

## Analisis Tenaga Pesentakan Jet Aliran Pekeliling Terbalik (PJAPT) Ke Atas Pengumpul Fotovolta Terma Suria (PVT) Modul Dwimuka

(Energy Analysis of a Reversed Circular Flow Jet Impingement (RCFJI) On A Bifacial PVT Collector)

Muhammad Amir Aziat Bin Ishak<sup>a\*</sup>, Adnan Ibrahim<sup>a\*</sup>, Mohd Faizal Fauzan<sup>a</sup>, Ahmad Fazlizan<sup>a</sup> & Win Eng Ewe<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Institut Penyelidikan Tenaga Suria, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia*

<sup>b</sup>*Energy Systems Research Unit, Mechanical and Aerospace Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, G1 1XJ, Scotland, United Kingdom*

\*Corresponding author: [iadnan@ukm.edu.my](mailto:iadnan@ukm.edu.my) & [amiraziat93@gmail.com](mailto:amiraziat93@gmail.com)

Received 16 October 2023, Received in revised form 3 December 2023

Accepted 3 January 2024, Available online 30 May 2024

### ABSTRACT

*Although photovoltaic thermal (PVT) offers ascertain of benefits, it also has its own limitations. The efficiency of PVT is diminished due to heat gain experienced by its photovoltaic module when subjected to solar radiation. Jet impingement has been recognised as a highly successful technique for the purpose of cooling solar modules, particularly in the context of bifacial module applications. An energy analysis of a reversed circular flow jet impingement on a bifacial PVT collector was perform through an indoor experiment utilizing a solar simulator. The jet plate outlet was varied into four different configurations: one hole (1h), three holes (3h), four holes (4h) and five holes (5h) to identify the jet plate outlet configuration that contributes to the best energy efficiency. The experiment was carried out using a constant solar irradiance of 900 W/m<sup>2</sup> and mass flow rate between 0.01 kg/s to 0.14 kg/s. The study's findings indicate that configuration 1h exhibited the best photovoltaic efficiency of 11.09%. Additionally, the highest thermal efficiency recorded was 63.2%. In summary, it can be concluded that configuration 1h exhibits an overall photovoltaic thermal efficiency of 74.28% when subjected to a mass flow rate of 0.14 kg/s. This configuration outperforms other jet plate outlet configuration in terms of energy performance.*

*Keywords: Jet impingement, Photovoltaic Thermal, Bifacial module, Solar collector; Heat transfer*

### ABSTRAK

*Di sebalik pelbagai manfaat yang di tawarkan oleh teknologi fotovolta terma (PVT), teknologi ini juga tidak terlepas dari mempunyai kelemahan yang tersendiri. Teknologi PVT dikekang oleh fakta bahawa modul fotovoltanya memperoleh haba akibat dari didedahkan kepada sinaran suria yang secara tidak langsung mengurangkan kecekapan fotovoltanya. Pesentakan jet adalah salah satu kaedah berkesan untuk menyejukkan modul fotovolta terutama sekali untuk aplikasi modul dwimuka. Eksperimen dalaman menggunakan simulator suria telah dijalankan pada pengumpul suria PVT modul dwimuka yang disejukkan menggunakan kaedah pesentakan jet aliran pekeliling terbalik untuk menilai prestasi tenaga pengumpul suria PVT. Saluran udara keluar plat jet telah divariasikan kepada empat konfigurasi: satu lubang (1h), tiga lubang (3h), empat lubang (4h), dan lima lubang (5h) untuk mengenal pasti konfigurasi saluran udara keluar yang menghasilkan kecekapan tenaga yang terbaik. Kajian ini telah dijalankan di bawah keamatan suria malar 900 W/m<sup>2</sup> dan kadar aliran jisim antara 0.01 kg/s hingga 0.14 kg/s. Hasil dapatan kajian mendapati bahawa konfigurasi 1h merekodkan kecekapan fotovolta yang tertinggi dengan nilai bacaan sebanyak 11.09% manakala nilai bacaan kecekapan terma yang tertinggi adalah 63.2%. Secara kesimpulan, kecekapan keseluruhan fotovolta terma yang dihasilkan oleh konfigurasi 1h adalah sebanyak 74.28% di bawah kadar aliran jisim 0.14 kg/s, sekali gus membawa kepada kecekapan tertinggi jika dibandingkan dengan konfigurasi saluran udara keluar plat jet yang lain.*

