

Analisis Tenaga Sistem Hibrid Pengumpul Udara Fotovoltan Terma-Termoelektrik (PVT-TE)

(Energy Analysis of Hybrid Photovoltaic Thermal-Thermoelectric (PVT-TE) Air Collector System)

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

ABSTRACT

In this study, a new theoretical approach (new mathematical model) encompasses the heat transfer and energy balance is proposed to determine the performance of the photovoltaic thermal (PVT)-thermoelectric (TE) air collector (PVT-TE) hybrid system. The hybrid system consists of PV panel and TE modules that can improve the energy efficiency of the system. Theoretical and experimental studies were studied using energy analysis to predict the output temperature (T_o) and PV temperature (T_p). To evaluate system performance, a theoretical model is developed using the energy balance analysis of this hybrid system. The matrix inverse method is used to complete the theoretical model. Effect of mass flow rate and radiation intensity is also being investigated. Experimental studies were carried out at the air flow rate of 0.02 kg/s, 0.04 kg/s and 0.07 kg/s, and radiation intensities are in the range of 342-922 W/m². The results of the experimental and theoretical studies show that the percentage of errors between the theory and the experimental value of T_o and T_p are 1.14% and 1.75% respectively.

Keywords: Energy analysis; electrical; solar energy; thermoelectricthermal

ABSTRAK

Dalam kajian ini, suatu pendekatan teori baharu (model matematik baru) merangkumi pemindahan dan keseimbangan tenaga dicadangkan untuk menentukan prestasi sistem hibrid pengumpul udara fotovoltan (PV)- termoelektrik (TE) (PVT-TE). Sistem hibrid terdiri daripada panel PV dan modul TE yang boleh meningkatkan kecekapan penukaran tenaga sistem. Kajian teori dan eksperimen dikaji menggunakan analisis tenaga untuk meramal suhu keluaran (T_o) dan suhu PV (T_p). Untuk menilai prestasi sistem, satu model teori dibangunkan dengan menggunakan analisis keseimbangan tenaga bagi sistem hibrid ini. Kaedah songsangan matriks digunakan untuk menyelesaikan model teori tersebut. Kesan terhadap kadar aliran udara dan keamatan sinaran juga disiasat. Kajian eksperimen juga dilakukan pada kadar aliran udara 0.02 kg/s, 0.04 kg/s dan 0.07 kg/s, dan keamatan sinaran dalam julat 342-922 W/m². Keputusan kajian eksperimen dan teori menunjukkan bahawa peratusan ralat antara model pengiraan teori dan nilai eksperimen untuk T_o dan T_p masing-masing adalah 1.14% dan 1.75%.

Kata kunci: Analisis tenaga; elektrik; tenaga suria; termoelektrikterma

PENGENALAN

Penduduk manusia terus berkembang selaras dengan perkembangan sosioekonomi yang pesat pada masa kini yang membawa kepada peningkatan keperluan tenaga. Oleh itu, penggunaan tenaga sangat meningkat setiap tahun. Kebanyakan tenaga ini dihasilkan dari sumber tenaga lazim seperti arang batu dan gas asli. Namun, sumber tenaga ini akan menyebabkan perubahan persekitaran yang tidak terkawal justeru dapat menyumbang ke arah pemanasan sejagat (Maulud et al. 2017). Salah satu langkah bagi menangani masalah ini adalah dengan penggunaan sumber tenaga boleh diperbaharui dan tenaga hijau seperti fotovoltan (PV) terma, angin, hidro, biogas, geoterma dan biojisim dimana dapat mengatasi keterbatasan tenaga lazim. Selain itu, sumber tenaga boleh diperbaharui adalah ekonomi dan praktikal yang dapat menarik minat penyelidik untuk memberi tumpuan lebih kepada sumber-sumber tenaga

tersebut disebabkan peningkatan permintaan tenaga dan harga minyak pada hari ini.

Evolusi sumber tenaga boleh diperbaharui seperti tenaga suria adalah sumber tenaga yang memberikan kelebihan kepada alam sekitar dan bersih. Malah, tenaga ini juga adalah alternatif bagi penduduk miskin atau luar bandar yang tidak dapat menggunakan sumber tenaga moden. Tenaga terma dan elektrik boleh dihasilkan dari tenaga suria. Kedua-dua tenaga ini dihasilkan dalam bentuk yang berbeza namun ianya dapat dihasilkan secara serentak jika pengumpul hibrid digunakan. Sistem hibrid ini dihasilkan dari gabungan dua jenis pengumpul iaitu pengumpul terma dan fotovoltan di dalam satu unit pengumpul yang dinamakan sistem fotovoltan-terma (PVT). Tenaga haba juga boleh dibahagikan kepada dua medium iaitu air dan udara. Kedua-dua bendalir ini dapat menyerap haba dan digunakan sebagai medium pemindahan haba di dalam pengumpul PVT. Ini kerana suhu pada udara persekitaran dan sinaran suria yang tinggi dapat

menjejaskan kuasa output sistem PV. Jika suhu pada panel meningkat, keberkesanan kuasa output panel suria akan menurun (Benghanem et al. 2016). Dengan ini, penyejukan panel PV diperlukan bagi meningkatkan keberkesanan panel tersebut. Pada tahap yang optimum, kecekapan elektrik boleh dikawal serentak dengan penurunan suhu panel. Oleh itu, pengumpul PVT dapat menghasilkan tenaga yang mapan kerana kecekapan keseluruhannya meningkat.

Sistem penyejukan aktif dan pasif mempunyai keterbatasan mereka sendiri. Sistem penyejukan yang aktif bukan sahaja memerlukan kuasa elektrik untuk beroperasi tetapi juga membazirkan haba yang dipindahkan ke alam sekitar. Untuk mengatasi kelemahan ini, peranti termoelektrik (TE) yang berfungsi sebagai sirip dapat menyerap haba yang terbuang di mana ianya dilekatkan di belakang panel PV. Prestasi modul TE dapat dipengaruhi oleh suhu bahagian panas, bahagian sejuk dan angka merit peranti tersebut (Mohamed et al. 2016). Lamba & Kaushik (2016) telah mengkaji sistem penyejukan panel PV menggunakan TE dengan penyerapan haba oleh peranti tersebut. TE mempunyai faedah seperti saiz yang mampat, ringan dan cekap tenaga. Selain itu, sumber arus terus (DC) seperti sel bahan bakar, arus terus kereta, dan sel PV boleh digunakan sebagai sumber kuasa untuk TE (Zhao & Tan 2014). Apabila arus terus berkuasa rendah dikenakan ke atas peranti TE, haba dapat dipindahkan melalui modul dari satu sisi ke sisi yang lain. Seterusnya, satu sisi permukaan modul akan sejuk dan satu sisi yang lain akan panas. Pada sisi suhu yang sejuk, sistem penyejukan ini terjadi disebabkan oleh pembawa elektron dan bukannya bahan penyejuk sebagai pembawa haba. Kombinasi modul TE dengan sel suria ini sesuai digunakan untuk kegunaan luaran (Xi et al. 2007). Oleh yang demikian, modul TE boleh digunakan untuk pemanasan dan penyejukan dan ianya sangat sesuai digunakan untuk kawalan suhu. Tambahan pula, peranti TE boleh berfungsi sebagai pam haba untuk pemanasan kereta api semasa musim sejuk.

