

Peningkatan Kecekapan Elektrik Sistem Suria Hibrid Fotovoltan Terma- Termoelektrik (PVT-TE) oleh Kesan Termoelektrik (Electrical Efficiency Enhancement of Thermal-Thermoelectric Photovoltaic Hybrid Solar System (PVT-TE) by Thermoelectric Effect)

NURUL SYAKIRAH NAZRI¹, AHMAD FUDHOLI^{1,2}, MASITA MOHAMMAD^{1,*}, CUK SUPRIYADI ALI NANDAR², HENNY
SUDIBYO², HAZNAN ABIMANYU², KAMARUZZAMAN SOPIAN¹ & MOHD ADIB IBRAHIM¹

¹*Solar Energy Research Institute, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan,
Malaysia*

²*Research Center for Energy Conversion and Conservation, National Research and Innovation Agency (BRIN),
Indonesia*

Diserahkan: 17 Jun 2022/Diterima: 15 Ogos 2022

ABSTRAK

Sistem fotovoltan terma (PVT) menggunakan fotovoltan dan pengumpul haba suria untuk mendapatkan haba dan elektrik. Memandangkan kedua-dua haba dan elektrik boleh dijana dan digunakan secara serentak, sistem PVT mempunyai keluaran tenaga yang lebih besar bagi setiap unit luas daripada modul PV atau pengumpul haba suria sendiri. Pengumpul PVT berasaskan udara menggunakan udara sebagai medium pemindahan haba dan corak aliran memberi kesan kepada prestasi pengumpul. Uji kaji telah dijalankan untuk menilai prestasi haba dan elektrik bagi pengumpul PVT berasaskan udara. Gabungan antara penjana termoelektrik (TE) dengan sistem PVT ialah cara yang inovatif untuk meningkatkan lagi penukaran tenaga suria dan meningkatkan kuasa elektrik. Selain mengurangkan suhu permukaan sel PV, kecerunan terma yang disebabkan oleh haba yang dijana dalam modul PV boleh menjana elektrik kerana kesan Seebeck oleh modul TE. Di samping itu, gabungan kedua-dua sistem mempunyai potensi untuk meningkatkan prestasi disebabkan oleh kesan tambahan kedua-dua sistem. Penjana termoelektrik dapat menggunakan sisa haba sistem suria untuk mencipta tenaga tambahan seterusnya meningkatkan jumlah keluaran kuasa dan kecekapan sistem hibrid PVT-TE. Kesan kadar alir jisim dan keamatan sinaran juga diselidik. Kajian dilakukan pada kadar alir jisim udara 0.009 kg/s, 0.021 kg/s, 0.039 kg/s, 0.069 kg/s dan 0.095 kg/s dan keamatan cahaya antara 455.64 W/m² hingga 795.18 W/m². Nilai ini digunakan dalam menghitung kecekapan terma dan elektrik bagi sistem PVT yang dicadangkan. Kuasa keluaran keseluruhan sistem PVT dibandingkan antara keadaan 'dengan TE' dan 'tanpa TE'. Secara keseluruhannya, pertambahan kuasa keluaran bagi sistem PVT-TE adalah lebih tinggi berbanding sistem PVT sebanyak 32.59% hingga 55.93%.

Kata kunci: Fotovoltan terma; kecekapan elektrik; pengumpul suria; termoelektrik

ABSTRACT

A photovoltaic thermal (PVT) system uses a photovoltaic and a solar thermal collector to create heat and electricity. Since both heat and electricity may be generated and consumed concurrently, PVT systems have a greater energy output per unit area than PV modules or solar thermal collectors. Air-based PVT collectors employ air as a heat transfer medium and flow patterns impact collector performance. Experiments were used to evaluate the thermal and electrical performance of an air-based PVT collector. In addition to lowering the surface temperature of PV cells, the thermoelectric Seebeck effect enables the thermal gradient induced by the heat generated in the PV module to generate electricity. Combining thermoelectric generators (TE) with PVT systems is an innovative way to further enhance solar energy conversion and increase electric power. In addition, the combination of both systems has the potential to improve performance owing to the compensatory effects of both systems. The thermoelectric generator may utilise the solar system's waste heat to create extra energy, therefore enhancing the hybrid system's total power output

and efficiency of the PVT-TE system. The effect of mass flow rate and radiation intensity is also being investigated. Experimental studies were carried out at airflow rate of 0.009 kg/s, 0.021 kg/s, 0.039 kg/s, 0.069 kg/s and 0.095 kg/s and radiation intensities in the range of 455.64 W/m² to 795.18 W/m². These readings were used in calculating the thermal and electrical efficiency of the proposed PVT system. The output PVT power was compared between 'with TE' and 'without TE' conditions. Overall, the output power of the PVT-TE system is also higher than the PVT system in the range of 32.59% to 55.93%.

Keyword: Electrical efficiency; photovoltaic thermal; solar collector; thermoelectric

PENGENALAN

Permasalahan alam sekitar seperti pemanasan global dan pencemaran udara adalah disebabkan oleh penggunaan sumber tenaga konvensional seperti bahan api fosil. Oleh itu, sumber tenaga bersih dan boleh diperbaharui semakin menarik perhatian penyelidik pada masa kini (Jia, Alva & Fang 2019). Tenaga suria yang mapan adalah salah satu penyelesaian tenaga boleh diperbaharui yang paling sesuai menggantikan penggunaan bahan api fosil dan mengurangkan isu alam sekitar (Choudhary & Srivastava 2019). Fotovoltan (PV) ialah salah satu teknologi penukaran tenaga suria yang paling sesuai untuk menukarkan cahaya matahari terus kepada elektrik dengan hanya menggunakan sedikit keperluan bagi penyelenggaraan dan dapat beroperasi dalam keadaan senyap (Sharma, Dwivedi & Pandit 2014). Walau bagaimanapun, kelemahan utama PV ialah kecekapan penukaran yang rendah (Bhubaneswari & Goicranco 2011). Ini menyebabkan peratusan besar tenaga suria yang diserap oleh fotovoltan ditukar kepada haba yang meningkatkan suhu PV dan dengan itu, membawa kepada penurunan dalam kecekapan kerana pekali suhu prestasi menurun (Dimri, Tiwari & Tiwari 2017). Penerimaan yang lebih luas terhadap teknologi fotovoltan pada skala global bergantung kepada peningkatan ketara dalam kecekapan penukaran PV. Oleh yang demikian, penyelidikan mengenai pengurusan yang berkesan terhadap sisa haba daripada PV sedang dijalankan dan diselidiki.

Jika dilihat dari sudut pandangan kecekapan tenaga, penggunaan dua sistem suria pengumpul secara serentak adalah disyorkan dalam sistem tenaga suria fotovoltan terma (PVT). PVT merujuk kepada sistem pengumpul haba suria dan panel PV yang digunakan bersama-sama. Sistem gabungan PVT dianggap sebagai ciptaan menarik dalam teknologi suria. Haba yang dikeluarkan digunakan dalam sistem terma secara berasingan. Sistem fotovoltan terma dengan pengumpul udara atau air bukan sahaja menghasilkan tenaga elektrik, tetapi juga