*Kata Kunci: Pesentakan jet, Fotovolta terma, Modul dwimuka, Pengumpul Suria, Pemindahan haba*

## PENDAHULUAN

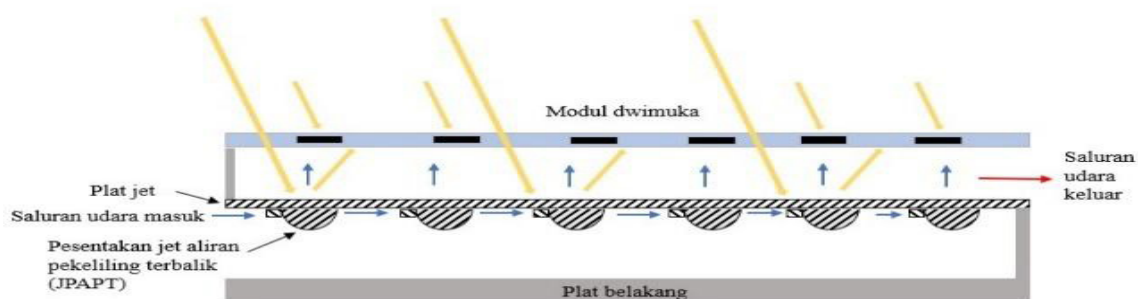
Teknologi fotovolta terma suria (PVT) mempunyai keupayaan untuk menjana tenaga elektrik dan haba secara serentak (Bassam et al. 2023). Penganalisis telah meramalkan bahawa teknologi ini mempunyai ketahanan sehingga 20 tahun (Mohd Ashhar et al. 2023). Teknologi PVT juga dilihat mempunyai potensi untuk menggantikan pengeluaran tenaga konvensional (Rahmat et al. 2022). Walaubagaimanapun, teknologi PVT bergantung kepada modul fotovoltanya (PV), yang merupakan komponen penting dalam sistem (Jelita et al. 2023). Terdapat dua jenis modul fotovolta yang lazim digunakan: modul monofasial dan modul dwimuka. Modul monofasial hanya mampu menjana elektrik dengan menyerap cahaya matahari dari bahagian hadapan modul sahaja. Manakala, modul dwimuka mempunyai kemampuan untuk menjana elektrik dari kedua-dua bahagian hadapan dan belakang permukaan modul (Ishak et al. 2023e). Kawasan permukaan yang terdedah kepada sinaran suria dimaksimumkan dalam modul dwimuka (Ooshaksaraei et al. 2017).

Walaupun banyak faedah yang ditawarkan oleh teknologi PVT, ia juga mempunyai satu kelemahan yang ketara. Teknologi PVT tertakluk kepada kekangan di mana modul fotovolta meresap haba akibat didedahkan kepada sinaran suria. Hal ini menyebabkan kecekapan fotovolta menurun (Hemmat et al. 2020; Mokhtar et al. 2019). Oleh itu, sistem penyejukan adalah diperlukan untuk meningkatkan prestasi pengumpul suria PVT (Brideau et al. 2012, 2014). Walaubagaimanapun, kaedah penyejukan bagi modul dwimuka adalah terhad kerana kedua-dua belah modul dwimuka perlu didedahkan kepada sinaran matahari (Moshery et al. 2021a). Salah satu kaedah berkesan untuk menyejukkan modul dwimuka adalah dengan menggunakan kaedah pesentakan jet (Yang et al. 2022). Kesan pesentakan jet membantu meningkatkan kadar pemindahan haba di dalam pengumpul suria PVT dan meningkatkan kecekapan fotovolta. Eksperimen dalaman telah dijalankan di dalam kajian ini untuk menganalisis prestasi tenaga pengumpul