Seperti yang dinyatakan, air boleh dipanaskan menggunakan haba yang dihasilkan oleh panel PV dan kecekapan panel boleh ditingkatkan dengan penurunan suhu pada permukaan PV. Jumlah kecekapan panel PV dan pengumpul terma yang dipasang secara bersebelahan per unit luas permukaan adalah lebih rendah berbanding kecekapan keseluruhan pengumpul hibrid PVT. Dalam penggunaan bangunan bersepadu modul PV-TE, Van Sark (2011) mencadangkan bahan TE yang mempunyai angka merit (Z) dari 0.004K^{-1} pada 300K boleh meningkatkan kecekapan peranti tersebut sehingga 23% dan hasil tenaga tahunan akan meningkat sebanyak 11% -14.7% untuk dua sinaran. Melalui penyelidikan terdahulu, Najafi & Woodbury (2013) menyiasat penyejukan panel PV menggunakan kesan Peltier modul termoelektrik (TEC) dan membandingkannya dengan hasil teori.

Dalam kebanyakan kes, pengumpul PVT biasanya terdiri daripada plat penyerap, sel PV dan sistem penyingkiran haba dan kebiasaannya sel PV dilampirkan pada plat penyerap (Chow 2010; Kumar & Rosen 2011; Hasan & Sumathy

2010; Zhang et al. 2012; Othman et al. 2013). Reka bentuk TE ini adalah yang paling biasa untuk sistem PV-TE yang terdiri daripada modul TE dan dilengkapi dengan beberapa komponen. Antaranya ialah sel PV belakang dengan lembaran aluminium yang terletak di antaranya untuk mengalirkan haba yang terbuang di permukaan belakang sel PV. Kraemer et al. (2012) membangunkan model dan kaedah pengoptimuman untuk penjanaan TE dengan sistem suria (STEG). Walaupun sifat-sifat bahan TE dan pengumpul terma bergantung kepada suhu, namun model yang dibangunkan menunjukkan bahawa unsur-unsur TE dalam STEG boleh diselaraskan dalam saiz yang sama tanpa mempengaruhi prestasi keseluruhan peranti. Kecekapan maksimum dianggarkan 5% pada AM1.5G spektrum standard dengan kos TE di bawah RM0.20/Wp, dan kos tambahan minima dapat dicapai dengan menggabungkan STEG ke dalam pemanas air sistem suria. Cheng et al. (2011) menyatakan bahawa modul penjimatan tenaga menggunakan sistem TE yang digabungkan dengan sistem suria boleh dicapai dengan mengkaji kecekapan penyejukan modul. Prestasi penggabungan modul bergantung kepada beberapa parameter seperti kadar aliran air penyejuk, suhu sel suria dan suhu sebelah panas modul TE. Modul gabungan ini digunakan dalam kebuk dan hasilnya menunjukkan bahawa perbezaan suhu boleh dicapai sebanyak 16.2% antara suhu udara sekitar dan udara di dalam kebuk. Vian & Astrain (2009) membina model bekas yang jimat tenaga menggunakan sistem penyejuk TE untuk pengawetan makanan. Model komputasi yang dibina berdasarkan kaedah berangka beza digunakan untuk mengoptimumkan penggunaan ini. Seterusnya, kaedah ini digunakan untuk mensimulasikan kecekapan prestasi sistem peti sejuk hibrid yang lengkap. Setelah uji kaji, perbandingan antara keputusan teori dan eksperimen telah disahkan. Ralat maksimum yang dicapai ialah 1.2°C untuk nilai suhu dan 8% untuk penggunaan kuasa elektrik. Akhir sekali, reka bentuk dan prestasi prototaip dioptimumkan dan keputusan menunjukkan penggunaan kuasa yang sesuai digunakan untuk pengawetan makanan adalah 1.15 kWj sehari sekitar suhu 25°C .

Reka bentuk sistem mudah alih terbantu suria digabungkan dengan TE telah dikaji oleh Dehghan et al. (2015) menggunakan analisis hukum termodinamik pertama dan kedua. Kesemua komponen di dalam penyuling suria dikaji bagi mengenal pasti jumlah kehilangan haba pada setiap komponen. Selain itu, kadar kehilangan tenaga yang terjadi dalam setiap komponen tersebut adalah berkadar terus dengan keamatan sinaran suria. Ohara & Lee (2015) menyiasat cara untuk mengatasi kecekapan yang rendah semasa penukaran elektrik pada bahan TE. Beliau mencadangkan penggunaan analisis eksergi yang menggabungkan haba dan sistem TE bertenaga suria untuk memaksimumkan kecekapan eksergi pada sistem. Ranjan & Kaushik (2013) membentangkan konsep model termodinamik untuk penyulingan suria yang biasa digunakan. Perbezaan kecekapan tenaga dan keluaran sistem penyulingan yang lazim dan bersepadu telah dikaji, dan hasilnya menunjukkan bahawa tenaga dan kecekapan keseluruhan sistem bersepadu meningkat sehingga 62%,

iaitu 8.5% lebih tinggi daripada penyulingan suria yang lazim. Caliskan (2017) menentukan indeks kemapanan (SI) menggunakan analisis eksergi untuk pengumpul suria. Ibrahim et al. (2014) mengkaji kecekapan dan potensi penambahbaikan (IP) sistem fotovoltan bersepadu (BIPVT) yang menggunakan analisis eksergi. Hasilnya menunjukkan bahawa analisis tenaga lebih tinggi daripada analisis eksergi PVT manakala peningkatan IP adalah berkadar terus dengan peningkatan sinaran suria. Fudholi et al. (2013a; 2013b) mengkaji IP untuk pengumpul suria dua laluan dengan sirip. Mereka melaporkan bahawa IP akan meningkat secara relatif dengan peningkatan kadar aliran udara.

Melalui kajian PVT sebelumnya, kebanyakan kajian teori hanya menggunakan persamaan lazim iaitu persamaan Hottel-Whiller. Oleh itu, matlamat kajian ini adalah untuk mencadangkan pendekatan teori yang baru dengan menggunakan persamaan keseimbangan terma dalam model matematik untuk meramalkan suhu keluaran dan suhu permukaan PV. Tambahan pula, prestasi sistem hibrid ini juga dapat disahkan dengan hasil eksperimen di mana peratus ralat adalah kecil menggunakan pendekatan teori yang baru ini. Menurut pengetahuan pengarang, dapat dirumuskan bahawa kajian tentang keseimbangan terma pada sistem PVT adalah terhadap malah kajian tentang pengumpul udara hibrid PVT-TE masih belum dikaji oleh mana-mana pengkaji sebelum ini.