menyediakan haba untuk pemanasan ruang dan aplikasi lain. Kecekapan sel boleh diperbaiki dengan mengekalkan atau mengurangkan suhu operasi. Seterusnya, aliran udara di bawah modul TE dapat mengurangkan suhu di bawah modul TE dan membantu dalam mengekalkan perbezaan suhu yang lebih tinggi di seluruh modul TE. Jumlah tenaga elektrik yang dijana oleh modul TE pula bergantung pada perbezaan suhu antara sisi sejuk dan panas yang lebih tinggi bagi menghasilkan keluaran tenaga elektrik yang lebih tinggi. Selain itu, pengaliran udara dalam saluran pengumpul juga dapat membantu menurunkan suhu PV justeru meningkatkan keluaran elektrik dari PV. Oleh itu, saluran udara di bawah modul TE menyumbang kepada peningkatan keluaran tenaga elektrik daripada kedua-dua modul TE dan juga modul PV. Dalam kajian ini, pengumpul suria yang dibina adalah bertujuan untuk meningkatkan kecekapan prestasi sistem hibrid dengan menggunakan modul TE. Modul ini mempunyai keupayaan secara langsung menukarkan tenaga haba kepada tenaga elektrik jika terdapat perbezaan suhu pada kedua-dua sisi panas dan sejuk modul tersebut. Apabila kecerunan suhu (ΔT) dikenakan pada termogandingan termoelektrik yang terdiri daripada bahan semikonduktor jenis-n dan jenis-p, pembawa cas mudah alih yang terletak pada sisi panas (PVT) meresap ke sisi sejuk (bendalir kerja). Oleh itu, potensi elektrostatis (ΔV) dapat dihasilkan. Proses ini dikenali sebagai kesan Seebeck yang ditemui pada tahun 1821 oleh Thomas Seebeck. Tambahan pula, ia boleh digunakan untuk penyejukan dengan penggunaan elektrik (Zheng 2008). Selain daripada saiznya yang kecil, kelebihan utama modul TE sebagai penyejuk ialah dapat mengurangkan suhu pada permukaan PV (Hussain et al. 2013). Oleh itu, kecekapan keseluruhan sistem PVT-TE dapat ditingkatkan dengan pengurangan suhu pada panel PV. Justeru, gabungan fotovoltan dan pengumpul suria laluan tunggal berasaskan udara dipilih dan diuji dengan menggunakan pelbagai parameter yang dapat meningkatkan kecekapan prestasi keseluruhan sistem.

Banyak penyelidikan telah dilakukan bagi mengkaji pengeluaran tenaga sistem PV-TE ini. Antaranya ialah para penyelidik melekatkan modul TE di bahagian belakang modul PV untuk pengeluaran tenaga dan prestasi sistem hibrid ini dikaji secara teori dan uji kaji. van Sark (2011) mengkaji sistem PV-TE dengan melampirkan TE ke modul PV untuk menukar sisa tenaga haba menjadi tenaga elektrik. Deng et al. (2013) mengkaji reka bentuk bersepadu sistem penjanaan hibrid berasaskan suria dan sistem ini terdiri daripada sel suria saput tipis, penjana termoelektrik dan pengumpul haba. Pengumpul haba mengumpulkan sisa haba dan sebahagian tenaga suria, kemudian sisa haba ini dipindahkan ke TE untuk penukaran tenaga. Oleh itu, reka bentuk sistem sangat penting bagi mendapatkan keluaran tenaga yang maksimum. Antaranya ialah meletakkan pengumpul haba yang mempunyai lapisan penyerap yang dioptimumkan, lapisan pengalir dan lapisan penebat antara sel suria dan TE. Fungsi lapisan penyerap adalah untuk mengumpulkan tenaga sinaran suria dan tenaga pantulan manakala lapisan penebat mencegah kehilangan haba dan lapisan pengalir memungkinkan pengaliran haba yang berkesan.

Dalam kajian ini, gabungan modul PV dan modul TE bagi menghasilkan pengumpul hibrid PVT-TE dapat meningkatkan kecekapan pengumpul PVT. Namun demikian, dengan menggunakan bahan TE yang sedia ada, penjanaan elektrik oleh TE adalah kecil berbanding dengan keluaran elektrik oleh panel PV dan TE hanya memainkan peranan yang sedikit pada penjanaan kuasa dalam sistem hibrid PVT-TE. Namun, sumbangan TE dalam penjanaan kuasa dapat diperbaiki melalui bahan TE yang mempunyai angka merit (ZT) yang lebih tinggi dan pengoptimuman geometri pada modul TE. Perkembangan teknologi yang pesat boleh menghasilkan bahan TE yang berstruktur nano dengan ZT yang tinggi justeru dapat mewakili generasi sistem PVT-TE yang akan datang. Dengan ini, sistem hibrid PVT-TE boleh meningkatkan kecekapan keseluruhan sistem dalam bekalan tenaga akan datang dengan hasil yang memberangsangkan.

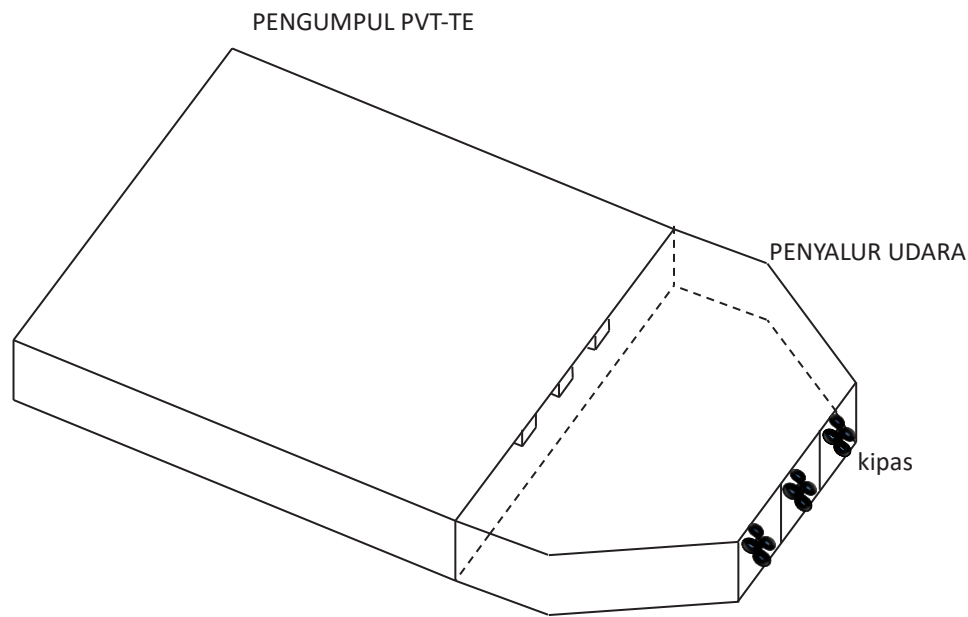
BAHAN DAN TATACARA UJI KAJI

Pengumpul fotovoltan terma aliran udara diuji di Makmal Tenaga Suria (SERI), Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM). Pengukuran yang tepat dapat diperolehi dengan melakukan ujian tertutup di makmal kerana simulator suria boleh dikawal. Terdapat dua modul fotovoltan yang digunakan dalam kajian ini. Ia terdiri daripada modul

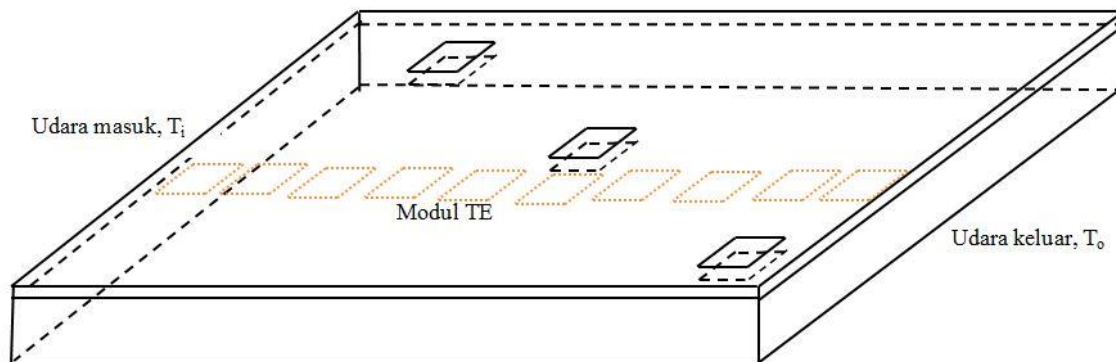
fotovoltan yang dilekatkan dengan modul termoelektrik (TE) di bawahnya manakala satu lagi adalah modul PV yang lazim. Kedua-dua jenis fotovoltan adalah terdiri daripada modul yang sama oleh itu ciri-ciri bagi kedua-duanya adalah sama. Dalam kajian ini, pengubahsuaian dan penambahbaikan telah dilakukan untuk meningkatkan prestasi pengumpul udara. Reka bentuk pengumpul suria PVT merangkumi fabrikasi panel PV yang dilekatkan dengan modul TE, pembinaan kerangka pengumpul dan proses penyambungan litar antara modul TE dan PV panel sebagai pengumpul hibrid PVT. Terdapat beberapa faktor yang perlu dititikberatkan dalam mereka bentuk pengumpul suria PVT-TE. Antaranya ialah cara pemasangan TE di bawah PV, kaedah penyambungan TE bagi mendapatkan tenaga elektrik yang maksimum, nilai rintangan beban yang sesuai untuk digunakan serta keseragaman kipas yang perlu dilaraskan. Rajah 1 menjelaskan gambaran sistem PVT-TE pengumpul terma laluan tunggal berasaskan udara digunakan. Dalam rajah ini, olakan paksa iaitu angin daripada kipas digunakan untuk menghasilkan perbezaan suhu antara sisi panas dan sejuk TE sekaligus mengalirkan udara panas keluar dari pengumpul. Bagi pemasangan TE di bawah panel PV pula, terdapat dua kaedah pemasangan TE yang sering digunakan oleh pengkaji. Dalam kajian ini, 10 keping TE digunakan dan pemasangan TE secara sesiri antara satu sama lain disambungkan bagi mendapatkan kuasa elektrik yang dijana oleh modul TE seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2. Penukaran tenaga TE menggunakan Kesan Seebeck menghasilkan voltan yang dapat digunakan untuk mendorong arus melalui rintangan beban. Proses ini menggambarkan secara langsung penukaran haba menjadi tenaga elektrik.

