

Ulasan Analisis Kecekapan Tenaga dan Eksergi Pengumpul Fotovoltan-Terma (PVT)

(Review of Energy and Exergy Analysis of Photovoltaic-Thermal (PVT) Collector)

Muslizainun Mustapha*, Ahmad Fudholi, Nurul Syakirah Nazri
Solar Energy Research Institute, Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia

ABSTRACT

Photovoltaic-thermal (PVT) collectors were developed by combination of photovoltaic (PV) panel and thermal collector. The combination of technologies in one system has the potential to reduce cost of materials, required space and also improves performance of collectors. The PVT collectors will produce electrical and thermal energy simultaneously. PV technology converts solar radiation into electricity while thermal collector will be converting solar energy to thermal energy. The main components of PVT collectors are PV panel, absorber plate, heat transfer fluid and insulator. Based on previous studies, PVT collectors were developed by using air, water and nanofluid as a heat transfer medium. The function of heat transfer process is to improve PV panel efficiency by removing excessive heat from module and at the same time generating thermal energy. In addition, the parameters that affecting PVT's performances are including; mass flow rate of the fluid, area of collector, solar radiation and PV cell materials used. The overall performances of PVT collectors are depending on the electrical and thermal energy efficiencies. Therefore, the main objectives of this paper are to analyze energy and exergy efficiencies of PVT collector with different designs and types of working fluid. The performances were studied using concept of energy balance and exergy entropy analysis. Result has shown that energy and exergy efficiency are in the range of 40-75% and 5-25%, respectively.

Keywords: Efficiency; electrical energy; photovoltaic thermal (PVT); thermal energy; exergy

ABSTRAK

Pengumpul suria hibrid fotovoltan-terma (PVT) dibina dengan menggabungkan panel fotovoltan (PV) dengan pengumpul terma. Dengan kombinasi dua teknologi ini dalam satu sistem yang sama boleh mengurangkan kos bahan, menjimatkan ruang dan meningkatkan prestasi pengumpul. Pengumpul PVT dapat menghasilkan tenaga elektrik dan tenaga terma secara serentak. Teknologi PV akan menukarkan radiasi suria kepada tenaga elektrik manakala pengumpul terma akan menukarkan tenaga suria kepada tenaga terma. Komponen utama dalam membangunkan pengumpul PVT adalah panel PV, plat penyerap, bendalir pemindahan haba dan penebat. Berdasarkan kajian penyelidikan terdahulu, PVT dibina dengan menggunakan udara, air atau bendalir nano sebagai medium pemindahan haba. Fungsi proses pemindahan haba adalah untuk meningkatkan kecekapan panel PV dengan memindahkan haba berlebihan daripada modul dan dalam masa yang sama menjana tenaga terma. Tambahan, parameter-parameter yang memberi kesan kepada prestasi pengumpul PVT adalah termasuk; kadar aliran jisim bendalir, luas pengumpul, radiasi suria dan jenis bahan sel PV yang digunakan. Kecekapan keseluruhan pengumpul PVT bergantung kepada kecekapan tenaga elektrik dan tenaga terma. Justeru itu, objektif utama kertas ulasan ini adalah untuk menganalisis kecekapan tenaga dan eksergi bagi pengumpul PVT dengan reka bentuk dan jenis-jenis bendalir kerja yang berbeza. Kecekapan dinilai berdasarkan konsep keseimbangan analisis tenaga dan entropi eksergi. Dapatan hasil menunjukkan kecekapan tenaga dan tenaga eksergi dalam julat sekitar 40-75%, dan 5-25%, masing-masing.

Kata kunci: Kecekapan; tenaga elektrik; fotovoltan-terma; tenaga terma; eksergi

PENGENALAN

Pada hari ini, permintaan tenaga global semakin bertambah dengan peningkatan populasi dan perkembangan ekonomi di kebanyakan negara di dunia ini. Agensi Tenaga Antarabangsa (IEA) menganggarkan bahawa peningkatan penggunaan tenaga bagi negara membangun lebih cepat berbanding negara maju dan memerlukan penjana kapasiti tenaga hampir dua kali ganda dari jumlah tenaga semasa bagi memenuhi permintaan tenaga menjelang 2020 (Turkay & Telli 2011). Selain itu, IEA juga meramalkan bahawa jumlah penggunaan tenaga dunia akan meningkat sebanyak 44%

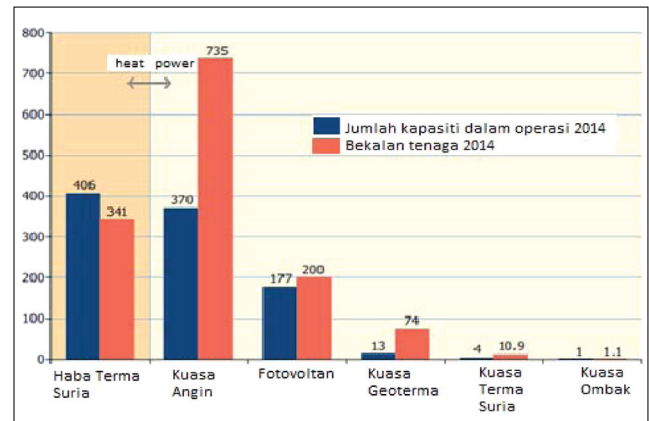
dari tahun 2006 sehingga 2030 (IEA 2009; 2012). Justeru itu, penggunaan sumber tenaga alternatif harus dipertingkatkan dalam usaha memenuhi jumlah permintaan tenaga yang semakin meningkat di samping sumber tenaga bahan api fosil yang semakin berkurangan. Penggunaan tenaga yang boleh diperbaharui merupakan satu sumber tenaga yang memberi kesan positif terhadap perkembangan ekologi yang mampan. Tenaga suria merupakan salah satu tenaga yang boleh diperbaharui serta sumber tenaga yang tidak terhad, bersih, mesra alam dan sangat berpotensi dalam memenuhi permintaan tenaga dunia (Nong et al. 2016). Pada hari ini, sistem tenaga suria yang boleh didapati dengan meluas

ialah sistem fotovoltaan (PV) dan tenaga terma suria yang merupakan antara penyumbang kepada bekalan tenaga dunia seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1 (IEA 2012).