fotovolta terma suria (PVT) modul dwimuka yang disejukkan menggunakan teknik pesentakan jet aliran pekeliling terbalik (PJAPT). Kajian ini menangani jurang penyelidikan dalam mekanisme penyejukan pengumpul suria PVT yang melibatkan kaedah pesentakan jet. Selain itu, kajian ini juga memperkenalkan satu kaedah baru untuk meningkatkan prestasi dan kecekapan pengumpul suria PVT modul dwimuka dengan menggunakan kaedah pesentakan jet aliran pekeliling terbalik (PJAPT). Kesan pesentakan jet pada modul PV mampu meningkatkan kadar pemindahan haba yang ketara. Namun begitu, seperti yang dinyatakan oleh

Vengadesan et al. (2020) penyelidikan mengenai penggunaan kaedah pesentakan jet dalam aplikasi modul dwimuka adalah terhad. Kajian meluas diperlukan untuk meneroka potensi kaedah pesentakan jet ini secara berkesan (Abou-Ziyan et al. 2020). Sistem pesentakan jet sedia ada juga memerlukan halaju angin yang tinggi untuk menghasilkan kesan pesentakan jet. Hal ini boleh dicapai dengan menghasilkan konfigurasi pesentakan jet yang dapat menghasilkan halaju angin yang tinggi.

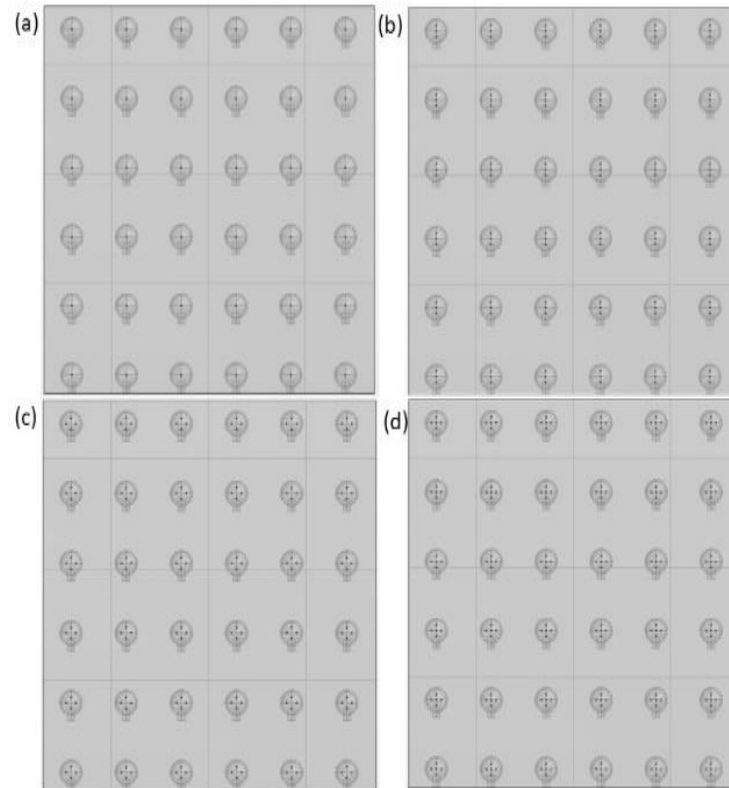
Pengumpul suria PVT modul dwimuka menggunakan kaedah pesentakan jet aliran pekeliling terbalik (PJAPT) terdiri daripada tiga komponen utama: Pengumpul suria PVT, modul dwimuka dan plat jet (Ishak et al. 2023a, 2023b). Modul dwimuka yang digunakan dalam kajian ini adalah modul fotovolta buatan khas yang ditempah oleh Institut Penyelidikan Tenaga Suria (SERI), UKM. Modul dwimuka ini membolehkan sinaran suria menembusi modul PV dan menyerap sinaran suria dari bahagian hadapan dan belakang modul. Seperti yang di tunjukan pada Rajah 1, cawan pesentakan jet aliran pekeliling terbalik (PJAPT) dilekatkan pada plat jet. Udara disalurkan kepada saluran udara masuk dan akan memenuhi cawan PJAPT. Hal ini akan menyebabkan udara di dalam cawan PJAPT mampat dan akan keluar melalui saluran udara keluar plat jet dengan halaju yang tinggi dan menyebabkan kesan pesentakan jet ke atas modul dwimuka (Ishak et al. 2023d, 2023c). Kesan pesentakan jet ke atas modul dwimuka mampu meningkatkan kadar pemindahan haba dan menyejukkan