BAHAN DAN KAEDAH

Sistem hibrid fotovoltan terma terdiri daripada pengumpul udara dan modul TE. Sistem ini telah dipasang dan direka bentuk di Institut Penyelidikan Tenaga Suria, UKM (Malaysia). Jenis panel PV adalah sel suria silikon mono-kristal dengan keluasan 0.52 m^2 setiap satu modul. Sisa haba yang diserap oleh pengumpul udara boleh digunakan untuk membangunkan modul hibrid PV-TE dengan melekatkan peranti TE di belakang modul PV seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1.

Penambahan tenaga elektrik yang dihasilkan oleh penukar TE dapat dicapai kerana terdapat perbezaan suhu



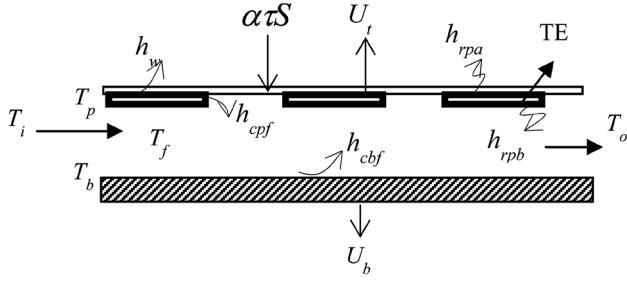
RAJAH 1. Gambar rajah peranti TE dilampirkan di belakang modul PV

antara sisi sejuk dan sisi panas modul TE. Unsur-unsur TE yang dipilih adalah jenis pendingin termoelektrik dengan model (TEC1-12706) yang disambungkan secara sesiri dengan 110-modul yang dinyatakan dalam Jadual 1. Dengan meningkatkan bilangan modul TE, kuantiti penggunaan kuasa juga akan meningkat. Oleh itu, tenaga elektrik yang tinggi akan dihasilkan dan setiap parameter akan mempengaruhinya dengan cara yang berbeza. Tambahan pula, prestasi haba dapat ditingkatkan dengan menggunakan silikon pes haba semasa melekatkan modul TE di belakang panel PV. Kajian ini dijalankan di Bandar Baru Bangi bermula dari 3 hingga 25 Ogos. Eksperimen ini dilakukan dengan menggunakan kadar aliran udara yang berbeza iaitu 0.02 kg/s , 0.04 kg/s dan 0.07 kg/s . Bagi mendapatkan keputusan, peralatan yang sesuai perlu digunakan untuk mendapatkan parameter yang diinginkan bagi menilai prestasi sistem. Pengukuran jumlah sinaran suria diukur dengan menggunakan piranometer jenis Apogee SP110. Perakam data dengan termogandingan jenis-K juga digunakan untuk mengukur suhu yang berbeza termasuk suhu di bahagian atas dan bawah PV dan juga bahagian sisi panas dan sejuk modul TE. Kemudian, multimeter jenis A Fluke 15B + digunakan untuk mengukur keluaran arus dan voltan PV, juga arus elektrik modul TE dengan menyambungkan litar secara tertutup.

JADUAL 1. Spesifikasi modul TE

Ciri-ciri	Nilai
Jenis TE	TEC1-12706
Arus elektrik, $I(\text{A})$	6
Voltan, $U(\text{V})$	15.2
Rintangan dalam, $R(\Omega)$	2.05
Pasangan, N	127
Dimensi modul (mm)	$40 \times 40 \times 4.2$
Suhu maksimum antara sisi panas dan sejuk, $\Delta T(\text{K})$	68
Maksimum kapasiti sejuk, $Q(\text{W})$	56.5





RAJAH 2. Skematik ciri pemindahan haba (HTC) dalam sistem hibrid PVT-TE

KAJIAN TEORI

Pandangan keratan rentas pengumpul udara terma ditunjukkan seperti dalam Rajah 2, di mana ianya menunjukkan pekali pemindahan haba yang berlainan. Persamaan keseimbangan tenaga pengumpul udara terma dapat diperoleh dengan mempertimbangkan anggapan berikut: (i) prestasi sistem berada dalam keadaan mantap; (ii) semua pekali pemindahan olakan haba dalam saluran dan udara yang mengalir adalah sama dan malar; (iii) dapatan haba yang berguna adalah seragam di dalam pengumpul terma, dan kehilangan ohm dalam sel suria boleh diabaikan. Persamaan keseimbangan tenaga mantap untuk pengumpul terma PVT-TE adalah seperti berikut:

untuk PV;

$$\begin{aligned} \tau\alpha S &= U_t(T_p - T_a) + h_{cpf}(T_p - T_f) + \\ &h_{rpb}(T_p - T_b) + \eta_p S + Q_n; \end{aligned} \quad (1)$$

untuk aliran alur udara;

$$\begin{aligned} \dot{m}C(T_o - T_i) &= h_{cpf}(T_p - T_f) + h_{cbf} \\ &(T_b - T_f) + Q_n; \end{aligned} \quad (2)$$

untuk plat belakang;

$$h_{rpb}(T_p - T_b) = h_{cbf}(T_b - T_f) + U_b(T_b - T_a); \quad (3)$$

di mana

$$Q_n = NA_n h_c \eta_n (T_b - T_f), \quad (4)$$

$$U_b = \frac{k_t}{l_t}, \quad (5)$$

$$U_t = \left(\frac{1}{h_w + h_{rpa}} \right)^{-1}, \quad (6)$$

$$h_{rpb} = \frac{\sigma(T_p + T_b)(T_p^2 + T_b^2)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_b} - 1 \right)}, \quad (7)$$

$$h_{rpa} = \varepsilon_p \sigma (T_p^2 + T_{sky}^2)(T_p - T_{sky}), \quad (8)$$

$$T_{sky} = 0.0522 T_a^{1.5}, \quad (9)$$

di mana ε_p , σ , T_a , T_{sky} , dan T_p adalah mewakili keterpancaran PV, pemalar Stefan-Boltzmann, ambien, langit, dan suhu PV. Pekali pemindahan olakan haba adalah seperti berikut (Fudholi et al. 2013a; 2013b; Chang et al. 2015):

$$h = \frac{k}{D_h} Nu, \quad (10)$$

di mana,

$$D_h = \frac{4W_d}{2(W + d)}, \quad (11)$$

W , d , D_h mewakili lebar, tinggi dan diameter kesetaraan saluran, κ ialah kekonduksian haba udara, dan Nu adalah nombor Nusselt. Nombor Nusselt terbahagi kepada: Untuk $Re < 2300$ (aliran lamina);