Pengumpul PVT jenis udara digabungkan dengan modul TE dan pengumpul udara seperti Rajah 3 bagi pengujian di dalam makmal. Pengumpul jenis plat rata dianggap sebagai bahagian utama bagi sistem ini. Kegunaannya adalah untuk menyerap dan mengumpulkan tenaga dari matahari dan menukarkannya menjadi haba, kemudian memindahkan haba tersebut kepada aliran cecair atau gas. Antara komponen yang terdapat dalam pengumpul suria ini ialah terdiri daripada sel suria, lapisan belakang PV, modul TE pengumpul suria, penebat haba, aliran udara masuk, kawasan aliran udara menumpu dan aliran udara keluar.

Perkakasan yang digunakan bagi memperoleh data dalam kajian ini adalah sistem perolehan data yang maju atau dikenali sebagai (*Data Acquisition Module*) ADAM. Suhu input, output dan suhu persekitaran telah



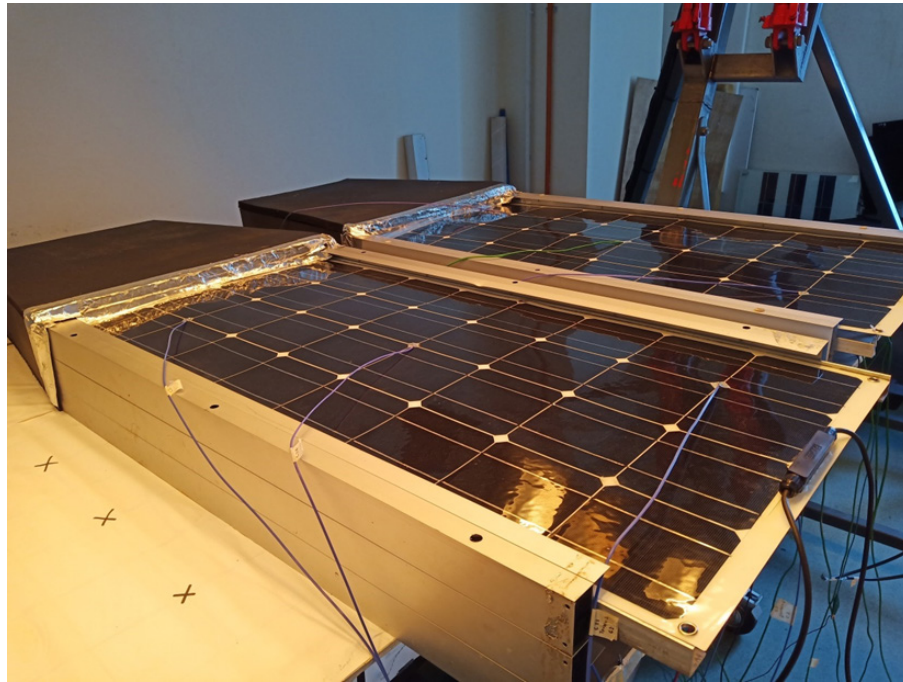
RAJAH 1. Reka bentuk pengumpul suria PVT-TE laluan udara



RAJAH 2. Susunan TE di bawah modul PV

diukur menggunakan termogandingan jenis-K yang disambung ke modul pemerolehan data ADAM sebelum dihantar ke pangkalan data pada komputer. Modul ini juga dapat disambungkan dengan jenis termogandingan yang sesuai dan ujian ini menggunakan termogandingan jenis K. Keluaran data yang terhasil boleh diukur dapat unit mV , V atau mA bergantung kepada kesesuaian julat data yang diperoleh.

Dalam kajian ini, panel suria monohablur dipilih bagi membangunkan sistem hibrid PVT dan PVT-TE kerana kecekapan panel tersebut dalam menghasilkan kuasa pengeluaran keseluruhan sistem adalah lebih baik berbanding panel jenis polihablur (Salaymeh et al. 2010). Jadual 1 menunjukkan kekhususan panel PV yang digunakan dalam sistem ini dengan kecekapan yang digunakan dalam kajian ini ialah 13%. Modul TE



RAJAH 3. Gambarajah sisi lapisan sistem hibrid PVT-TE

komersial yang digunakan dalam kajian ini adalah jenis model SP1848-27145 SA dengan ukuran fizikal $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 3.4 \text{ mm}$. Modul ini mempunyai 127 gandingan dan gambar modul ini ditunjukkan dalam Rajah 4. Modul TE terdiri daripada dua substrat seramik, sebilangan semikonduktor, lapisan pateri yang sesuai dan bahan penebat haba. Semikonduktor disambungkan secara selari bagi penjanaan terma manakala penjanaan elektrik

pula disambung secara sesiri. Pengumpul suria dipasang di bahagian atas pelantar ujian pengumpul yang boleh disesuaikan untuk pelbagai jarak pengumpul daripada sumber cahaya. Pelarasan ini dapat menghasilkan sinaran yang boleh diubah antara 100 W/m^2 hingga 1000 W/m^2 pada jarak yang berbeza. Dimensi simulator adalah $430 \text{ mm} \times 390 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ manakala jarak antara panel PV ke pusat lampu adalah 100 cm .

JADUAL 1. Cirian PV yang digunakan dalam sistem PVT dan PVT-TE

Cirian PV	Nilai
P_{max}	100 W
$I_{\text{p max}}$	5.75 A
$V_{\text{p max}}$	17.5 V
I_{sc}	6.25 A
V_{oc}	19.4 V
T_{ref}	25 °C
Suhu operasi	-40 °C ~ + 85 °C
Dimensi	1050 mm 540 mm 2.5 mm



RAJAH 4. Fotograf modul TE jenis SP1848-27145 SA

Sebelum memulakan uji kaji, sinaran simulator diukur menggunakan piranometer (MS-42, Eko). Jarak antara permukaan PV dan piranometer ditetapkan pada 100 cm. Keluaran PV telah ditetapkan pada titik kuasa maksimum (*MPP*) dengan menggunakan perintang yang ditetapkan dalam modul penyurih IV. Bagi melindungi modul PV agar tidak terlalu lama terkena pancaran sinaran dari lampu halogen, data yang dikumpulkan telah dijalankan selama 60 minit. Kemudian, sumber cahaya dimatikan. Modul PV disejukkan secara semula jadi melalui udara dan uji kaji selesai dijalankan. Modul perolehan data menyimpan data dalam format fail CSV dalam bentuk jadual sama ada dalam bentuk helaian lejar atau pangkalan data. Seterusnya, data dapat dipindahkan ke perisian Microsoft Excel untuk analisis lebih lanjut. Bagi memudahkan analisis dikaji, pembentangan data dilakukan dengan mengambil selang masa selama 10 minit bagi setiap purata parameter yang dikaji untuk setiap titik pengukuran.