RAJAH 1. Prinsip asas kaedah pesentakan jet aliran pekeliling terbalik (PJAPT)

modul dwimuka. Manakala, haba panas yang terperangkap di dalam pengumpul suria PVT akan keluar melalui saluran udara keluar dan di tukarkan kepada tenaga terma. Dalam

kajian ini, saluran udara keluar plat jet telah divariasikan kepada empat jenis konfigurasi saluran udara keluar seperti ditunjukkan pada Rajah 2.



RAJAH 2. Konfigurasi reka bentuk saluran udara keluar (PJAPT): (a) satu lubang (1h), (b) tiga lubang (3h), (c) empat lubang (4h), dan lima lubang (5h)

#### PERSEDIAAN EKSPERIMEN

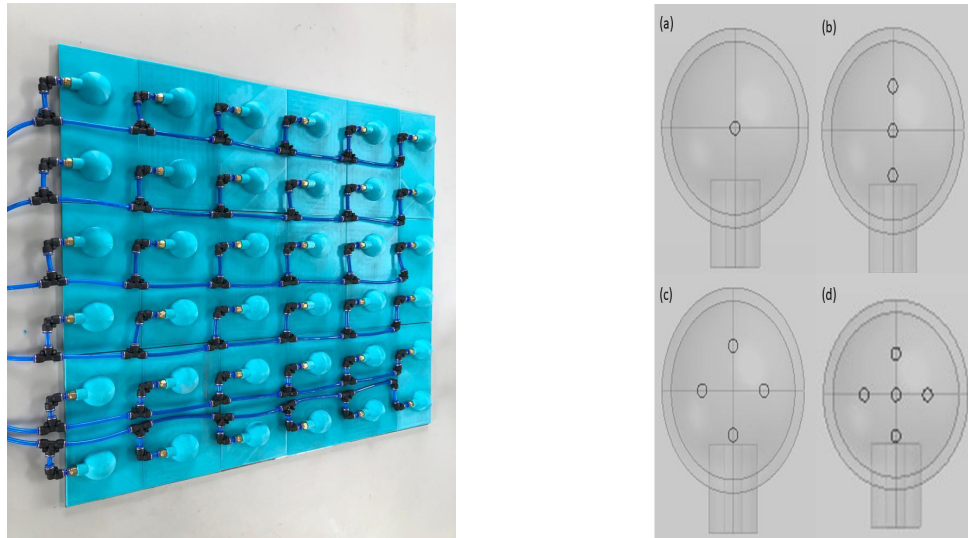
Satu eksperimen dalam telah dijalankan di Institut Penyelidikan Tenaga Suria (SERI), Universiti Kebangsaan Malaysia, untuk menganalisis prestasi tenaga pengumpul fotovolta terma suria (PVT) modul dwimuka yang disejukkan menggunakan teknik pesentakan jet aliran pekeliling terbalik (PJAPT). Dimensi cawan PJAPT adalah 40 mm diameter dan 20 mm kedalaman (Ishak et al. 2023b). PJAPT telah dipasang pada plat jet dan dilekatkan pada posisi 25 mm di bawah modul dwimuka. Plat jet mempunyai 36 lubang (3 mm diameter setiap satu) dengan jarak mengikut arus,  $X = 113.4$  mm, dan jarak mengikut arus,  $Y = 126$  mm. Konfigurasi arus X dan Y ini dipilih berdasarkan kajian oleh (Ewe et al. 2021) yang membuktikan konfigurasi arus X-Y ini adalah konfigurasi terbaik dalam mengurangkan titik-titik panas yang terhasil dari pesentakan jet. Saluran udara keluar plat jet telah divariasikan kepada empat konfigurasi: satu lubang (1h), tiga lubang (3h), empat lubang (4h), dan lima lubang (5h), seperti yang di tunjukkan pada Rajah 3, untuk mengenal