$$Nu = 5.4 + \frac{0.00190 \left[RePr \left(\frac{D_h}{L} \right) \right]^{1.71}}{1 + 0.00563 \left[RePr \left(\frac{D_h}{L} \right) \right]^{1.17}}; \quad (12)$$

pada $2300 < Re < 6000$ (aliran peralihan);

$$Nu = 0.116(Re^{2/3} - 125)Pr^{1/3} \left[1 + \left(\frac{D_h}{L} \right)^{2/3} \right] \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}; \quad (13)$$

pada $Re > 6000$ (aliran gelora);

$$Nu = 0.018Re^{0.8}Pr^{0.4}; \quad (14)$$

manakala Re dan Pr adalah nombor Reynolds dan Prandtl, mempunyai formula seperti berikut:

$$Re = \frac{mD_h}{A_{ch}\mu}, \quad (15)$$

$$Pr = \frac{\mu C}{k} \quad (16)$$

Model teori disimulasikan bagi penggunaan pengumpul pendek atau kurang dari 10 m. Kemudian, suhu udara min adalah bersamaan dengan purata aritmetik, di mana:

$$T_f = \frac{(T_i + T_o)}{2} \quad (17)$$

Ciri-ciri fizikal udara dilampirkan seperti berikut (Ong, 1995);

ketumpatan udara;

$$\rho = 1.1774 - 0.00359(T - 27); \quad (18)$$

muatan haba tentu udara;

$$C = 1.0057 + 0.000066(T - 27); \quad (19)$$

konduktiviti terma udara;

$$k = 0.02624 + 0.0000758(T - 27); \quad (20)$$

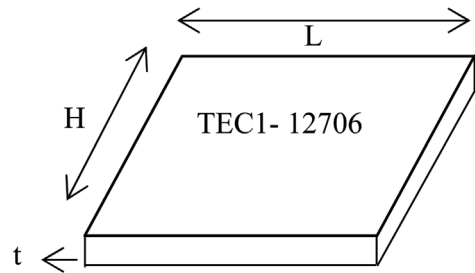
kelikatan dinamik udara;

$$\mu = [1.983 + 0.00184(T - 27)]10^{-5} \quad (21)$$

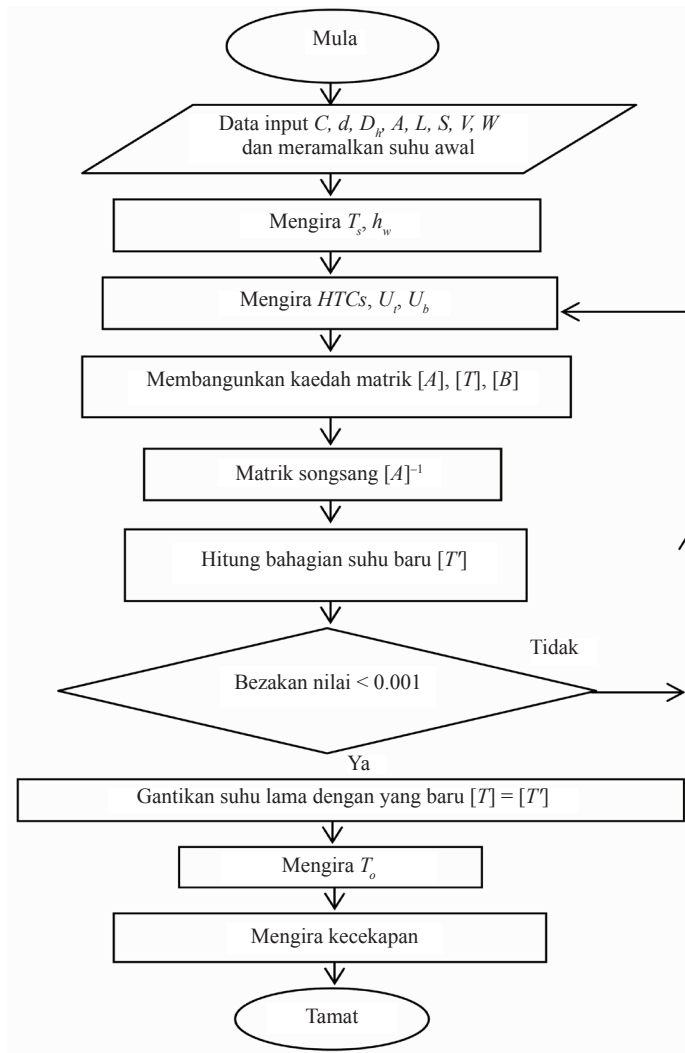
Sistem sirip juga perlu dipertimbangkan dan dimensi sirip digambarkan dalam Rajah 3. Rajah 3 menerangkan susunan sirip yang digunakan dalam model yang dikaji. Kawasan permukaan perolakan berkesan sirip ialah $\approx 2LH$ kerana ketebalan sirip t adalah agak kecil (≈ 0.003 m) berbanding dengan panjangnya (Tonui & Tripanagnostopoulos 2007).

Ilustrasi tatacara penyelesaian juga ditunjukkan dalam Rajah 4. Kaedah yang sesuai untuk mengendalikan kajian ini adalah melalui kaedah pelelaran. Kesemua parameter seperti pekali pemindahan haba plat datar pengumpul udara dengan sirip adalah fungsi suhu yang tidak dapat

diselesaikan secara langsung. Maka, kesemua parameter ini dikaji dan dianalisis melalui perisian Microsoft Excel. Pekali pemindahan haba dikira bersamaan dengan nilai suhu awal yang dianggarkan. Dalam kajian ini, nilai udara, suhu sekitaran, suhu plat belakang PV pada bahagian pertama pada mulanya diramalkan dan ditentukan kecuali pada bahagian PV, dimana ianya ditetapkan pada suhu 30°C di atas suhu sekitar. Plat belakang dan suhu udara dalam saluran masing-masing ditetapkan kepada 20°C dan 10°C di atas suhu sekitar. Parameter yang utama seperti $L = 0.963$ m, $W = 0.54$ m, $d = 0.09$ m, $\alpha = 0.9$, $\tau = 0.92$, dan $V = 1\text{ m/s}$ ditetapkan untuk menyelesaikan proses ini.



