thin-film photovoltaic systems in Thailand. *Energy for Sustainable Development* 17(6): 605-614.
- Lukač, N., Seme, S., Dežan, K., Žalik, B. & Štumberger, G. 2016. Economic and environmental assessment of rooftops regarding suitability for photovoltaic systems installation based on remote sensing data. *Energy* 107: 854-865.
- Luo, W., Khoo, Y. S., Kumar, A., Low, J. S. C., Li, Y., Tan, Y. S., Wang, Y., Aberle, A. G. & Ramakrishna, S. 2018. A comparative life-cycle assessment of photovoltaic electricity generation in Singapore by multicrystalline silicon technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 174: 157-162.
- Meyer, T., Scott, M., Azam, A., Martineau, D., Oswald, F., Narbey, S., Laporte, G., Cisneros, R., Tregnano, G. & Meyer, A. 2009. All Screen Printed Dye Sensitized Solar Modules. CleanTechDay 3<sup>rd</sup> Generation Photovoltaics.
- Mohamed, N. M., Zaine, S. N. A. & Ramli, R. M. 2016. Evaluation of CO<sub>2</sub> emission from dye solar cell panel production process. *AIP Conference Proceedings* 1778(1): 020001-1-020001-6.
- National Renewable Energy Laboratory. 2017. Best Research-Cell Efficiencies. <https://www.nrel.gov/pv/national-center-for-photovoltaics.html> [23 November 2017].

- O'Regan, B. & Gratzel, M. 1991. A low-cost, high efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films. *Nature* 353(6346): 737-740.
- Pacca, S., Sivaraman, D. & Keoleian, G. A. 2007. Parameters affecting the life cycle performance of PV technologies and systems. *Energy Policy* 35(6): 3316-3326.
- Parisi, M. L., Maranghi, S. & Basosi, R. 2014. The evolution of the dye sensitized solar cells from Grätzel prototype to up-scaled solar applications: A life cycle assessment approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39: 124-138.
- Parisi, M. L., Maranghi, S., Sinicropi, A. & Basosi, R. 2013. Development of dye sensitized solar cells: A life cycle perspective for the environmental and market potential assessment of a renewable energy technology. In *Congresso Nazionale AIGE-Rende (Cosenza)*, 143-148.
- Parisi, M. L., Sinicropi, A. & Basosi, R. 2011. Life cycle assessment of gratzel-type cell production for non conventional photovoltaics from novel organic dyes. *International Journal of Heat and Technology* 29(2): 161-169.
- Parisi, M. L., Sinicropi, A. & Basosi, R. 2012. Life cycle assessment of thin film non conventional photovoltaics: The case of dye sensitized solar cells. *Proceedings of the 25th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, hlm. 8: 119-132.
- Peng, J., Lu, L. & Yang, H. 2013. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19: 255-274.
- Raugei, M., Bargigli, S. & Ulgiati, S. 2007. Life cycle assessment and energy pay-back time of advanced photovoltaic modules: CdTe and CIS compared to poly-Si. *Energy* 32(8): 1310-1318.
- Sakib, N. & Atiqur Rahman Ahad, M. 2018. An Optimized Structure for Enhancing Optical Absorption of Solar Energy in Elliptical GaAs Nanowire Array Solar Cell. *Jurnal Kejuruteraan* 30(1): 1-6.
- Sherwani, A. F., Usmani, J. A. & Varun. 2010. Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(1): 540-544.
- Stackhouse Jr., P. W. & Kusterer, J. M. 2016. NASA Surface Meteorology and Solar Energy. <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?&num=282093&lat=2.9&hgt=100&s> [17 January 2018].
- Stoppato, A. 2008. Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation. *Energy* 33(2): 224-232.
- Suruhanjaya Tenaga (Energy Commission). 2016. Malaysia Energy Statistics Handbook 2016. Malaysia.
- International Standards Organisation. 2006a. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. *ISO 14040* 2006: 1-28.
- International Standards Organisation. 2006b. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. *ISO 14044* 2006(7): 652-668.
- Toyoda, T., Sano, T., Nakajima, J., Doi, S., Fukumoto, S., Ito, A., Tohyama, T., Yoshida, M., Kanagawa, T., Motohiro, T. & Shiga, T. 2004. Outdoor performance of large scale DSC modules. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 164(1-3): 203-207.
- Wu, P., Ma, X., Ji, J. & Ma, Y. 2017. Review on life cycle assessment of energy payback of solar photovoltaic systems and a case study. *Energy Procedia* 105: 68-74.
- Zhang, J., Gao, X., Deng, Y., Li, B. & Yuan, C. 2015. Life cycle assessment of titania perovskite solar cell technology for sustainable design and manufacturing. *ChemSusChem* 8(22): 3882-3891.
- Nur Ifthitah Mustafa, \*Norasikin Ahmad Ludin, Mohd Adib Ibrahim  
Institut Penyelidikan Tenaga Suria (SERI),  
Universiti Kebangsaan Malaysia,  
43600 Bangi, Selangor, Malaysia.
- Azami Zaharim  
Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina,  
Universiti Kebangsaan Malaysia,  
43600 Bangi, Selangor, Malaysia.
- Norani Muti Mohamed  
Centre of Innovative Nanostructures & Nanodevices (COINN),  
Universiti Teknologi PETRONAS,  
32610 Bandar Seri Iskandar, Perak, Malaysia.