pasti konfigurasi saluran udara keluar yang menghasilkan kecekapan tenaga yang terbaik. Udara masuk disalurkan melalui tiub poliuretana berukuran 6 mm yang disambungkan kepada saluran masuk PJAPT. Udara akan memasuki cawan PJAPT untuk mencipta aliran udara pekeliling dan memampatkan udara di dalam cawan PJAPT. Udara mampat di dalam cawan PJAPT tersebut akan keluar melalui lubang plat jet 3 mm dengan halaju yang tinggi dan menyebabkan kesan pesentakan jet pada modul dwimuka.

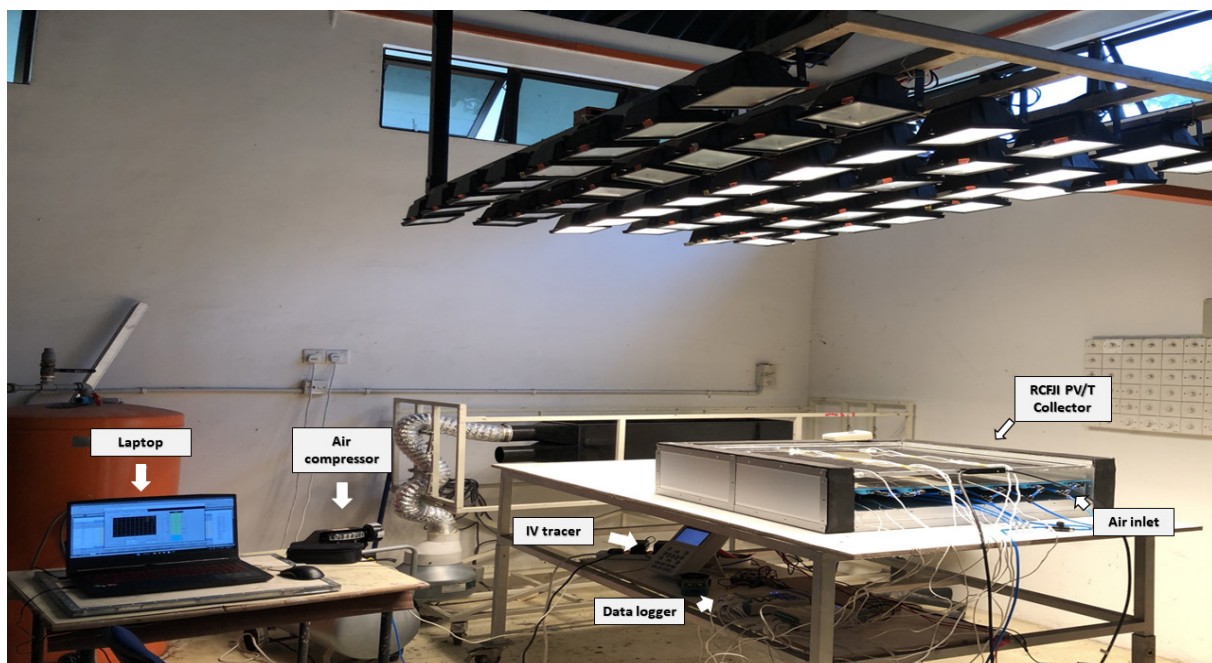
Sebuah simulator suria yang mengandungi 32 lampu halogen (500 watt setiap satu) telah digunakan untuk mereplikasi keamatan suria, seperti yang ditunjukkan pada Rajah 4. 14 termokopel jenis K telah disambungkan kepada sebuah *data logger* AT4824 dan di letakkan pada sekeliling pengumpul suria PVT untuk merekodkan bacaan suhu. Prosedur eksperimen telah dijalankan mengikut metodologi yang dirangka berdasarkan kajian terdahulu oleh (Moshery et al. 2021b; Ooshaksaraei et al. 2017). Eksperimen dalam menggunakan teknik perolakan dipaksa daripada sebuah pemampat udara berkelajuan tinggi. Sebuah meter angin digunakan untuk mengukur kelajuan udara dan