RAJAH 3. Rajah skematik yang menunjukkan dimensi TE



RAJAH 4. Carta aliran prosedur penyelesaian secara teori

Untuk kesederhanaan, persamaan (1) sehingga (3) boleh digunakan dalam bentuk matriks 3×3 .

$$[A][T] = [B] \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} X_1 + Y_1 & -h_{cpf} + Y_1 & -h_{rpb} \\ h_{cpf} + Y_1 & X_3 & h_{cpf} \\ h_{rpb} & h_{cbf} & X_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_p \\ T_f \\ T_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_2 \\ X_4 \\ X_6 \end{bmatrix} \quad (23)$$

di mana

$$X_1 = U_t + h_{cpf} + h_{rpb}, \quad (24)$$

$$Y_1 = (Q_n A_n h_{cpf} \eta_{TE}), \quad (25)$$

$$A_n = A_{TE} + (2HL), \quad (26)$$

$$X_2 = \alpha \tau S + U_t T_a - \eta_p S, \quad (27)$$

$$X_3 = (2h_{cpf} + Y_1 + 2mC), \quad (28)$$

$$X_4 = -2mCT_i, \quad (29)$$

$$X_5 = (h_{cpf} + h_{rp} + U_b), \quad (30)$$

$$X_6 = -U_b T_a, \quad (31)$$

$$\eta_n = \frac{\tanh MH}{MH}, \quad (32)$$

$$M = \left(\frac{2h_c l}{k_n A_{cn}} \right)^{1/2} \quad (33)$$

Merujuk kepada Ong (1995), vektor suhu boleh dikira dengan perisian excel menggunakan bentuk matrik songsangan

$$[T] = [A]^{-1} [B] \quad (34)$$

Matrik songsangan $[A]^{-1}$ kemudiannya dimulakan oleh subrutin matrik songsangan piawai untuk mengira suhu baru set matrik $[T^s]$. Setiap nilai suhu baru dalam matrik $[T^s]$ kemudian digantikan dengan nilai awal yang diramalkan $[T]$. Selepas perbandingan, lelaran dihentikan apabila perbezaan di antara nilai baru dan lama yang sepadan adalah kurang daripada 0.001°C . Selanjutnya, suhu lama digantikan dengan yang baru dikira dan diperolehi sebagai suhu yang diperlukan di bahagian yang dipertimbangkan untuk menyelesaikan simulasi ini. Dalam kajian ini, pengumpulan yang mencukupi untuk nilai T_p , T_f dan T_b dicapai dalam tiga hingga empat lelaran selepas suhu keluaran diselesaikan menggunakan persamaan (17).

ANALISIS TENAGA

Sinaran suria dianggap sebagai sumber tenaga utama dalam pengumpul yang mengena permukaan panel PV. Bahagian yang terkena sinaran suria akan diserap oleh lapisan PVT dan selebihnya dipindahkan ke bendalir kerja. Kecekapan terma kebanyakannya bergantung kepada haba

yang diperolehi dan suhu udara yang keluar di bawah kadar aliran udara tertentu dalam saluran pengumpul. Kecekapan terma ini umumnya dianggap sebagai kecekapan seketika dalam sistem PVT disebabkan oleh keadaan operasi seketika seperti sinaran suria, suhu sekitaran, kelajuan angin dan sebagainya. Parameter asas boleh ditakrifkan sebagai nisbah tenaga berguna yang dihantar kepada tenaga tuju pada sistem pengumpul. Hubungan ini boleh ditunjukkan sebagai (Mojumder et al. 2016; Fudholi et al. 2015);

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{AS} \quad (35)$$

dan

$$Q_u = \dot{m}C(T_o - T_i) \quad (36)$$

Penggunaan sirip yang dilekatkan di belakang pengumpul menunjukkan ianya lebih praktikal dalam reka bentuk dan memberikan hasil yang unggul sebagai medium penyerap haba. Keberkesanan keseluruhannya bergantung kepada jumlah sirip per unit panjang (ketumpatan sirip) serta keberkesanan sirip individu. Menurut Xi et al. (2007), kecekapan penukaran elektrik sistem PV-TE yang dicadangkan adalah 1-4%. Oleh itu, pengarang dapat menyatakan ianya adalah alternatif baru yang menarik untuk penjanaan kuasa terutamanya di kawasan terpencil di mana ianya dapat meningkatkan pengudaraan dalam untuk kawasan panas dan lembap. Untuk penjana termoelektrik yang dikendalikan oleh tenaga suria, persamaan yang dinyatakan adalah seperti berikut;

$$\eta_{TE} = \frac{1}{4} \frac{\alpha^2}{KR} (\Delta T) \quad (37)$$

Di sini η_{TE} adalah kecekapan sistem termoelektrik, ΔT adalah perbezaan suhu pada kedua-dua sisi termoelektrik dan α , R dan K adalah pekali Seebeck, rintangan elektrik dan keberkonduktan terma modul. Dengan ini, untuk mencapai kecekapan η_{TE} yang tinggi, ΔT harus mencapai suhu yang setinggi mungkin dan pekali Seebeck yang tinggi juga diperlukan. Namun, rintangan elektrik dan kekonduksian terma yang rendah perlu dicapai.

Sesetengah penilaian telah dikaji untuk mengira kecekapan elektrik PV dan terdapat banyak kajian yang menyatakan bahawa suhu modul PV sangat mempengaruhi prestasi tenaga. Bagi menentukan kecekapan panel fotovoltan, dapat dinyatakan seperti persamaan berikut;

$$\eta_{pv} = \eta_0 [1 - 0.0045(T_p - 25)] \quad (38)$$

Prestasi sistem PVT boleh digambarkan oleh kombinasi kecekapan (He et al. 2011). Ia terdiri daripada kecekapan terma (η_{th}) dan kecekapan elektrik (η_{pv}). Kecekapan ini biasanya termasuk nisbah perolehan terma yang berguna dan perolehan elektrik dari sistem terhadap sinaran suria yang mengenai jurang pengumpul dalam masa atau tempoh tertentu. Dalam kajian ini, modul TE juga dapat menghasilkan

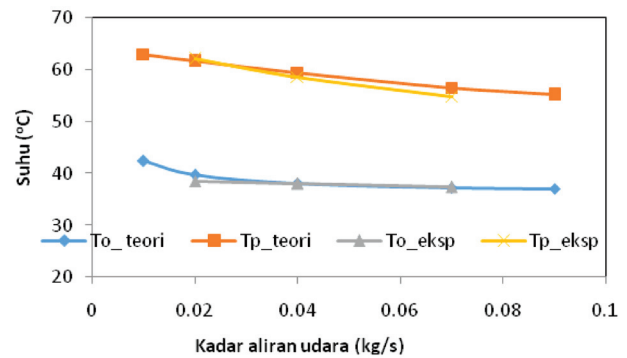
tenaga elektrik maka jumlah kecekapan yang dikenali sebagai kecekapan keseluruhan (η_T) dapat digunakan untuk menilai prestasi keseluruhan sistem yang boleh ditentukan dengan persamaan berikut;