Pengukuran kadar alir jisim udara pula dihitung setelah udara memasuki pemungut haba. Kecepatan aliran udara diukur dengan menggunakan anemometer. Laju jisim aliran udara pula dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Incropera et al. 2006).

$$\dot{m} = \rho A_c V_{udara} \quad (1)$$

dengan ρ ialah ketumpatan udara (kg/m^3); A_c ialah luas keratan rentas saluran udara (m^2) dan V ialah kelajuan udara (m/s). Parameter yang berkaitan dengan prestasi elektrik adalah faktor pengisian (*FF*) dan kecekapan penukaran elektrik η_{el} . Kecekapan elektrik modul PV ditakrifkan sebagai nisbah kuasa elektrik (pada *MPP*) dengan kuasa sinaran suria yang diterima oleh permukaan modul PV. Oleh itu, hubungan antara faktor pengisian dan kecekapan elektrik ialah (Mojumder et al. 2017):

$$FF = \frac{P_m}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (2)$$

$$\eta_{el} = \frac{P}{IA_c} = \frac{VI}{IA_c} \quad (3)$$

Dari segi parameter rujukan, kecekapan elektrik dirujuk dengan beberapa kajian terdahulu menggunakan persamaan berikut (Florschuetz 1979):

$$\eta_{el} = \eta_{ref} [1 - \beta_{ref} (T_{pv} - T_{ref})] \quad (4)$$

dengan η_{ref} adalah kecekapan sel suria pada suhu rujukan; T_{ref} pula adalah nilai di bawah sinar suria iaitu pada 1000 W/m^2 . Seterusnya, β_{ref} adalah faktor pembetul yang dinyatakan seperti:

$$\beta_{ref} = \frac{1}{T_c^* - T_{ref}} \quad (5)$$

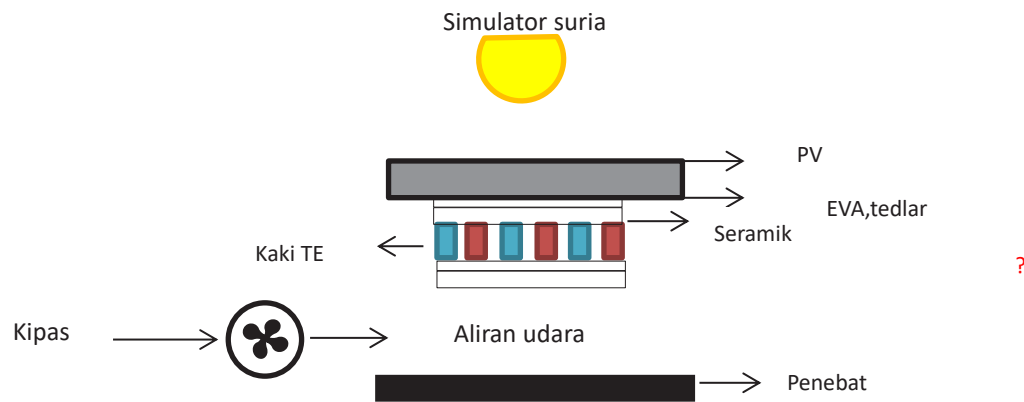
Nilai setiap parameter dirujuk kepada Garg dan Agarwal (1995) yang menyatakan nilai T_c^* yang digunakan ialah $27 \text{ }^\circ\text{C}$ manakala nilai β_{ref} pula bergantung kepada jenis sel suria yang digunakan. Kajian ini menggunakan panel silikon monohablur dan nilainya ialah $0.0045 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (Parthiban et al. 2020).

PEMODELAN PENJANA TERMOELEKTRIK

Sistem hibrid PVT-TE ditunjukkan secara skematik dalam Rajah 5. Ia terdiri daripada sel suria yang disambungkan ke TE melalui plat tembaga yang berfungsi sebagai penumpu haba. Permukaan modul TE disapukan dengan pes konduksi terma untuk memastikan pemindahan haba yang sekata di seluruh permukaan modul TE. Plat tembaga membentuk bahagian TE yang panas manakala

sisi sejuk pula dilekatkan dengan penukar haba seperti sirip serta udara yang mengalir melaluinya. Kelebihan sistem hibrid ini ialah suhu operasi sel suria dapat

dikurangkan dengan berlakunya pemindahan haba ke modul TE serta TE akan menghasilkan kuasa elektrik tambahan yang disebabkan terdapat perbezaan suhu pada kedua-dua sisi modul tersebut.



RAJAH 5. Skematik sistem hibrid PVT-TE

Untuk penjana TE terbantu suria, kecekapan modul TE diterbitkan seperti persamaan (Rowe 2006),

$$\eta = \frac{\text{Tenaga dibekalkan kepada beban}}{\text{Tenaga haba diserap di sisi panas}} \quad (6)$$

Dengan mengandaikan sifat bahan termoelektrik yang malar dan rintangan sentuhan yang boleh diabaikan, kecekapan boleh dinyatakan sebagai,

$$\eta_{TE} = \frac{I^2 R}{\alpha I T_H = \kappa(T_H - T_C) - \frac{1}{2} I^2 R} \quad (7)$$

dengan α ialah pekali Seebeck; σ ialah kekonduksian elektrik; κ ialah kekonduksian haba; dan T adalah suhu mutlak. Seterusnya, I ialah arus; R ialah rintangan siri; T_H ialah suhu sisi panas; dan T_C ialah suhu sisi sejuk.

Kecekapan penukaran maksimum dapat ditakrifkan seperti,

$$\eta_{max} = \eta_C \frac{\sqrt{1+ZT} - 1}{\sqrt{1+ZT} + \frac{T_C}{T_H}} \quad (8)$$

dengan η_C ialah kecekapan Carnot dan ia dinyatakan sebagai,

$$\eta_C = \frac{T_H - T_C}{T_H} \quad (9)$$

Kecekapan tenaga modul termoelektrik diukur dari segi pekali prestasinya (COP) dan ia dinyatakan sebagai

$$COP = \frac{\text{Tenaga diserap}}{\text{Kemasukan tenaga elektrik}} = \frac{\alpha T_C - \frac{1}{2} I^2 R - \kappa(T_H - T_C)}{\alpha I(T_H - T_C) + I^2 R} \quad (10)$$

Arus I untuk kuasa penyejukan maksimum dinyatakan sebagai,

$$I = \frac{\alpha T_C}{R} \quad (11)$$

Pekali prestasi maksimum boleh dinyatakan seperti,

$$COP_{max} = \frac{T_C \left[(1+ZT)^{\frac{1}{2}} - \frac{T_H}{T_C} \right]}{(T_H - T_C) \left[(1+ZT)^{\frac{1}{2}} + 1 \right]} \quad (12)$$