menetapkan kadar aliran jisim udara masuk. Kadar aliran jisim berjulat dari 0.01 kg/s hingga 0.14 kg/s. Simulator suria telah dilaraskan pada  $900 \text{ W/m}^2$  dan dipantau menggunakan piranometer. Data logger telah ditetapkan untuk merekodkan bacaan suhu PJAPT pada setiap 1 saat selama 30 minit. Selepas anggaran 25 ke 30 minit, pengumpul suria PVT telah mencapai keadaan seimbang tanpa perubahan suhu. Pengesan I-V model MP-11 yang

disambungkan ke modul dwimuka telah digunakan untuk merekodkan, arus, voltan dan kuasa modul dwimuka pada keadaan seimbang dan telah diimport ke Microsoft Excel untuk dianalisis. Ciri modul dwimuka dijelaskan pada Jadual 1. Pengumpul suria PVT dibiarkan sejuk selama dua jam sebelum mengulangi prosedur yang sama menggunakan konfigurasi salur udara plat jet yang berlainan pula.



RAJAH 3. PJAPT yang dipasangkan pada bahagian belakang plat jet (atas) dan konfigurasi saluran udara keluar plat jet (bawah): (a) satu lubang (1h), (b) tiga lubang (3h), (c) empat lubang (4h), dan lima lubang (5h)



RAJAH 4. Persediaan eksperimen dalaman.

JADUAL 1. Ciri modul dwimuka.

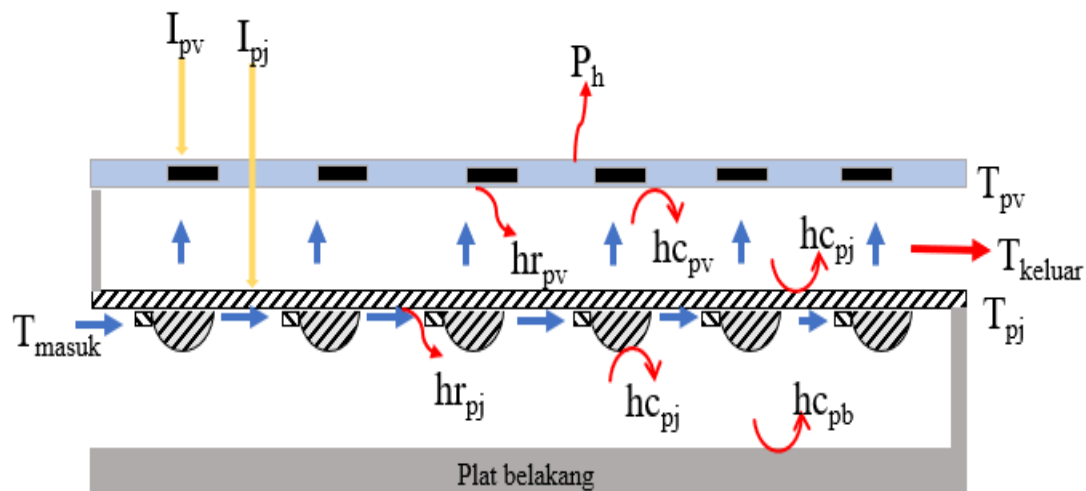
Parameter	Nilai
<i>Factor pembungkusan</i>	0.66
Kuasa maksimum yang dinilai	60 W
Voltan pada kuasa maksimum	17.14 V
Arus pada kuasa maksimum	3.5 A
Voltan litar terbuka	22.1 V
Arus litar pintas	3.71 A

JADUAL 2. Parameter dan nilai asas.