$$\eta_T = \eta_{th} + \eta_{TE} + \eta_{pv} \quad (39)$$

HASIL DAN PERBINCANGAN

Purata sinaran suria sistem hibrid PVT-TE pada hari biasa direkod dari jam 10.30 pagi hingga 16.30 petang bagi mendapatkan radiasi yang berbeza. Berdasarkan pemerhatian, suhu udara maksimum pada suhu keluaran ialah 39°C pada kadar aliran udara 0.02 kg/s. Ini dapat dinyatakan bahawa suhu sel suria menurun dengan peningkatan kadar aliran udara justeru meningkatkan kecekapan sel. Di samping itu, pengurangan purata suhu sel suria juga disebabkan oleh pemindahan haba terma dari plat belakang sel suria ke udara menerusi modul TE. Oleh itu, hasil tenaga elektrik yang diperoleh adalah lebih tinggi pada suhu sel PV yang rendah kerana perlanggaran elektron yang rendah pada kawasan susutan sel suria. Suhu keluaran (T_o) dan suhu PV (T_p) telah dianalisis menggunakan Excel untuk model dan parameter penting. Keputusan menggunakan pelbagai kadar aliran udara

telah ditunjukkan dalam Rajah 5 di mana hasil eksperimen juga ditunjukkan dalam Rajah yang sama. Ini dapat dilihat bahawa terdapat persamaan yang hampir antara nilai teori dan eksperimen suhu keluaran dan suhu PV. Peratusan ralat mempunyai nilai 1.14% dan 1.75% untuk kedua-dua parameter tersebut. Selanjutnya, pada kadar aliran udara yang tinggi, suhu pengumpul akan lebih rendah dan mengakibatkan kehilangan haba yang lebih rendah pada suhu T_o dan T_p . Suhu perbezaan di antara nilai teori dan eksperimen juga boleh dilihat dengan jelas dalam Jadual 2.



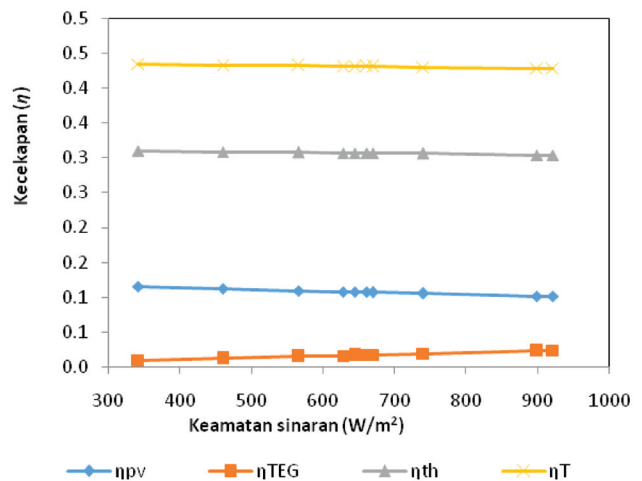
RAJAH 5. Variasi suhu keluaran (T_o) dan suhu PV (T_p) dengan kadar aliran udara yang berbeza

JADUAL 2. Peratusan ralat antara nilai teori dan eksperimen

\dot{m} (kg/s)	Suhu PV, T_p (°C)			Suhu keluaran, T_o (°C)		
	Teori	Eksperimen	Ralat (%)	Teori	Eksperimen	Ralat (%)
0.02	61.618	62.082	0.752	39.672	38.498	2.958
0.04	59.481	58.562	1.546	38.073	37.968	0.277
0.07	56.554	54.884	2.951	37.319	37.393	0.196

Penilaian reka bentuk sistem menggunakan parameter yang berbeza terhadap prestasi sistem dikaji berdasarkan analisis tenaga dan hasilnya dibincangkan. Kecekapan pengumpul udara hibrid PVT-TE telah diperoleh, dan hasilnya menunjukkan kesan yang berbeza mengikut kadar aliran udara. Penilaian suhu sistem hibrid diperoleh daripada hasil model matematik. Tambahan pula, tujuan model matematik dibangunkan adalah untuk meramalkan kecekapan keseluruhan sistem berasaskan tenaga suria PVT-TE. Rajah 6 menunjukkan hasil tenaga termasuk analisis terma, PV, dan TE serta kecekapan gabungan sistem hibrid PVT-TE.

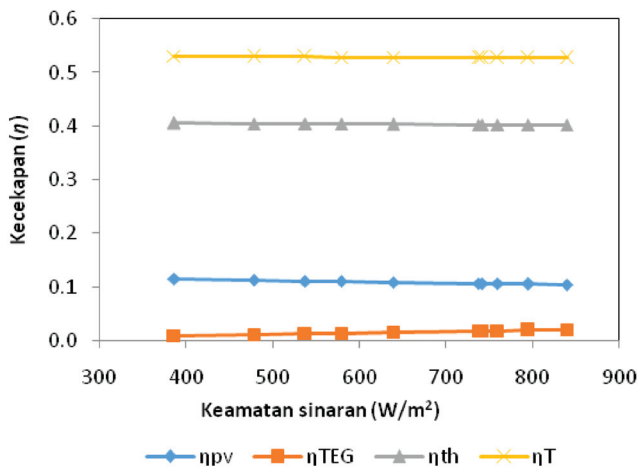
Berdasarkan Rajah 6 sehingga Rajah 8, dapat dilihat kecekapan elektrik sel fotovoltaik akan menurun pada kadar yang sedikit berikutan sinaran suria yang meningkat. Oleh kerana suhu udara meningkat maka pemindahan haba dari modul PV berkurang. Oleh itu, kecekapan juga berkurang. Tambahan pula, kejadian ini berlaku apabila kehilangan tenaga elektrik meningkat pada suhu yang lebih tinggi kerana berlakunya perlanggaran elektron pada kawasan susutan sel suria.



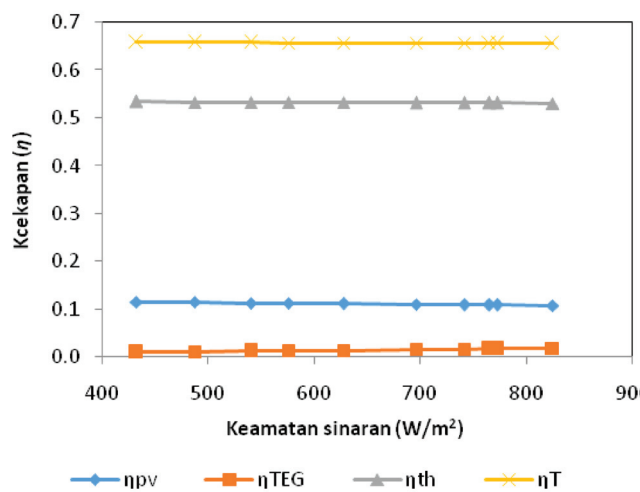
RAJAH 6. Variasi kecekapan terhadap kadar aliran udara ($\dot{m} = 0.02$ kg/s) di bawah keamatan sinaran yang berbeza

Berdasarkan analisis terhadap sistem hibrid PVT-TE, kecekapan sistem PV dapat ditingkatkan dengan melekatkan peranti TE pada bahagian belakang modul PV. Kesannya adalah untuk mengurangkan suhu sel PV, seterusnya meningkatkan kecekapan dan kapasiti kuasa sistem PV. Selain itu, hasil keputusan model menunjukkan kepentingan menggunakan sistem PVT berbanding sistem sendiri PV. Ini kerana sistem PVT dapat meningkatkan kecekapan modul PV dan pada yang sama dapat menjana tenaga terma.