Sistem tenaga suria boleh dibahagikan kepada dua kategori iaitu sistem PV dan sistem tenaga terma. Sistem PV menukarkan tenaga suria kepada tenaga elektrik manakala pengumpul suria terma akan menukarkan tenaga suria kepada tenaga terma. Kedua-dua sistem ini digunakan secara meluas sejak beberapa tahun dahulu dan dipasang secara berasingan untuk mendapatkan tenaga elektrik mahupun tenaga haba. Walau bagaimanapun, kajian terbaru menunjukkan gabungan kedua-dua jenis pengumpul terma dan PV di dalam satu unit pengumpul yang sama telah dibina dan dikenali sebagai sistem hibrid fotovoltaan-terma (PVT) (Atheaya et al. 2016; Fudholi et al. 2015; Shahsavari et al. 2011). Pengumpul hybrid ini menghasilkan jumlah tenaga per unit luas permukaan pengumpul yang lebih besar berbanding panel PV dan pengumpul yang dipasang secara berasingan (Charalambous et al. 2007). Di samping itu, teknologi hibrid PVT ini sangat efisien sebagai salah satu sumber tenaga diperbaharui dan teknologi ini akan lebih kompetitif dalam pasaran sekiranya kecekapan sistem ini terus dipertingkatkan di samping merendahkan kos pemasangan sistem hibrid ini (Tiwari et al. 2011; Tyagi et al. 2012). Hibrid PVT adalah antara pengumpul suria yang paling efektif kerana menghasilkan tenaga suria dan tenaga haba secara serentak (Fujisawa & Tani 1997). Menurut kajian, terdapat beberapa jenis sel PV yang sering digunakan dan sel PV akan menukarkan 5% hingga 20% tenaga suria kepada tenaga elektrik bergantung kepada jenis sel yang digunakan. Manakala, peratusan tenaga suria yang selebihnya akan ditukarkan kepada tenaga haba (Hasan & Sumathy 2010; Santbergen et al. 2010; Tripanagnostopoulos 2007). Menurut Chow et al. (2003), setiap peningkatan suhu PV akan mengurangkan kecekapan PV, iaitu setiap 10°C kenaikan suhu akan mengurangkan kecekapan panel PV sebanyak 5%.

Penyelidik terdahulu telah menjalankan kajian dengan menggunakan air dan udara sebagai medium pemindahan haba untuk menyerap haba berlebihan dari PV bagi kegunaan lain seperti pemanas udara mahupun pemanas air (Othman & Farid 2018; Zondag et al. 2003). Bendalir pemindahan haba samada udara atau air yang dialirkan melalui plat pengumpul akan membawa bersama haba yang dihasilkan, seterusnya boleh mengekalkan suhu PV pada keadaan yang sesuai untuk beroperasi pada tahap yang optimum. Manakala udara panas dan air panas yang diperoleh masing-masing boleh diaplikasikan dalam sistem pengeringan serta sistem pemanas air untuk kegunaan domestik.

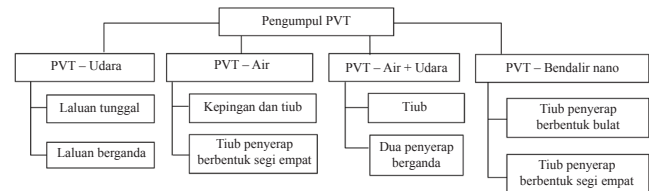
Kertas ulasan ini memberi fokus kepada perkembangan semasa teknologi PVT dengan penekanan terhadap penghasilan tenaga elektrik dan tenaga terma. Objektif utama yang dilaksanakan ialah melakukan analisis kecekapan tenaga dan eksergi bagi pengumpul PVT dengan reka bentuk yang berlainan serta parameter yang berbeza. Keputusan analisis yang telah dibuktikan oleh penyelidik terdahulu turut dibincangkan dan disenaraikan dalam bentuk jadual dan gambar rajah yang lengkap di dalam kertas ulasan ini.



RAJAH 1. Jumlah kapasiti dalam operasi dan bekalan tenaga global bagi tahun 2014 (IEA 2012)

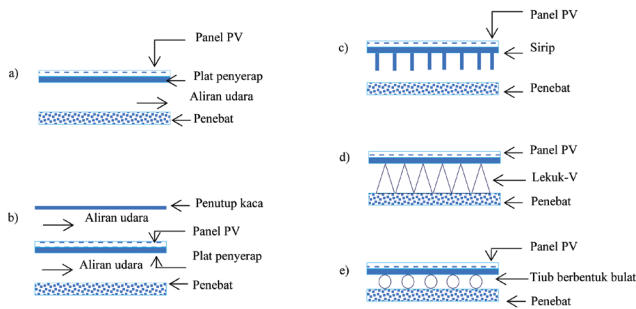
JENIS-JENIS PENGUMPUL FOTOVOLTAN-TERMA (PVT)

Pengumpul PVT boleh dikategorikan kepada beberapa jenis yang berbeza bergantung kepada bendalir pemindahan haba, pemasangan dan susunan pengumpul suria, laluan tunggal atau berganda serta jenis plat penyerap yang digunakan (Wu et al. 2011). Rajah 2 menunjukkan pengumpul PVT yang dikategorikan kepada jenis bendalir pemindahan haba yang berbeza. Menurut kajian sebelum ini (Tripanagnostopoulos et al. 2002), pengumpul PVT dengan air sebagai medium pemindahan haba memberi kecekapan yang lebih tinggi berbanding udara disebabkan kadar pemindahan haba bagi air lebih tinggi dari udara. Walau bagaimanapun, pengumpul PVT dengan aliran udara lebih popular kerana kos pemasangannya lebih rendah dan reka bentuknya agak fleksibel untuk diubah dalam usaha mendapatkan kecekapan tenaga yang optimum (Hasan & Sumathy 2010). Namun, bermula pada tahun 2010, kajian terhadap PVT dengan menggunakan bendalir nano sebagai medium pemindahan haba mula dijalankan. Bendalir nano dipilih kerana mempunyai kekonduksian terma yang tinggi dan sangat sesuai dalam meningkatkan kecekapan tenaga terma. Bendalir nano terdiri daripada zarah nano bersaiz (1-100 nm) yang dicampur ke dalam bendalir asas.