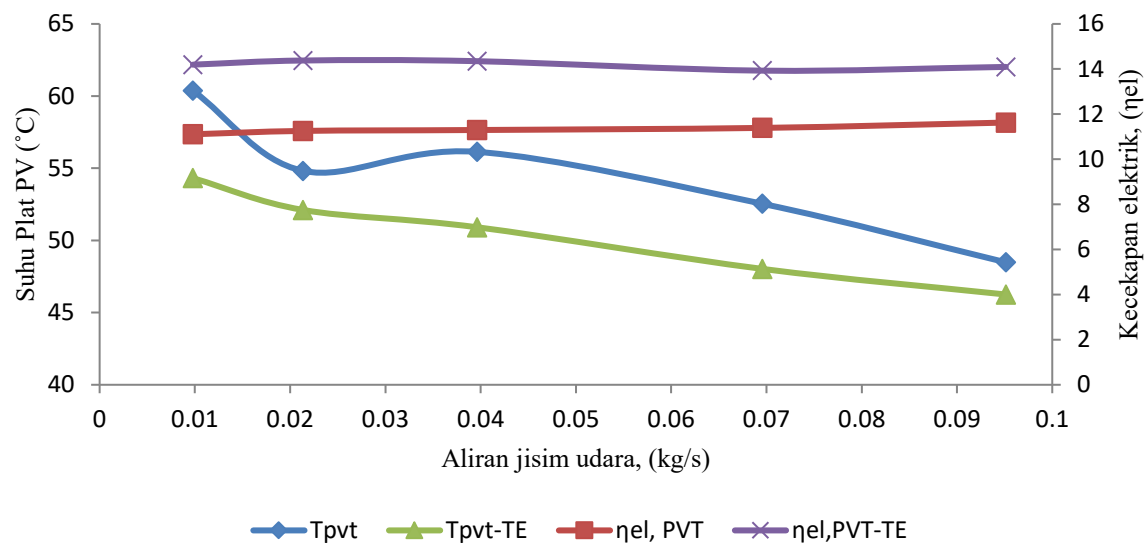
HASIL DAN PERBINCANGAN

Permodelan modul PV yang tepat diperlukan untuk reka bentuk dan prestasi sistem PV. Terdapat beberapa parameter yang penting perlu dikaji untuk melihat cirian elektrik modul PV. Antara parameter yang memberi kesan terhadap prestasi elektrik dan angka kecekapan termodinamik modul PV adalah persekitaran seperti keamatan suria, suhu persekitaran dan kelajuan angin (Cuce & Cuce 2014). Ketiga-tiga parameter ini memainkan peranan penting bagi menentukan penilaian prestasi kualitatif dan kuantitatif modul PV (Ghani et al. 2015). Kesan keamatan suria pada parameter prestasi modul PVT dan PVT-TE dikaji untuk tiga nilai keamatan suria yang berbeza iaitu 455.64 W/m²,

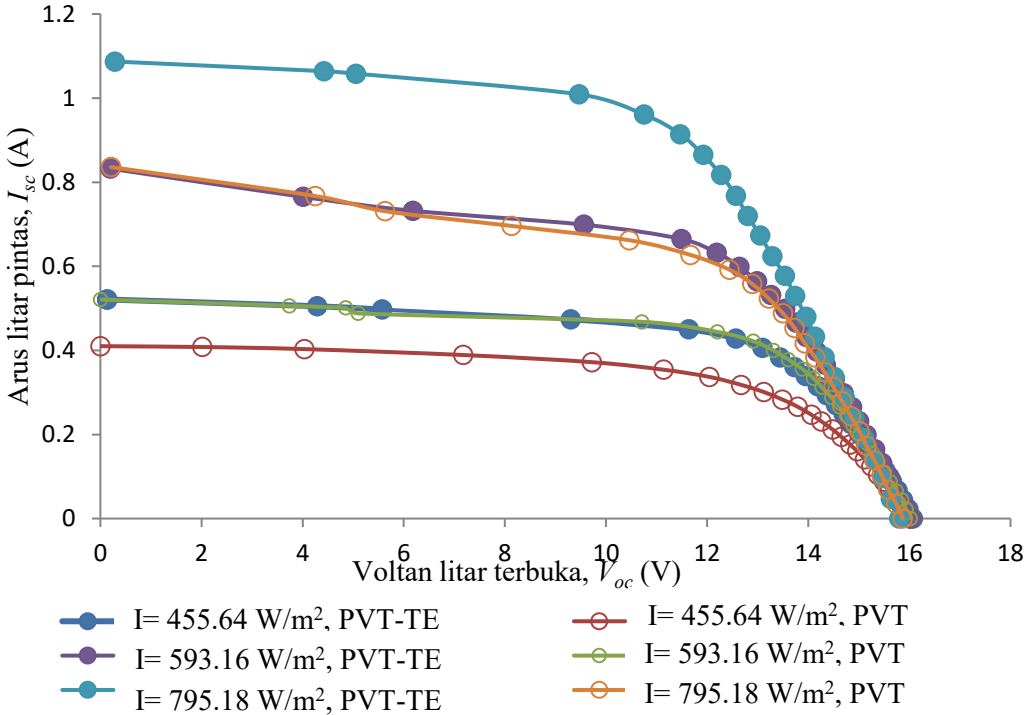
593.16 W/m² dan 795.18 W/m². Ini dapat diperhatikan daripada lekuk I-V dan P-V modul PV bahawa parameter semasa sangat bergantung pada tahap keamatan suria. Fenomena yang berlaku pada modul PV disebabkan oleh foton elektron yang menarik cahaya matahari ke dalam keadaan tenaga yang lebih tinggi, yang membolehkannya bertindak sebagai pembawa cas bagi pengaliran arus elektrik (Cuce 2009).

Kecekapan penjana PV sangat bergantung pada suhu sel suria. Oleh itu, penyejukan PV sangat penting. Dalam kajian ini, modul TE digunakan untuk menurunkan suhu sel PV kerana dapat mengurangkan kekonduksian terma dan meningkatkan kekonduksian elektrik. Penurunan suhu PV dan kecekapan elektrik bagi sistem PVT dan PVT-TE dapat dijelaskan seperti dalam Rajah 6. Modul TE menghasilkan kecerunan voltan dengan adanya kecerunan suhu di seluruh modul. Kelebihan sistem penukaran tenaga suria dengan TE dapat menghasilkan perbezaan suhu seterusnya menjana tenaga elektrik secara langsung dari haba tanpa pergerakan sebarang bendalir. Rajah 7 dan 8 menunjukkan cirian I-V serta P-V bagi PV bersama TE dan tanpa TE di bawah sinaran suria yang berbeza iaitu 455.64 W/m², 593.16 W/m² dan 795.18 W/m². Sinaran suria adalah salah satu parameter terpenting yang mempengaruhi prestasi sistem hibrid secara jelas. Oleh itu, kesan pelbagai nilai sinaran suria pada prestasi elektrik PVT dan PVT-TE ditunjukkan pada Rajah 7 dan 8. Dari Rajah 7, dapat dilihat bahawa voltan litar

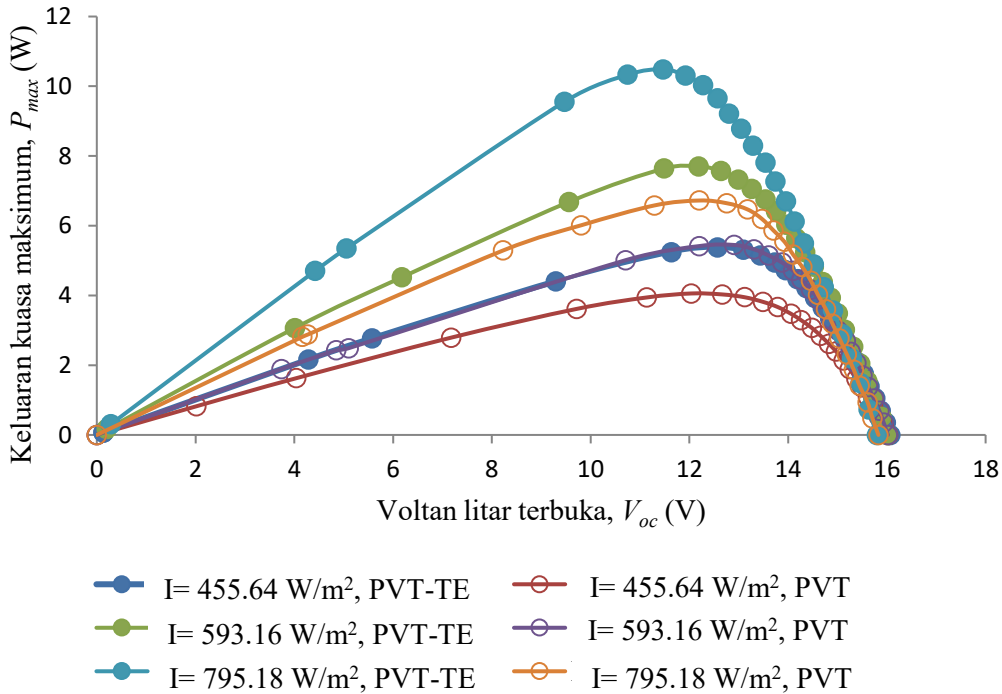
terbuka dan arus litar pintas PV dalam sistem hibrid menunjukkan arah aliran yang bertentangan pada kadar sinaran 455.64 W/m² hingga 795.18 W/m². Corak ini dapat dilihat dengan peningkatan arus litar pintas dari 0.017-0.705A untuk PVT dan 0.022-1.087A bagi PVT-TE manakala bagi voltan litar terbuka, hanya terdapat penurunan yang perlahan terhadap kenaikan sinaran suria iaitu dari 0.013-15.83 V bagi PVT dan 0.137-16.01V bagi PVT-TE. Penambahan I_{sc} dan V_{oc} bagi sistem PVT-TE berbanding sistem PVT adalah disebabkan jumlah tenaga elektrik yang dijana oleh PV dan modul TE. Ini menunjukkan bahawa PV dan TE mempunyai hubungan yang kompleks dengan kecekapan PV akan menurun di bawah kadar sinaran suria yang tinggi namun kecekapan TE pula meningkat terhadap kenaikan sinaran suria. Seperti yang dijangkakan, Rajah 8 pula menunjukkan peningkatan keluaran kuasa bagi sistem terhadap kenaikan sinaran suria. Ini dapat diperhatikan bahawa PV menyumbang peratusan keluaran kuasa yang lebih besar berbanding keluaran kuasa modul TE seperti yang dijelaskan dalam Jadual 2. Ini kerana modul TE lebih menyumbang kepada penyejukan PV berbanding penjana tenaga elektrik dari modul TE. Seterusnya, keluaran kuasa bagi sistem PVT dan PVT-TE masing-masing meningkat dari 0.271-6.723 W dan 0.352-10.484 W pada ketiga-tiga keamatan suria seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 8. Oleh itu, daya keluaran kuasa yang maksimum dapat diperoleh pada nilai keamatan suria yang paling tinggi.