Parameter	Nilai
Kadar aliran jisim, $\dot{m}$	0.1–0.14 kg/s
Lebar pengumpul, W	684 mm
Panjang pengumpul, L	705 mm
Kedalaman salur, d	25 mm
Keamatan suria, I	900 W/m <sup>2</sup>
Luas pengumpul, A <sub>c</sub>	0.481 m <sup>2</sup>
Penyerapan sel PV, $\alpha_{pv}$	0.91
Faktor pembungkusan, P	0.66
Penghantaran laminasi, $\tau_1$	0.85
Pemantulan plat jet, $n_r$	0.7
Kecekapan elektrik pada keadaan rujukan, $\eta_{ref}$	0.16
Pekali suhu,	0.0045 K <sup>-1</sup>
Suhu pada keadaan rujukan, T <sub>ref</sub>	303.15 K

## ANALISIS TENAGA

Analisis kecekapan tenaga telah dijalankan ke atas keempat-empat konfigurasi saluran udara keluar plat jet. Jadual 2 menyenaraikan parameter dan nilai yang digunakan dalam analisis tenaga. Rangkaian terma sistem PJAPT boleh di rujuk pada Rajah 5.



$I_{pv}$	Perolehan haba modul PV
$I_{pj}$	Perolehan haba plat jet
$P_h$	Pembebasan haba modul ke ambien
$hr_{pv}$	Pemindahan haba menyinar modul PV
$hc_{pv}$	Pemindahan haba perolakan PV
$hc_{pj}$	Pemindahan haba perolakan plat jet
$hr_{pj}$	Pemindahan haba menyinar plat jet
$hc_{pb}$	Pemindahan haba perolakan plat belakang
$T_{pv}$	Suhu modul PV
$T_{pj}$	Suhu plat jet
$T_{masuk}$	Suhu udara masuk
$T_{keluar}$	Suhu udara keluar

RAJAH 5. Rangkaian terma sistem PJAPT

## KECEKAPAN FOTOVOLTA

Kecekapan fotovolt,  $\eta_{pv}$ , ditentukan menggunakan formula berikut:

$$\eta_{pv} = \frac{P_{max}}{(I \times A_c)} \quad (1)$$

$P_{max}$  ditentukan menggunakan pengesanan I-V dan boleh dikira menggunakan formula berikut (Ewe et al. 2021):

$$P_{max} = I A_c \alpha_{pv} P(\eta_{pvfront}) + I A_c \tau_i (1 - P) n_r \alpha_{pv} P(\eta_{pvfront}) \quad (2)$$

Kecekapan sel dwimuka pula ditentukan menggunakan formula (Ewe et al. 2021):

$$\eta_{pvfront} = \eta_{pvrear} = \eta_{ref} [1 - \beta (T_{pv} - T_{ref})] \quad (3)$$

## KECEKAPAN TERMA

Kecekapan terma,  $\eta_{terma}$ , dinyatakan sebagai (Ewe et al. 2021):

$$\eta_{terma} = \frac{Q_u}{(I \times A_c)} \quad (4)$$

Dan penambahan haba berguna,  $Q_u$ , dikira menggunakan:

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_{ketuar} - T_{masuk}) \quad (5)$$