RAJAH 2. Jenis-jenis reka bentuk pengumpul PVT

Komponen utama reka bentuk pengumpul PVT terdiri daripada panel PV pada permukaan atas untuk menukarkan tenaga suria kepada tenaga elektrik, plat penyerap, serta bahan penebat berada pada permukaan bawah pengumpul. Rajah 3 menunjukkan reka bentuk pengumpul PVT dengan aliran bendalir dan plat penyerap yang berbeza. Tujuan utama plat penyerap adalah untuk menyerap haba berlebihan dari



RAJAH 3. Keratan rentas pengumpul PVT. (a) Pengumpul PVT laluan tunggal, (b) Pengumpul PVT laluan berganda, (c) Pengumpul PVT dengan penyerap bersirip, (d) Pengumpul PVT dengan penyerap lekuk-V, (e) Pengumpul PVT dengan tiub penyerap berbentuk bulat

panel dan secara tidak langsung dapat mengurangkan suhu di bawah permukaan panel. Proses ini memainkan peranan penting bagi meningkatkan kecekapan PV serta penghasilan tenaga terma yang besar (Pathak et al. 2014). Melalui kajian yang dilaksanakan, plat penyerap yang berwarna hitam mempunyai pekali kedayaserapan, α , yang tinggi iaitu 0.90 dan menjadikannya antara plat penyerap terbaik untuk digunakan. Mengikut kajian Chow et al. (2009) yang mengkaji perbezaan kecekapan tenaga pengumpul PVT dengan penutup kaca dan tanpa penutup kaca, beliau mendapati pengumpul PVT dengan penutup kaca memberi hasil yang lebih tinggi dalam penghasilan tenaga terma. Hal ini kerana dengan menggunakan penutup kaca, kehilangan haba di bahagian atas pengumpul dapat dikurangkan. Selain itu, penggunaan penebat di permukaan bawah pengumpul sangat penting untuk mengelakkan kehilangan haba ke persekitaran. Bahan penebat hendaklah mempunyai kekonduksian terma yang rendah dan tahan panas seperti gabus atau kayu.

Seterusnya, kadar aliran jisim turut berperanan dalam meningkatkan pekali pemindahan haba sekaligus perubahan kadar aliran jisim akan memberi kesan terhadap suhu panel PV dan kecekapan elektrik keseluruhannya. Cristofari et al. (2009) telah menjalankan kajian terhadap prestasi terma PVT dengan kadar aliran jisim yang rendah iaitu 0.007 kg/s. Beliau mendapati kecekapan terma yang diperolehi agak tinggi iaitu 55.5% dan kecekapan tenaga elektrik adalah sebanyak 12.7%. Kecekapan keseluruhan pengumpul PVT dengan kadar aliran jisim 0.0007 kg/s ialah 68.2%.

Di samping itu, Kim et al. (2012) telah membangunkan pengumpul PVT tanpa penutup kaca dengan aliran udara pada kadar aliran jisim 0.02 kg/s yang menghasilkan kecekapan tenaga elektrik sebanyak 14% dan kecekapan tenaga terma sekitar 66%. Fudholi et al. (2013; 2014) telah menjalankan kajian PVT berasaskan air dengan dua jenis reka bentuk penyerap yang berbeza pada kadar aliran jisim 0.011 kg/s hingga 0.041 kg/s. Kajian terhadap reka bentuk PVT dengan saluran tiub penyerap berbentuk lingkaran telah menghasilkan kecekapan tenaga elektrik dan terma yang tinggi berbanding saluran tiub secara terus iaitu masing-masing pada kadar 13.8% dan 54.6%. Manakala, Mojumder et al. (2016) telah menjalankan kajian terhadap pengumpul PVT laluan tunggal berasaskan udara dengan penyerap bersirip pada kadar aliran jisim 0.14 kg/s dan memperolehi kecekapan tenaga elektrik 13.75% serta kecekapan tenaga terma pada kadar 56.19%. Othman et al. (2016) menjalankan kajian pengumpul PVT dengan kombinasi dua aliran bendalir pemindahan haba iaitu udara dan air. Hasil kecekapan tenaga elektrik dan tenaga terma yang diperolehi bagi pengumpul yang dibina iala masing-masing 17% dan 76%. Jadual 1 menunjukkan ringkasan hasil kajian penyelidikan terdahulu dengan reka bentuk dan kadar aliran jisim bendalir yang berbeza bagi setiap pengumpul PVT yang dibina.

JADUAL 1. Hasil kajian penyelidikan terdahulu dengan reka bentuk pengumpul PVT yang berbeza

Rujukan	Jenis bendalir pemindahan haba	Reka bentuk plat penyerap	Kadar aliran jisim (kg/s)	Kecekapan (%)	
				PV	Terma
Cristofari et al. (2009)	Air	Tiub	0.007	12.7	55.5
Kim et al. (2012)	Air	Plat dan tiub	0.02	14	66
Fudholi et al. (2013; 2014)	Air	Tiub saluran berbentuk lingkaran	0.041	13.8	54.6
Mojumder et al. (2016)	Udara	Penyerap bersirip	0.14	13.75	56.19
Othman et al. (2016)	Udara dan air	Plat datar dan tiub saluran	0.02 (Udara) 0.05 (Air)	17	7
Al-Shamani et al. (2016)	Bendalir nano	Tiub saluran berbentuk segi empat	0.17	13.52	81.73

Selain itu, faktor yang perlu diambil kira bagi mendapatkan kecekapan tenaga pengumpul PVT yang tinggi adalah jenis sel PV yang digunakan seperti silikon monohablur, silikon multihablur, silikon amorfus, sel suria terpeka pewarna dan sel suria organik. Walau bagaimanapun, sel suria jenis silikon monohablur paling banyak digunakan dalam semikonduktor dengan kadar kecekapan sel PV kategori tersebut sebanyak 24.7%. Sel suria jenis multihablur pula mempunyai kadar kecekapan penukaran tenaga di antara 10% hingga 14% seperti yang dinyatakan oleh Hermann (1998).