RAJAH 6. Suhu plat PV dan kecekapan elektrik bagi sistem PVT dan PVT-TE



RAJAH 7. Perubahan cirian $I-V$ PVT-TE dan PVT pada sinaran suria 455.64 W/m^2 , 593.16 W/m^2 dan 795.18 W/m^2



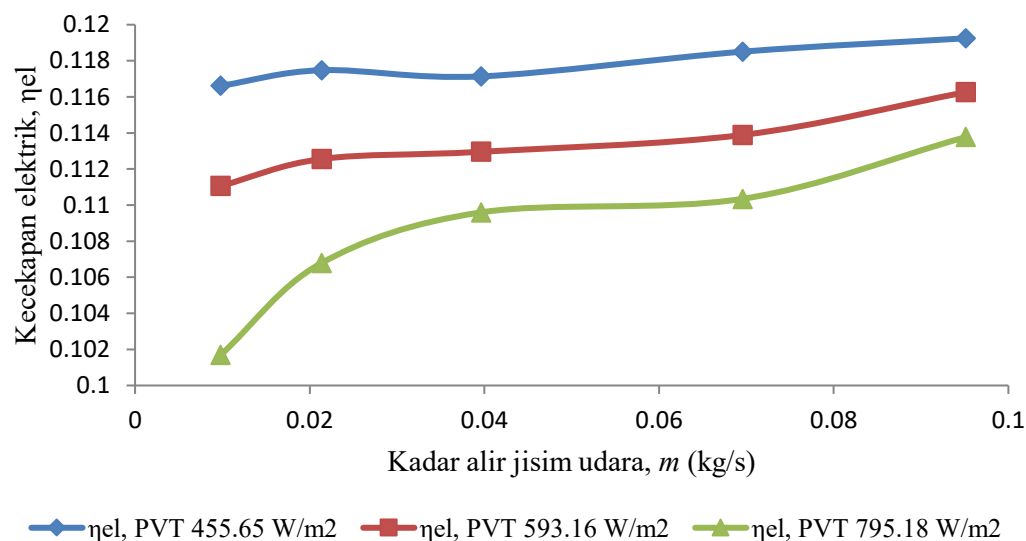
RAJAH 8. Perubahan cirian $P-V$ PVT-TE dan PVT pada sinaran suria 455.64 W/m^2 , 593.16 W/m^2 dan 795.18 W/m^2

JADUAL 2. Perbandingan keluaran kuasa maksimum sistem PVT dan PVT-TE pada keamatan sinaran suria yang berbeza

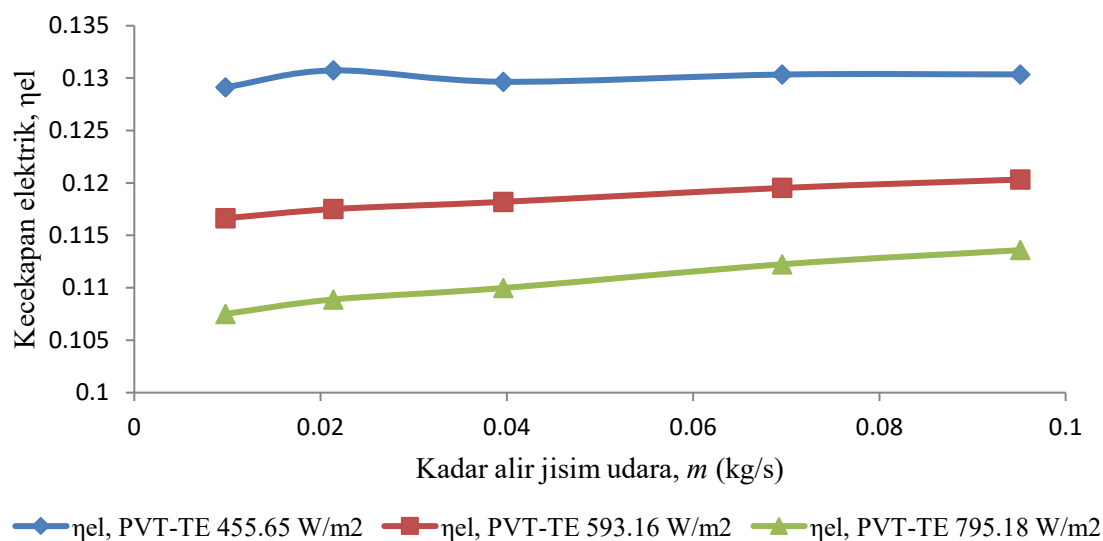
Keamatan sinaran suria, I (W/m^2)	Keluaran kuasa maksimum sistem PVT, P_{max} (W)	Keluaran kuasa maksimum sistem PVT-TE, P_{max} (W)	Peratusan pertambahan kuasa keluaran (%)
455.64	4.057	5.379	32.59
593.16	5.448	7.704	41.41
795.18	6.723	10.483	55.93

Seterusnya, Rajah 9 dan 10 menunjukkan perbezaan kecekapan elektrik terhadap tiga keamatan suria yang berbeza iaitu 455.65 W/m^2 , 593.16 W/m^2 dan 795.18 W/m^2 . Hasilnya menunjukkan bahawa kecekapan elektrik meningkat dengan peningkatan kadar alir jisim pada semua nilai keamatan suria disebabkan oleh pemindahan haba dari permukaan PV ke udara dengan melalui pengumpul haba. Selain itu, peningkatan kadar alir jisim udara menyebabkan peningkatan pekali pemindahan haba antara suhu PV dan bendalir kerja yang mengakibatkan suhu panel PV berkurang justeru meningkatkan kecekapan elektrik bagi kedua-dua sistem. Oleh itu, hasil tenaga elektrik yang diperolehi adalah lebih tinggi pada suhu sel PV yang rendah kerana perlanggaran elektron yang rendah pada kawasan susutan sel suria. Namun begitu, peningkatan sinaran suria menyebabkan pengurangan kecekapan elektrik kerana suhu panel PV meningkat seiring dengan peningkatan keamatan suria. Nilai penurunan kecekapan