Pengaruh aliran udara memberi kesan terhadap kecekapan sistem kerana aliran udara yang melalui salur dalam pengumpul memberi kesan penyejukan kepada sel fotovolta. Pekali pemindahan haba konveksi sensitif terhadap variasi kadar alir jisim. Semakin tinggi perolakan pekali pemindahan haba, semakin tinggi kadar pemindahan haba. Ini dapat menghasilkan kecekapan haba dan elektrik yang lebih tinggi.

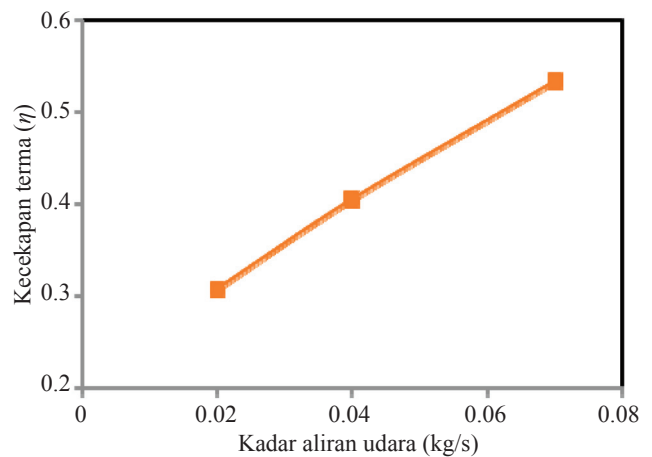


RAJAH 7. Variasi kecekapan terhadap kadar aliran udara ($\dot{m} = 0.04 \text{ kg/s}$) di bawah keamatan sinaran yang berbeza



RAJAH 8. Variasi kecekapan terhadap kadar aliran udara ($\dot{m} = 0.07 \text{ kg/s}$) di bawah keamatan sinaran yang berbeza

Berdasarkan Rajah 6 hingga 8, dapat dilihat bahawa analisis kecekapan pada kadar aliran udara yang berbeza memberi perubahan terhadap kecekapan terma di mana peningkatan sebanyak 0.31 kepada 0.53 pada aliran udara 0.02 kg/s hingga 0.07 kg/s seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 9. Pada kadar aliran jisim yang tinggi, lebih banyak haba dapat diserap keluar dan menyebabkan penurunan haba terhadap plat penyerap. Walau bagaimanapun, jika tempoh aliran dalam saluran terlalu pendek disebabkan oleh peningkatan halaju, suhu plat penyerap mungkin tidak dapat dikurangkan secara linear seperti yang dijangkakan. Ini dapat dinyatakan bahawa dengan menentukan kadar aliran udara yang terbaik, kecekapan elektrik dan terma sistem PVT yang optimum dapat dihasilkan. Perubahan kecekapan terma ini adalah sejajar dengan peningkatan kadar aliran udara. Selain kecekapan terma, kecekapan PV, TE dan kecekapan tergabung pengumpul dapat dilihat lebih jelas dalam Jadual 3 hingga 5.



RAJAH 9. Kecekapan terma terhadap kadar aliran udara pada $S = 640 \text{ W/m}^2$

Pada kebiasaannya, kecekapan sel PV akan berkurang apabila suhu sel PV meningkat. Prestasi modul TE dapat ditingkatkan apabila haba yang terkumpul di permukaan sel PV diserap oleh TE dan meningkatkan perbezaan suhu antara sisi modul TE. Oleh itu, kecekapan sistem hibrid dapat ditingkatkan kerana peningkatan kecekapan modul TE adalah lebih besar berbanding pengurangan kecekapan sel PV.

JADUAL 3. Variasi kecekapan pada aliran udara $\dot{m} = 0.02 \text{ kg/s}$

PYRO	η _{pv}	η _{TE}	η _t	η _T
342	0.115	0.009	0.310	0.434
461	0.112	0.012	0.309	0.433
567	0.109	0.015	0.308	0.432
628	0.108	0.016	0.307	0.431
645	0.108	0.017	0.307	0.431
662	0.107	0.017	0.307	0.431
670	0.107	0.017	0.307	0.431
741	0.105	0.019	0.306	0.430
900	0.101	0.023	0.304	0.428
922	0.101	0.023	0.304	0.428

JADUAL 4. Variasi kecekapan pada aliran udara $\dot{m} = 0.04 \text{ kg/s}$

PYRO	η_{pv}	η_{TE}	η_t	η_T
387	0.115	0.010	0.406	0.530
479	0.113	0.012	0.405	0.529
538	0.111	0.013	0.405	0.529
579	0.110	0.014	0.404	0.529
640	0.109	0.016	0.404	0.528
737	0.107	0.018	0.403	0.528
742	0.107	0.018	0.403	0.528
760	0.106	0.018	0.403	0.527
795	0.106	0.019	0.403	0.527
839	0.105	0.020	0.402	0.527

JADUAL 5. Variasi kecekapan pada aliran udara $\dot{m} = 0.07 \text{ kg/s}$

PYRO	η_{pv}	η_{TEG}	η_t	η_T
433	0.115	0.009	0.534	0.658
487	0.114	0.011	0.534	0.658
540	0.113	0.012	0.533	0.658
576	0.112	0.012	0.533	0.658
628	0.111	0.014	0.533	0.657
696	0.110	0.015	0.532	0.657
742	0.109	0.016	0.532	0.656
765	0.108	0.016	0.532	0.656
772	0.108	0.016	0.531	0.656
825	0.107	0.018	0.531	0.656

Berdasarkan keputusan di atas, kecekapan elektrik modul TE adalah lebih tinggi pada kadar aliran udara yang lebih rendah kerana masa yang diperlukan untuk perpindahan haba dari modul TE ke udara adalah lebih lama. Namun, purata kecekapan elektrik modul TE dalam kajian ini adalah rendah bermula dari 0.014-0.017. Ini kerana jenis modul yang dipilih dalam kajian ini mempunyai angka merit iaitu prestasi yang lebih rendah berbanding jenis modul yang lebih komersial. Seterusnya, kecekapan keseluruhan sistem dapat dikaji dengan menghitung jumlah kecekapan terma dan kecekapan elektrik pengumpul. Berdasarkan keputusan di atas, hubung kait antara kadar aliran udara berkadar terus dengan penambahan kecekapan terma pengumpul. Oleh itu, kecekapan terma pengumpul meningkat apabila kadar aliran udara bertambah.