Antara kelebihan silikon multihablur adalah mempunyai kos pembuatan yang rendah berbanding silikon monohablur di samping menghasilkan tenaga elektrik yang tinggi berbanding silikon amorfus (Zondag et al. 2003).

Namun begitu, kelebihan utama silikon amorfus adalah kedayaserapan sinaran suria yang tinggi iaitu 40 kali lebih tinggi berbanding silikon monohablur. Jadual 2 menunjukkan kecekapan sel PV yang berbeza bagi komposisi bahan yang berlainan.

JADUAL 2. Kecekapan sel suria

Jenis sel suria	Kecekapan (%)	
	Sel	Modul
Silikon monohablur	24	10-15
Silikon multihablur	18	9-12
Silikon amorfus	13	7
Sel suria terpeka pewarna	10-11	7
Sel suria organik	2-3	-

KAEDAH ANALISIS KECEKAPAN TENAGA DAN EKSERGI
PENGUMPUL PVT

ANALISIS TENAGA

Dalam kajian ulasan ini analisis kecekapan tenaga dilakukan bagi mengukur nilai prestasi pengumpul PVT berdasarkan hukum termodinamik pertama yang mematuhi prinsip keabadian tenaga. Prinsip keabadian tenaga menjelaskan bahawa tenaga tidak boleh dicipta atau dimusnahkan sebaliknya hanya bertukar dari satu bentuk kepada bentuk yang lain. Analisis tenaga yang diukur adalah kecekapan tenaga terma (η_{th}), tenaga elektrik (η_{PV}) dan kecekapan keseluruhan pengumpul (η_{PVT}). Kecekapan keseluruhan pengumpul fotovoltan-terma adalah nisbah jumlah tenaga elektrik dan tenaga terma terhadap jumlah tenaga suria yang diterima oleh permukaan pengumpul (Sopian et al. 1996).

Menurut Huang et al. (2001), kecekapan tenaga PVT boleh didapati dengan menggunakan persamaan seperti berikut:

$$\eta_{PVT} = \eta_{PV} + \eta_{th} \quad (1)$$

Kecekapan elektrik panel PV (η_{PV}) pada pengumpul PVT bergantung kepada suhu PV seperti yang dinyatakan oleh Tiwari & Sodha (2006),

$$\eta_{PV} = \eta_{ref} \left[1 - \beta_{ref} (T_{pv} - T_{ref}) \right] \quad (2)$$

Di mana, η_{ref} ialah kecekapan elektrik PV pada suhu rujukan (T_{ref}), manakala β_{ref} ialah pekali rujukan suhu. Nilai η_{ref} dan T_{ref} biasanya akan diberikan oleh pengeluar panel PV. T_{pv} ialah suhu purata panel PV pada pengumpul PVT. Selain itu, kecekapan elektrik pengumpul (η_{el}) juga boleh ditulis sebagai (Chow 2010).

$$\eta_{el} = \frac{I_m V_m}{SA_c} \quad (3)$$

Di mana, I_m dan V_m adalah arus elektrik dan voltan pada bacaan kuasa elektrik yang maksimum, S ialah keamatan sinaran dan A_c merupakan luas permukaan pengumpul.

Parameter PVT seterusnya yang perlu diketahui ialah jumlah tenaga terma yang terhasil. Kecekapan tenaga terma (η_{th}) memberi kesan yang besar terhadap prestasi keseluruhan pengumpul PVT dan η_{th} boleh dikira dengan menggunakan hubungan persamaan seperti berikut,

$$\eta_{th} = \frac{mC(T_{out} - T_{in})}{SA_c} \quad (4)$$

Beberapa parameter perlu diukur dan direkodkan sebelum menggunakan persamaan di atas, iaitu kadar aliran jisim (m), muatan haba tentu bendalir (C), suhu bendalir input (T_{in}), suhu bendalir output (T_{out}), keamatan sinaran (S) dan luas permukaan pengumpul (A_c).

ANALISIS EKSERGI

Analisis kecekapan tenaga tidak menggambarkan kualiti sebenar tenaga elektrik dan tenaga terma yang terhasil, sebaliknya analisis eksergi diperlukan bagi melengkapkan penilaian prestasi sebenar keseluruhan sistem yang dibangunkan. Konsep eksergi terhasil daripada gabungan hukum termodinamik pertama dan hukum termodinamik kedua. Prinsip keabadian tenaga (hukum termodinamik pertama) menjelaskan bahawa kuantiti tenaga tidak akan berkurang atau dimusnahkan sebaliknya tenaga hanya berubah dari satu bentuk ke bentuk tenaga yang lain. Dalam analisis eksergi, hukum termodinamik kedua sering digunakan di mana dengan jelas hukum ini menekankan bahawa tenaga bagi satu sistem atau proses, mempunyai kuantiti yang sama tetapi kualiti yang berbeza di mana kualiti tenaga berkurang sepanjang proses perubahan bentuk tenaga berlaku. Justeru itu, analisis eksergi diperlukan untuk melihat penggunaan tenaga yang optimal di samping mengetahui kehilangan tenaga yang terlibat bagi keberkesanan penggunaan tenaga di masa hadapan (Ji et al. 2006; Ucar & Inalli 2006). Maklumat yang diperolehi menerusi analisis eksergi sangat berguna dalam membangunkan sistem yang lebih efisien dan sistematik pada masa akan datang.