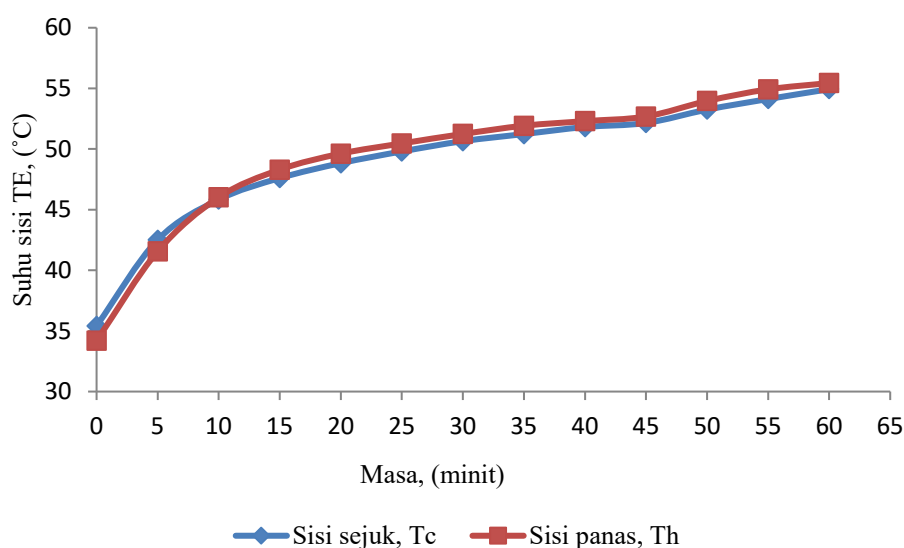
elektrik untuk sistem PVT ialah dari 11.93% hingga 11.37% manakala sistem PVT-TE pula dari 13.07% hingga 11.36%. Tambahan pula, nilai kecekapan elektrik bagi sistem PVT-TE adalah lebih tinggi sebanyak 0.1% hingga 1.2% berbanding sistem PVT kerana pertambahan kuasa elektrik yang dijana oleh modul TE. Pertambahan ini disebabkan oleh peningkatan kecekapan elektrik yang dijana oleh TE yang meningkat dengan pertambahan terhadap kecerunan suhu antara sisi sejuk dan panas TE. Rajah 11 menunjukkan perbezaan sisi panas dan sejuk TE dan terdapat perubahan suhu terhadap peningkatan masa. Rajah yang ditunjukkan adalah berdasarkan keputusan kajian yang paling optimum untuk kedua-dua sistem PVT dan PVT-TE ini iaitu pada $I = 795.18 W/m^2$ dan $m = 0.095 kg/s$. Oleh itu, kadar alir jisim udara yang optimum bagi menyejukkan TE memainkan peranan penting dalam meningkatkan prestasi keseluruhan sistem. Kuasa maksimum yang dapat dijana oleh TE ialah 35.65 mW pada kadar alir jisim udara 0.095 kg/s dengan kecekapan modul 1.7%.



RAJAH 9. Hasil kecekapan elektrik sistem PVT pada kadar alir jisim udara dan keamatan suria yang berbeza



RAJAH 10. Hasil kecekapan elektrik sistem PVT-TE pada kadar alir jisim udara dan keamatan suria yang berbeza



RAJAH 11. Sisi panas dan sejuk modul TE pada kadar yang optimum

Tambahan pula, kecekapan elektrik PV dapat ditingkatkan dengan mengeluarkan haba yang terkumpul dan tersembunyi pada permukaan PV dan menggunakan haba ini dengan kaedah yang betul. Teknologi seperti PVT-TE telah dikembangkan untuk tujuan ini. Walau bagaimanapun, PVT-TE hanya dapat memenuhi tujuan ini jika TE bersentuhan secara fizikal dengan PV. TE

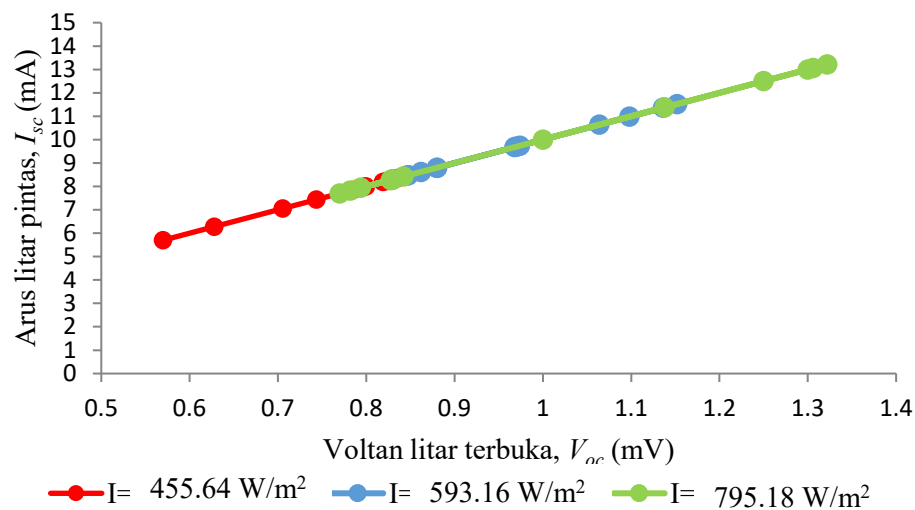
harus beroperasi pada suhu yang lebih tinggi daripada suhu persekitaran untuk menghasilkan tenaga elektrik dan kemungkinan besar akan memanaskan sel suria jika tidak disejukkan dengan betul. Sekiranya TE tidak bersentuhan secara fizikal dengan PV, ia tidak dapat menyejukkan sel PV. Rajah 12 menunjukkan V_{oc} dan I_{sc} bagi modul TE pada tiga keamatan suria yang berbeza.

Corak perubahan peningkatan V_{oc} semakin meningkat dengan peningkatan sinaran suria. Nilai maksimum bagi V_{oc} dan I_{sc} modul TE bagi keamatan suria 455.64 W/m^2 , 593.16 W/m^2 dan 795.18 W/m^2 ialah 0.832, 1.152, 1.322 mV dan 8.352, 11.52 dan 13.22 mA dan dijelaskan dalam Jadual 3. Rajah 13 pula menunjukkan perubahan pemindahan haba pada sisi sejuk modul TE dan pekali prestasinya terhadap peningkatan arus pada modul TE. Peningkatan arus dan voltan modul TE menyebabkan haba yang diserap dari sisi sejuk modul TE juga meningkat. Keluaran kuasa pula berlaku

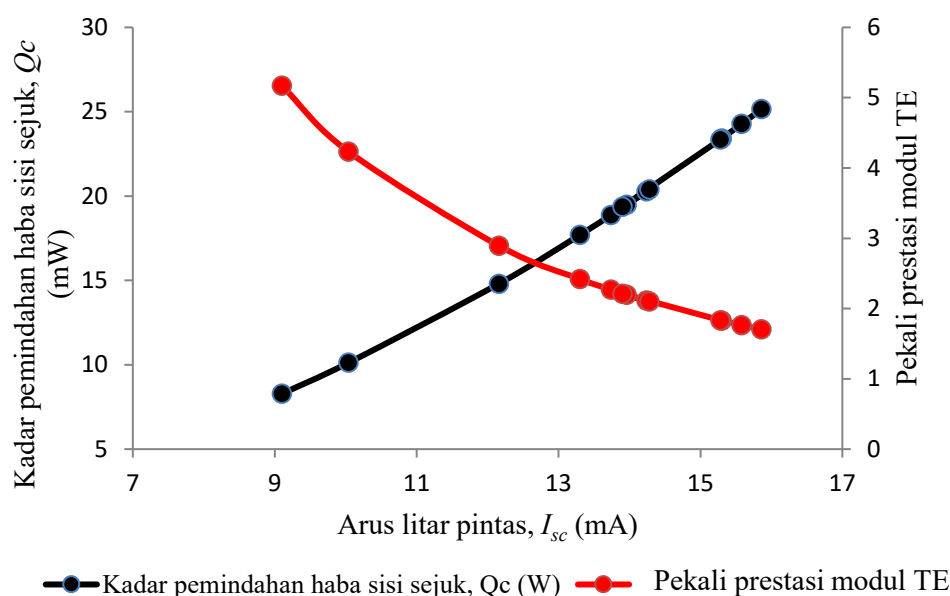
pada arus maksimum iaitu 15.86 mA manakala voltan meningkat sejajar dengan peningkatan haba pada sisi sejuk modul TE. Seterusnya, pekali prestasi sistem (COP) menurun sehingga mencapai 1 seterusnya meningkatkan penggunaan kuasa modul TE (Daghigh & Khaledian 2018). Dalam graf ini, COP menjadi fungsi rintangan terma tanpa dimensi pada sisi sejuk. Oleh itu, COP sistem penyejukan termoelektrik boleh ditunjukkan sebagai graf kontur berdasarkan dua pemboleh ubah yang merujuk kepada persamaan (10) dengan rintangan terma TE, R_L mempunyai nilai malar iaitu 1.9558 Ω (Shen et al. 2013).