KESIMPULAN

Sistem hibrid pengumpul udara PVT-TE yang inovatif telah dibina menggunakan pendekatan pekali pemindahan haba. Analisis tenaga juga dikaji secara teori dengan membina model matematik untuk sistem hibrid pengumpul udara PVT-TE. Kesan pelbagai kadar aliran udara ke atas persamaan keseimbangan tenaga telah dibentangkan. Dengan ini dapat disimpulkan bahawa suhu adalah faktor utama di antara parameter ini yang mempengaruhi kecekapan penukaran sistem hibrid tersebut. Kajian menunjukkan bahawa nilai eksperimen dan teori telah disahkan dengan kejituan 98.6%.

Di samping itu, parameter yang dikaji juga penting untuk memilih nilai yang sesuai bagi pekali pemindahan haba konveksi dan nisbah tumpuan untuk mengekalkan perbezaan suhu yang lebih besar terhadap modul TE.

PENGHARGAAN

Terima kasih diucapkan kepada Kementerian Pengajian Tinggi di Malaysia untuk pembiayaan (DLP/1/2015/ST02/UKM/03/1) dan UKM untuk pembiayaan (GGPM-2014-029). Selain itu, tidak lupa juga penghargaan kepada Institut Penyelidikan Tenaga Suria dan UKM dan makmal Tenaga Suria FST yang menyediakan kemudahan makmal dan sokongan teknikal.

RUJUKAN

- Benghanem, M., Mashraqi, A.A. Al- & Daffallah, K.O. 2016. Performance of solar cells using thermoelectric module in hot sites. *Renewable Energy* 89: 51-59.
- Caliskan, H. 2017. Energy, exergy, environmental, enviroeconomic, exergoenvironmental (EXEN) and exergoenvironmental (EXENEC) analyses of solar collectors, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69: 488-492.
- Chang, W., Wang, Y., Li, M., Luo, X., Ruan, Y., Hong, Y. & Zhang, S. 2015. The Theoretical and Experimental Research on Thermal Performance of Solar Air Collector with Finned Absorber. *Energy Procedia* 70: 13-22.
- Cheng, T.C., Cheng, C.H., Huang, Z. & Liao, G.-C. 2011. Development of an energy-saving module via combination of solar cells and thermoelectric coolers for green building applications. *Energy* 36: 133-140.
- Chow, T.T. 2010. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied Energy* 87: 365-379.
- Dehghan, A. A., Afshari, A. & Rahbar, N. 2015. Thermal modeling and exergetic analysis of a thermoelectric assisted solar still. *Solar Energy* 115: 277-288.
- Fudholi, A., Sopian, K., Alghoul, M.A., Ruslan, M.H. & Othman, M.Y. 2015. Performances and improvement potential of solar drying system for palm oil fronds. *Renewable Energy* 78: 561-565.
- Fudholi, A., Sopian, K., Othman, M.Y., Ruslan, M.H. & Bakhtyar, B. 2013a. Energy analysis and improvement potential of finned double-pass solar collector. *Energy Conversion and Management* 75: 234-240.
- Fudholi, A., Sopian, K., Othman, M.Y., Ruslan, M.H. & Bakhtyar, B. 2013b. Performance and cost benefits analysis of double-pass solar collector with and without fins. *Energy Conversion and Management* 76: 8-19.
- Hasan, M.A. & Sumathy, K. 2010. Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 14: 1845-1859.
- He, W. & Zhang, Y., Ji, J. 2011. Comparative experiment study on photovoltaic and thermal solar system

- under natural circulation of water. *Applied Thermal Engineering* 31: 3369-76.
- 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.
- Kraemer, D., McEnaney, K., Chiesa, M. & Chen, G. 2012. Modeling and optimization of solar thermoelectric generators for terrestrial applications. *Solar Energy* 86: 1338-1350.
- Kumar, R. & Rosen, M.A. 2011. A critical review of photovoltaic thermal solar collectors for air heating. *Applied Energy* 88: 3603-3614.
- Lamba, R. & Kaushik, S.C. 2016. Modeling and performance analysis of a concentrated photovoltaic– thermoelectric hybrid power generation system. *Energy Conversion and Management* 115: 288-298.
- Maulud, K.N.A., Karim, O.A. & Peik, A.L.S. Kajian potensi tenaga marin di perairan Selangor dan Perak. *Jurnal Kejuruteraan* 2017: 15-23
- Mojumder, J. C., Ong, H.C., Chong, W.T., Shamshirband, S. & Mamoon, A.-Al. 2016. Application of support vector machine for prediction of electrical and thermal performance in PV/T system. *Energy and Buildings* 111: 267-277.
- Mohamed, R., Yusop, A. M., Mohamed, A. & Nordin, N. I. 2016. Behavioral analysis of thermoelectric module under different configurations and temperature gradient. *Jurnal Kejuruteraan* 28: 19-27.
- Najafi, H. & Woodbury, K.A. 2013. Optimization of a cooling system based on Peltier effect for photovoltaic cells. *Solar Energy* 91: 152-160.
- Ohara, B.Y. & Lee, H. 2015. Exergetic analysis of a solar thermoelectric generator. *Energy* 91: 84-90.
- Ong, K.S. 1995. Thermal performance of solar air heaters: Mathematical model and solution procedure. *Solar Energy* 55: 93-109.
- Othman, M.Y., Ibrahim, A., Jin, G. L., Ruslan, M.H. & Sopian, K. 2013. Photovoltaic-thermal (PV/T) technology-the future energy technology. *Renewable Energy* 49: 171-174.
- Ranjan, K.R. & Kaushik, S.C. 2013. Energy, exergy and thermo-economic analysis of solar distillation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 27: 709-723.
- Tonui, J.K. & Tripanagnostopoulos, Y. 2007. Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements. *Solar Energy* 81: 498-511.
- Van Sark, W.G.J.H.M. 2011. Feasibility of photovoltaic– Thermoelectric hybrid modules. *Applied Energy* 88: 2785-2790.
- Vián, J.G. & Astrain, D. 2009. Development of a hybrid refrigerator combining thermoelectric and vapor compression technologies. *Applied Thermal Engineering* 29: 3319-3327.
- Xi, H., Luo, L. & Fraisse, G. 2007. Development and applications of solar-based thermoelectric technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11: 923-936.
- Zhang, X., Zhao, X., Smith, S., Xu, J. & Yu, X. 2012. Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 16: 599-617.
- Zhao, D. & Tan, G. 2014. A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications. *Applied Thermal Engineering* 66: 15-24.

*Nurul Syakirah Nazri, Ahmad Fudholi, Muslizainun Mustapha
Solar Energy Research Institute (SERI),
Universiti Kebangsaan Malaysia,
43600 Bangi, Selangor, Malaysia.

*Corresponding author, email:
nurulsyakirahnazri@gmail.com

Received date: 5th May 2018
Accepted date: 9th July 2018
Online first date: 1st October 2018
Published date: 30th November 2018