Eksergi merujuk kepada jumlah kerja maximum yang dihasilkan oleh satu sistem mahupun satu aliran jisim atau tenaga sehingga proses tersebut mencapai keseimbangan dengan rujukan persekitaran. Dengan mengabaikan tenaga kinetik dan tenaga keupayaan, analisis eksergi dinilai berdasarkan persamaan berikut (Dubey et al. 2009; Tiwari et al. 2009):

$$\text{atau; } \sum Ex_{in} - \sum Ex_{out} = \sum Ex_{dest} \quad (5)$$

$$\sum Ex_{in} - \sum (Ex_{PV} + \sum Ex_{th}) \quad (6)$$

di mana;

$$\sum Ex_{in} = A_c N_c S \left[1 - \left(\frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^4 \right) \right] \quad (7)$$

$$Ex_{out} = Ex_{PV} + Ex_{th} \quad (8)$$

Di mana, Ex_{in} ialah kadar eksergi masukan, Ex_{out} merupakan kadar eksergi keluaran, Ex_{dest} pemusnahan eksergi, A_c luas permukaan pengumpul, N_c bilangan pengumpul, S ialah keamatan sinaran, T_a suhu ambien dan T_s ialah suhu langit. Manakala kadar eksergi elektrik (Ex_{PV}) dan kadar eksergi terma (Ex_{th}) boleh ditulis sebagai,

$$Ex_{PV} = \eta_{PV} A_c S \quad (9)$$

$$Ex_{th} = mC(T_{out} - T_{in}) \left[1 - \frac{T_a + 273}{T_{out} + 273} \right] \quad (10)$$

Maka, kadar eksergi PVT (Ex_{PVT}) ialah;

$$Ex_{PVT} = Ex_{PV} + Ex_{th} \quad (11)$$

Secara keseluruhannya, kecekapan eksergi PVT ($\eta_{Ex_{PVT}}$) adalah nisbah kadar eksergi keluaran kepada kadar eksergi masukan dan dikira menggunakan persamaan seperti di bawah:

$$\eta_{Ex_{PVT}} = \frac{Ex_{out}}{Ex_{in}} \quad (12)$$

Seterusnya, kecekapan eksergi boleh ditingkatkan dengan meminimumkan pemusnahan eksergi (Ex_{dest}), di mana konsep "potensi penambahbaikan" (IP) boleh digunakan untuk menganalisis eksergi bagi sistem yang berbeza. Persamaan IP boleh dinilai dengan persamaan seperti berikut (Fudholi et al. 2015; Ibrahim et al. 2014):

$$IP = (1 - \eta_{Ex_{PVT}})(Ex_{in} - Ex_{out}) \quad (13)$$

HASIL DAN PERBINCANGAN

Prestasi sistem hibrid PVT bergantung kepada beberapa faktor utama seperti jenis bendalir pemindahan haba, luas permukaan pengumpul, keamatan sinaran, kadar aliran

jisim bendalir, jenis panel PV dan reka bentuk sistem itu sendiri. Faktor-faktor ini memberi kesan terhadap kecekapan keseluruhan pengumpul PVT yang dibina iaitu kecekapan tenaga elektrik dan tenaga terma yang terhasil. Penyelidik terdahulu telah melaksanakan pelbagai kajian berkaitan sistem PVT bagi mendapatkan reka bentuk dan ciri-ciri pengumpul yang terbaik untuk diaplikasikan dalam pelbagai bidang. Antaranya, kajian dijalankan dengan menggunakan bendalir pemindahan haba yang berbeza seperti udara, air dan yang paling terkini adalah bendalir nano. Kebanyakan kajian PVT memberi fokus kepada penghasilan tenaga terma dengan melakukan pelbagai perubahan terhadap parameter dalam usaha mendapatkan kecekapan terma yang terbaik. Pengumpul PVT dikehendaki beroperasi dengan julat suhu output 40°C hingga 60°C iaitu suhu yang sesuai untuk diaplikasikan dalam industri pengeringan. Jadual 3 menunjukkan kajian-kajian terdahulu telah dianalisis berdasarkan kecekapan tenaga dan eksergi. Berdasarkan keputusan analisis yang telah direkodkan, kecekapan tenaga elektrik adalah sekitar 10% hingga 25%, manakala bagi kecekapan tenaga terma ialah 40% hingga 75%. Kecekapan keseluruhan tenaga yang dihasilkan boleh ditingkatkan dengan membangunkan pengumpul PVT dengan laluan berganda kerana reka bentuk ini mempunyai sistem penyejukan yang baik untuk mengawal suhu panel PV semasa beroperasi (Sopian et al. 1996).

JADUAL 3. Hasil kajian daripada penyelidik terdahulu bagi kecekapan tenaga dan eksergi pengumpul PVT

Rujukan	Reka Bentuk Pengumpul PVT	Kecekapan Tenaga (%)			Kecekapan Eksergi (%)
		PV	Terma	Keseluruhan	
Bosanac et al. (2003)	PVT-udara	-	-	60	12
Ibrahim et al. (2010)	PVT-air dan udara	17	76	93	-
Joshi & Tiwari (2007)	PVT-udara dengan plat selari	-	-	55 – 65	12 – 15
Chow et al. (2009)	PVT tanpa kaca dan dengan penutup kaca	-	-	25 – 60	12 – 16
Dubey et al. (2009)	PVT dengan aliran udara di atas dan di bawah plat penyerap	-	-	-	10.45
Sarhaddi et al. (2010)	PVT berasaskan udara sebagai medium pemindahan haba	-	-	45	10.75
Agrawal & Tiwari (2010)	Sistem BIPVT	7.13	33.54	40.67	-
Tiwari et al. (2011)	PVT dengan plat datar	-	25 – 53	-	5 – 18
Shahsavari et al. (2012)	PVT dengan aliran udara semula jadi	8 – 10	20 – 40	28 – 40	6 – 9
Ammous et al. (2014)	PVT- udara	16	65	81	-
Sardarabadi et al. (2014)	PVT dengan bendalir nano silika 3wt%	-	-	-	23.31
Ibrahim et al. (2014)	Sistem PVT bersepadu bangunan (BIPVT) berasaskan air	-	-	55 – 62	12 – 14
Nayak & Tiwari (2015)	PVT- rumah hijau	-	-	-	4
Fiorentini et al. (2015)	PVT-udara	9	45	54	-
Ceylan & Gürel (2015)	PVT dengan aliran paksa	-	-	-	17 – 21
Qiu et al. (2015)	PVT dengan bahan perubahan fasa (PCM)	8.7	59	67.7	-
Wang et al. (2016)	Paip haba (<i>heat-pipe</i>) - PVT(HP-PVT)	7.8	61.1	68.9	-
Rounis et al. (2016)	Sistem BIPVT	16.5	48	64.5	-
Tiwari & Tiwari (2016)	PVT-rumah hijau	-	68.5	-	13.85
Al-Shamani et al. (2016)	PVT-bendalir nano	13.5	81.73	95.23	-
Atheaya et al. (2016)	PVT-air dengan penumpu parabola majmuk (CPC)	-	-	-	13-17
Khanjari et al. (2016)	PVT dengan bendalir nano sebagai agen penyejuk	-	-	-	13-15
Fudholi et al. (2013; 2014)	PVT-air dengan penyerap berbentuk lingkaran	13 – 13.8	45 – 55	58 – 68	25