JADUAL 3. Cirian elektrik modul TE

Keamatan sinaran suria, I (W/m^2)	Arus litar pintas, I_{sc} (mA)	Voltan litar terbuka, V_{oc} (mV)	Keluaran kuasa maksimum, P_{max} (mW)
455.64	5.70-8.352	0.57-0.835	3.249-6.977
593.16	8.8-11.52	0.88-1.152	7.744-13.272
795.18	10.0-13.22	1.0-1.322	10-17.478



RAJAH 12. Perubahan voltan terhadap arus pada keamatan suria yang berbeza



RAJAH 13. Kesan perubahan arus terhadap pemindahan haba dan pekali prestasi pada modul TE

KESIMPULAN

Perbincangan mengenai kesan pelbagai kadar alir jisim udara serta perubahan keamatan suria terhadap prestasi sistem PVT dan PVT-TE dikaji dan dianalisis. Pengumpul PVT-TE yang direka adalah sebahagian daripada pengembangan sistem berdasarkan kajian kepustakaan yang sebelumnya. Namun, perbezaan terhadap sistem ini ialah bahagian terma serta elektrik yang dihasilkan dapat digunakan sepenuhnya bagi meningkatkan prestasi kecekapan keseluruhan sistem. Modul TE yang digunakan dalam kajian ini masih lagi di dalam fasa penambahbaikan namun hasilnya sedikit sebanyak memberi sumbangan terhadap prestasi PVT-TE. Kaedah pengukuran yang digunakan untuk mendapatkan elektrik yang dijana oleh modul TE ialah menggunakan perintang yang mempunyai nilai rendah berdasarkan kajian sebelumnya. Bagi hasil keluaran elektrik PV pula, hasilnya dihitung menggunakan penyurih IV yang disambungkan pada komputer manakala suhu permukaan pengumpul dan bendalir kerja pula diukur dengan menggunakan termogandingan jenis K seterusnya disambungkan ke sistem pemerolehan data ADAM. Keseluruhan hasil menunjukkan bahawa prestasi sistem PVT-TE adalah lebih baik berbanding sistem PVT kerana pemindahan haba yang berlaku pada sistem PVT-TE adalah lebih baik berbanding sistem PVT. Ini kerana modul TE bukan sahaja menyumbang

kepada penjanaan elektrik malah ia juga berfungsi sebagai penyerap haba bagi mengurangkan suhu panel PV justeru dapat meningkatkan kecekapan keseluruhan sistem.

PENGHARGAAN

Terima kasih diucapkan kepada Kementerian Pengajian Tinggi, Malaysia untuk pembiayaan (GUP-2021-072) dan UKM untuk pembiayaan (DLP/1/2015/ST02/UKM/03/1). Selain itu, tidak lupa juga penghargaan kepada Institut Penyelidikan Tenaga Suria, UKM serta makmal Tenaga Suria FST yang menyediakan kemudahan makmal dan sokongan teknikal. Ahmad Fudholi adalah penyumbang utama di dalam penyelidikan ini. Pengarang bersama mengisytiharkan bahawa mereka tidak mempunyai kepentingan bersaing.

RUJUKAN

- Bhubaneswari, P. & Goicranco, I.S. 2011. A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable & Sustainable Energy Review* 15: 1623-1636.
- Choudhary, P. & Srivastava, R.K. 2019. Sustainability perspectives - A review for solar photovoltaic trends and growth opportunities. *J. Clean Prod.* 227: 589-612.
- Cuce, E. 2009. Thermodynamic analysis of the effectiveness of different types of PV modules for wet conditions. M.Sc. Thesis. Karadeniz Technical University (Unpublished).

- Cuce, E. & Cuce, P.M. 2014. Improving thermodynamic performance parameters of silicon photovoltaic cells via air cooling. *Int. J. Ambient Energy* 35(4): 193-199.
- Daghigh, R. & Khaledian, Y. 2018. Effective design, theoretical and experimental assessment of a solar thermoelectric cooling-heating system. *Solar Energy* 162: 561-572.
- Deng, Y., Zhu, W., Wang, Y. & Shi, Y. 2013. Enhanced performance of solar-driven photovoltaic-thermoelectric hybrid system in an integrated design. *Solar Energy* 88: 182-191.
- Dimri, N., Tiwari, A. & Tiwari, G.N. 2017. Thermal modelling of semitransparent photovoltaic thermal (PVT) with thermoelectric cooler (TEC) collector. *Energy Convers. Manag.* 146: 68-77.
- Florschuetz, L.W. 1979. Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors. *Solar Energy* 22(4): 361-366.
- Garg, H.P. & Agarwal, R.K. 1995. Some aspects of a PV/T collector/forced circulation flat plate solar water heater with solar cells. *Energy Conversion and Management* 36(2): 87-99.
- Ghani, F., Rosengarten, G., Duke, M. & Carson, J.K. 2015. On the influence of temperature on crystalline silicon solar cell characterisation parameters. *Solar Energy* 112: 437-445.
- Hussain, F., Othman, M.Y.H., Sopian, K., Yatim, B., Ruslan, M.H. & Othman, H. 2013. Design development and performance evaluation of photovoltaic/thermal (PV/T) air base solar collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 25: 431-441.
- Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L. & Lavine, A.S. 2006. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6th ed. New York: John Wiley & Sons.
- Jia, Y., Alva, G. & Fang, G. 2019. Development and applications of photovoltaic-thermal systems: A review. *Renew Sustain Energy Rev.* 102: 249-265.
- Mojumder, J.C., Ong, H.C., Chong, W.T., Leong, K.Y. & Izadyar, N. 2017. An empirical analysis on photovoltaic thermal system with fin design by forced air circulation. *Journal of Mechanical Science and Technology* 31(5): 2549-2557.
- Parthiban, A., Reddy, K.S., Pesala, B. & Mallick, T.K. 2020. Effects of operational and environmental parameters on the performance of a solar photovoltaic-thermal collector. *Energy Conversion and Management* 205: 112-428.
- Rowe, D.M. 2006. *Thermoelectric Handbook: Macro to Nano*. Boca Raton: CRC Press.
- Salaymeh, A.Al., Al-Hamamre, Z., Sharaf, F. & Abdelkader, M.R. 2010. Technical and economical assessment of the utilization of photovoltaic systems in residential buildings: The case of Jordan. *Energy Conversion and Management* 51(8): 1719-1726.
- Sharma, S., Dwivedi, V.K. & Pandit, S. 2014. A review of thermoelectric devices for cooling applications. *International Journal of Green Energy* 11(9): 899-909.
- Shen, L., Xia, Fu., Chen, H. & Wang, S. 2013. Investigation of a novel thermoelectric radiant air-conditioning system. *Energy and Buildings* 59: 123-132.
- van Sark, W.G.J.H.M. 2011. Feasibility of photovoltaic-thermoelectric hybrid modules. *Applied Energy* 88(8): 2785-2790.
- Zheng, J.C. 2008. Recent advances on thermoelectric materials. *Front. Phys. China* 3: 269-279.

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