Seterusnya, perbandingan antara nilai kecekapan eksergi sistem pengumpul PVT juga telah dinyatakan dalam Jadual 3, di mana kecekapan eksergi PVT adalah di antara 5% hingga 25% bagi sistem yang telah dibangunkan. Analisis kecekapan eksergi diperlukan untuk menentukan keberkesanan kerja yang dihasilkan oleh pengumpul PVT. Keputusan yang didapati daripada analisis ini sangat berguna bagi membangunkan satu sistem yang lebih efisien dan sistematik dari segi penggunaan tenaga. Menerusi analisis kajian terdahulu boleh dijelaskan bahawa bendalir pemindahan haba memberi kesan yang besar terhadap kecekapan eksergi, di mana kecekapan eksergi dapat ditingkatkan jika air atau bendalir nano digunakan sebagai agen penyejuk dalam sistem pengumpul PVT berbanding udara. Sardarabadi et al. (2014) telah menjalankan kajian perbandingan kesan bendalir nano dan air ke atas prestasi pengumpul PVT. Beliau merumuskan kecekapan eksergi keseluruhan sistem PVT dapat ditingkatkan kepada 23.31% sekiranya bendalir nano silika 3 wt.% digunakan sebagai agen pemindahan haba berbanding air yang menghasilkan kecekapan eksergi sebanyak 19.36%. Kajian menunjukkan kekonduksian terma yang tinggi bagi bendalir nano berbanding bendalir biasa walaupun hanya dicampurkan dengan zarah nano dengan jumlah kepekatan yang rendah (Assael et al. 2004). Di samping itu, bendalir nano juga mempunyai permukaan tentu zarah nano yang lebih luas untuk mempercepatkan pemindahan haba di antara bendalir-bendalir zarah dan proses pengaliran bendalir menjadi lancar disebabkan saiznya yang lebih kecil berbanding bendalir biasa.

Secara keseluruhannya, beberapa penambahbaikan bagi reka bentuk pengumpul PVT boleh dilakukan dalam usaha untuk mempertingkatkan kecekapan penghasilan tenaga elektrik dan tenaga terma. Antaranya, permukaan penyerap bersipir boleh digunakan untuk menambahkan jumlah luas permukaan yang terdedah supaya kadar pemindahan haba dari penyerap kepada bendalir dapat ditingkatkan dan proses ini berlaku dengan lebih cepat. Dalam masa yang sama, suhu PV juga dapat dikurangkan serta PV dapat beroperasi pada tahap optimum bagi menghasilkan tenaga elektrik yang tinggi. Selain itu, bendalir nano juga boleh digunakan bagi menggantikan udara dan air sebagai medium pemindahan haba. Menurut kajian yang dilakukan oleh Al-Waeli et al. (2017), pengumpul hibrid PVT yang dibina berasaskan bendalir nano silikon karbida (SiC) 3 wt.% sebagai agen penyejuk telah meningkatkan kecekapan elektrik sehingga 24.1% berbanding dengan sistem PV yang dibina secara berasingan, manakala kecekapan haba meningkat sehingga 100.19% berbanding dengan penggunaan air untuk pemindahan haba.

KESIMPULAN

Kertas ulasan ini telah membincangkan perkembangan terkini teknologi pengumpul PVT dengan berfokuskan kepada kecekapan tenaga dan eksergi yang dihasilkan oleh pengumpul PVT yang berlainan reka bentuk. Penggunaan panel

PV yang berbeza sering dilakukan oleh para penyelidik untuk meningkatkan prestasi panel PV dalam menghasilkan tenaga elektrik. Setiap jenis sel suria yang berbeza memberikan nilai kecekapan tenaga elektrik yang berlainan. Merujuk kepada Jadual 1, silikon monohablur mempunyai kecekapan sel suria yang tinggi jika dibandingkan dengan silikon multihablur atau amorfus dan sering digunakan secara meluas. Selain itu, bendalir pemindahan haba memainkan peranan penting dalam keberkesanan mendapatkan tenaga terma yang besar. Pemilihan udara atau air sebagai medium pemindahan haba bergantung kepada aplikasi sistem yang dibina itu sendiri. Kebiasannya udara dipilih untuk diaplikasikan dalam industri pengeringan manakala air digunakan untuk kegunaan sistem pemanas air domestik. Namun, sejak tahun 2010, PVT telah dibangunkan dengan menggunakan bendalir nano sebagai medium pemindahan haba untuk meningkatkan kecekapan tenaga terma disebabkan oleh bendalir tersebut mempunyai sifat kekonduksian haba yang tinggi. Berdasarkan Jadual 3, kecekapan tenaga elektrik bagi kebanyakan pengumpul PVT adalah 10% hingga 25%, manakala bagi kecekapan tenaga terma ialah 40% hingga 75%. Selain itu, analisis keseluruhan tenaga dan eksergi bagi pengumpul PVT turut dilakukan. Kedua-dua analisis ini diperlukan untuk mendapatkan reka bentuk dan parameter pengumpul PVT yang terbaik bagi menghasilkan sistem yang lebih efisien dari segi penghasilan tenaga dan juga kebaikan penggunaannya terhadap persekitaran. Secara kesimpulannya, kecekapan tenaga bagi pengumpul PVT ialah dalam julat 40%-75% manakala kecekapan eksergi ialah dengan purata 5%-25%.

PENGHARGAAN

Terima kasih diucapkan kepada Kementerian Pengajian Tinggi Malaysia (KPT) untuk pembiayaan DLP/1/2015/ST02/UKM/03/1) serta Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) di atas peruntukan (GGPM-2014-029). Terima kasih juga diucapkan kepada Institut Penyelidikan Tenaga Suria (SERI), UKM di atas kemudahan makmal penyelidikan dan bantuan teknikal.

RUJUKAN

- Agrawal, B. & Tiwari, G.N. 2010. Life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) systems. *Energy and Buildings* 42(9): 1472-1481.
- Al-Shamani, A.N., Sopian, K., Mat, S., Hasan, H. A., Abed, A.M. & Ruslan, M.H. 2016. Experimental studies of rectangular tube absorber photovoltaic thermal collector with various types of nanofluids under the tropical climate conditions. *Energy Conversion and Management* 124: 528-542.
- Al-Waeli, A.H.A., Sopian, K., Chaichan, M.T., Kazem, H.A., Abdulrasool, H. & Al-Shamani, A.N. 2017. An experimental investigation of SiC nanofluid as a base-fluid for a photovoltaic thermal PV/T system. *Energy Conversion and Management* 142: 547-558.

- Ammous, M. & Chaabene, M. 2014. Design of a PV/T based desalination plant: Concept and assessment. *5th International Renewable Energy Congress (IREC) 2014*: 1-6.
- Assael, M.J., Chen, C., Metaxa, I. & Wakeham, W.A. 2004. Thermal Conductivity of Suspensions of Carbon Nanotubes in Water. *International Journal of Thermophysics* 25(4): 971-985.
- Atheaya, D., Tiwari, A. & Tiwari, G.N. 2016. Exergy analysis of photovoltaic thermal (PVT) compound parabolic concentrator (CPC) for constant collection temperature mode. *Solar Energy* 135: 222-231.
- Bosanac, M., Sørensen, B., Katic, I., Sørensen, H., Nielsen, B. & Badran, J. 2003. Photovoltaic/Thermal Solar Collectors and Their Potential in Denmark. Final Report EFP project 1713/00-0014. www.solenergi.dk/rapporter/pvtpotentialindenmark.pdf. [14 May 2018].
- Ceylan, I. & Gürel, A.E. 2015. Exergetic analysis of a new design photovoltaic and thermal (PV/T) System. *Environmental Progress and Sustainable Energy* 34(4): 1249-1253.
- Charalambous, P.G., Maidment, G.G., Kalogirou, S.A. & Yiakoumetti, K. 2007. Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review. *Applied Thermal Engineering* 27: 275-286.
- Chow, T.T. 2010. A review on photovoltaic / thermal hybrid solar technology. *Applied Energy* 87(2): 365-379.
- Chow, T.T., Hand, J.W. & Strachan, P.A. 2003. Building-integrated photovoltaic and thermal applications in a subtropical hotel building. *Applied Thermal Engineering* 23(16): 2035-2049.
- Chow, T.T., Pei, G., Fong, K.F., Lin, Z., Chan, A.L.S. & Ji, J. 2009. Energy and exergy analysis of photovoltaic – thermal collector with and without glass cover. *Applied Energy* 86(3): 310-316.
- Cristofari, C., Notton, G. & Canaletti, J.L. 2009. Thermal behavior of a copolymer PV/Th solar system in low flow rate conditions. *Solar Energy* 83(8): 1123-1138.
- Dubey, S., Solanki, S.C. & Tiwari, A. 2009. Energy and exergy analysis of PV/T air collectors connected in series. *Energy and Buildings* 41: 863-870.
- Fiorentini, M., Cooper, P. & Ma, Z. 2015. Development and optimization of an innovative HVAC system with integrated PVT and PCM thermal storage for a net-zero energy retrofitted house. *Energy and Buildings* 94: 21-32.
- Fudholi, A., Ibrahim, A., Othman, M.Y., Hafidz, M., Kazem, H.A., Zaharim, A. & Sopian, K. 2013. Energy and Exergy Analyses on Water based Photovoltaic Thermal (PVT) Collector with Spiral Flow Absorber. *2nd International Conference on Advances in Energy, Environment and Geology, Antalya, Turkey* 70-74.
- Fudholi, A., Sopian, K., Bakhtyar, B., Gabbasa, M., Yusof, M. & Ha, M. 2015. Review of solar drying systems with air based solar collectors in Malaysia. *Renewable and Sustainable Reviews* 51: 1191-1204.
- Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M.H., Ruslan, M.H., Ibrahim, A. & Kazem, H.A. 2014. Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors. *Energy Conversion and Management* 78: 641-651.
- Fujisawa, T. & Tani, T. 1997. Annual exergy evaluation on photovoltaic-thermal hybrid collector. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 47(1-4): 135-148.
- Hasan, M.A. & Sumathy, K. 2010. Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(7): 1845-1859.
- Hermann, A.M. 1998. Polycrystalline thin-film solar cells – A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 55: 75-81.
- Huang, B.J., Lin, T.H., Hung, W.C. & Sun, F.S. 2001. Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems. *Solar Energy* 70(5): 443-448.
- Ibrahim, A., Fudholi, A., Sopian, K., Othman, M.Y. & Ruslan, M.H. 2014. Efficiencies and improvement potential of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) system. *Energy Conversion and Management* 77: 527-534.
- Ibrahim, A., Othman, M.Y., Ruslan, M.H., Mat, S., Zaharim, A. & Sopian, K. 2010. Experimental Studies on Water based Photovoltaic Thermal Collector (PVT). *Proceedings International Conference on System Science and Simulation in Engineering* 439-443.
- International Energy Agency (IEA). 2009. *International Energy Outlook 2009*. IEA.
- International Energy Agency (IEA). 2012. *World Energy Outlook 2012*. IEA.
- Ji, J., Han, J., Chow, T.T., Yi, H., Lu, J., He, W. & Sun, W. 2006. Effect of fluid flow and packing factor on energy performance of a wall-mounted hybrid photovoltaic/water-heating collector system. *Energy and Buildings* 38(12): 1380-1387.
- Joshi, A.S. & Tiwari, A. 2007. Energy and exergy efficiencies of a hybrid photovoltaic – thermal (PV/T) air collector. *Renewable Energy* 32: 2223-2241.
- Khanjari, Y., Pourfayaz, F. & Kasaeian, A.B. 2016. Numerical investigation on using of nanofluid in a water-cooled photovoltaic thermal system. *Energy Conversion and Management* 122: 263-278.
- Kim, J.H. & Kim, J.T. 2012. The experimental performance of an unglazed PVT collector with two different absorber types. *International Journal of Photoenergy* 2012: 6.
- Mojumder, J.C., Chong, W.T., Ong, H.C. & Leong, K. Y. 2016. An experimental investigation on performance analysis of air type photovoltaic thermal collector system integrated with cooling fins design. *Energy & Buildings* 130: 272-285.
- Nayak, S. & Tiwari, G.N. 2015. Energy and exergy analysis of photovoltaic/thermal integrated with a solar greenhouse. *Energy and Buildings* 40(2008): 2015-2021.
- Nong, M.M., Adam, N.M., Suraya, A.R., Yusof, J.M. & Rashid, R.A. 2016. Dish concentrator performance

- based on various materials for hot humid weather. *Jurnal Kejuruteraan* 28: 103-109.
- Othman, N.T.A. and Farid, A.N.M., 2018. Droplets tracing in a T-junction microchannel. *Jurnal Kejuruteraan* 30(1): 47-53.
- Othman, M.Y., Hamid, S.A., Tabook, M.A.S., Sopian, K., Roslan, M.H. & Ibarahim, Z. 2016. Performance analysis of PV/T Combi with water and air heating system: An experimental study. *Renewable Energy* 86: 716-722.
- Pathak, M.J.M., Sanders, P.G. & Pearce, J.M. 2014. Optimizing limited solar roof access by exergy analysis of solar thermal, photovoltaic, and hybrid photovoltaic thermal systems. *Applied Energy* 120: 115-124.
- Qiu, Z., Zhao, X., Li, P., Zhang, X., Ali, S. & Tan, J. 2015. Theoretical investigation of the energy performance of a novel MPCM (Microencapsulated Phase Change Material) slurry based PV/T module. *Energy* 87: 686-698.
- Rounis, E.D., Athienitis, A.K. & Stathopoulos, T. 2016. Multiple-inlet Building Integrated Photovoltaic/Thermal system modelling under varying wind and temperature conditions. *Solar Energy* 139: 157-170.
- Santbergen, R., Rindt, C.C.M., Zondag, H.A. & Van Zolingen, R.J.C. 2010. Detailed analysis of the energy yield of systems with covered sheet-and-tube PVT collectors. *Solar Energy* 84(5): 867-878.
- Sardarabadi, M., Passandideh-Fard, M. & Heris, Z.S. 2014. Experimental investigation of the effects of silica/water nanofluid on PV/T (photovoltaic thermal units). *Energy* 66: 264-272.
- Sarhaddi, F., Farahat, S., Ajam, H. & Behzadmehr, A. 2010. Exergetic performance assessment of a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector. *Energy & Buildings* 42(11): 2184-2199.
- Shahsavari, A., Ameri, M. & Gholampour, M. 2012. Energy and Exergy Analysis of a Photovoltaic-Thermal Collector With Natural Air Flow. *Journal of Solar Energy Engineering* 134(1): 11014.
- Shahsavari, A., Salmanzadeh, M., Ameri, M. & Talebizadeh, P. 2011. Energy saving in buildings by using the exhaust and ventilation air for cooling of photovoltaic panels. *Energy & Buildings* 43(9): 2219-2226.
- Sopian, K., Yigit, K.S., Liu, H.T., Kakaç, S. & Veziroglu, T.N. 1996. Performance analysis of photovoltaic thermal air heaters. *Energy Conversion and Management* 37(11): 1657-1670.
- Tiwari, A., Dubey, S., Sandhu, G.S., Sodha, M.S. & Anwar, S.I. 2009. Exergy analysis of integrated photovoltaic thermal solar water heater under constant flow rate and constant collection temperature modes. *Applied Energy* 86(12): 2592-2597.
- Tiwari, G.N., Mishra, R.K. & Solanki, S.C. 2011. Photovoltaic modules and their applications: A review on thermal modelling. *Applied Energy* 88(7): 2287-2304.
- Tiwari, A. & Sodha, M.S. 2006. Performance evaluation of hybrid PV/thermal water/air heating system: A parametric study. *Renewable Energy* 31(15): 2460-2474.
- Tiwari, S. & Tiwari, G.N. 2016. Exergoeconomic analysis of photovoltaic-thermal (PVT) mixed mode greenhouse solar dryer. *Energy* 114: 155-164.
- Tripagnagnostopoulos, Y. 2007. Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems. *Solar Energy* 81(9): 1117-1131.
- Tripagnagnostopoulos, Y., Nousia, T. H., Souliotis, M. & Yianoulis, P. 2002. Hybrid photovoltaic/thermal solar systems. *Solar Energy* 72(3): 217-234.
- Türkyay, B.E. & Telli, A.Y. 2011. Economic analysis of standalone and grid connected hybrid energy systems. *Renewable Energy* 36(7): 1931-1943.
- Tyagi, V.V, Kaushik, S.C. & Tyagi, S.K. 2012. Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(3): 1383-1398.
- Ucar, A. & Inalli, M. 2006. Thermal and exergy analysis of solar air collectors with passive augmentation techniques. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 33(10): 1281-1290.
- Wang, Z., Zhang, J., Wang, Z., Yang, W. & Zhao, X. 2016. Experimental investigation of the performance of the novel HP-BIPV/T system for use in residential buildings. *Energy and Buildings* 130: 295-308.
- Wu, S., Zhang, Q., Xiao, L. & Guo, F. 2011. A heat pipe photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid system and its performance evaluation. *Energy & Buildings* 43(12): 3558-3567.
- Zondag, H.A., De Vries, D.W., Van Helden, W.G. J., Van Zolingen, R.J.C. & Van Steenhoven. 2003. The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Solar Energy* 74: 253-269.

*Muslizainun Mustapha, Ahmad Fudholi,
Nurul Syakirah Nazri
Solar Energy Research Institute (SERI),
Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Malaysia.

*Corresponding author; email: muslizainun@gmail.com

Received date: 15th May 2018

Accepted date: 16th July 2018

Online First date: 1st October 2018

Published date: 30th November 2018