Kadar aliran jisim,  $\dot{m}$ , berjulat antara 0.1 kg/s hingga 0.14 kg/s. Manakala, muatan haba tentu udara,  $C_p$ , dinyatakan sebagai (Ewe et al. 2021):

$$C_p = 1.0057 + 0.000066 (T - 300) \quad (6)$$

## KECEKAPAN KESELURUHAN FOTOVOLTA TERMA (PVT)

Kecekapan keseluruhan fotovolt terma (PVT) dikira menggunakan formula berikut:

$$\eta_{keseluruhan} = \eta_{pv} + \eta_{terma} \quad (7)$$

## ANALISIS KETIDAKPASTIAN

Analisis ketidakpastian telah dilakukan ke atas setiap radas pengukur untuk mengukur ketidaktepatan dan ralat radas pengukur secara sistematik dan telah dibentangkan dalam Jadual 3. Hasil analisis ketidakpastian menunjukkan tahap ketidakpastian radas adalah kurang daripada 2%. Oleh itu, hasil kajian eksperimen boleh dianggap tepat dan sah. Pengiraan sisihan piawai,  $s$ , dinyatakan sebagai (Ooshaksaraci et al. 2017):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (8)$$

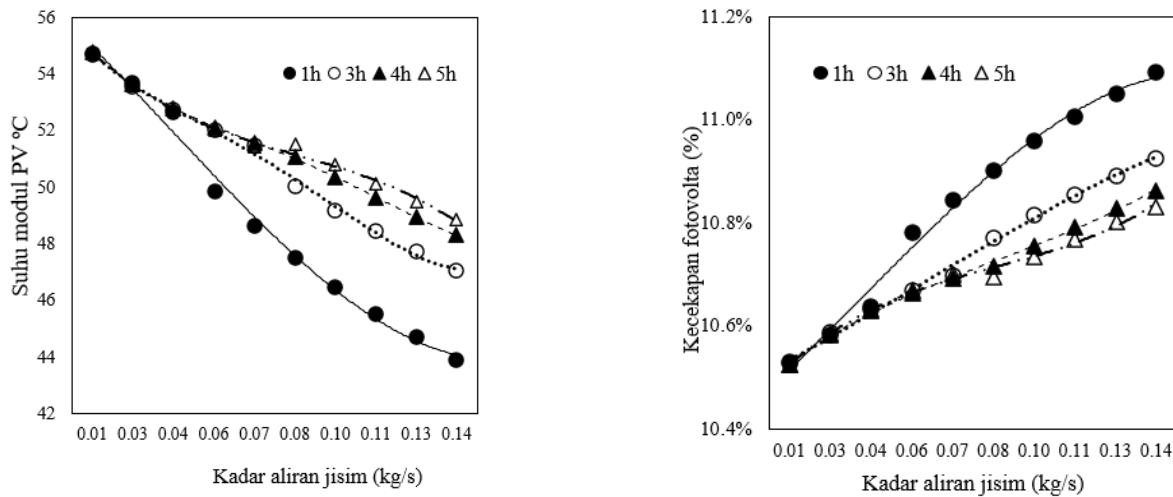
Di mana  $x_i$ ,  $\bar{x}$ , dan  $n$  mewakili min pengukuran, hasil keputusan pengukuran dan bilangan set pengukuran. Ungkapan untuk ketidakpastian,  $u$ , adalah seperti berikut (Ooshaksaraci et al. 2017):

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

## HASIL KAJIAN DAN PERBINCANGAN

## KECEKAPAN FOTOVOLTA

Kecekapan fotovolt bagi keempat-empat konfigurasi saluran udara plat jet PJAPT telah dianalisis dan dibentangkan seperti tertera dia Rajah 6. Berdasarkan pemerhatian, konfigurasi 1h merekodkan bacaan suhu modul yang paling rendah dan di ikuti oleh konfigurasi 3h, 4h, dan 5h. Ini menunjukkan bahawa meningkatkan bilangan saluran udara plat jet tidak memberikan kesan positif ke atas suhu modul kerana halaju angin yang keluar melalui saluran udara keluar PJAPT adalah terlalu lemah dan perlahan. Julat suhu modul untuk konfigurasi 1h, 3h, 4h, dan 5h adalah 43.90-54.69 °C, 47.05-54.74 °C, 48.29-54.79 °C, dan 48.87-54.77 °C.



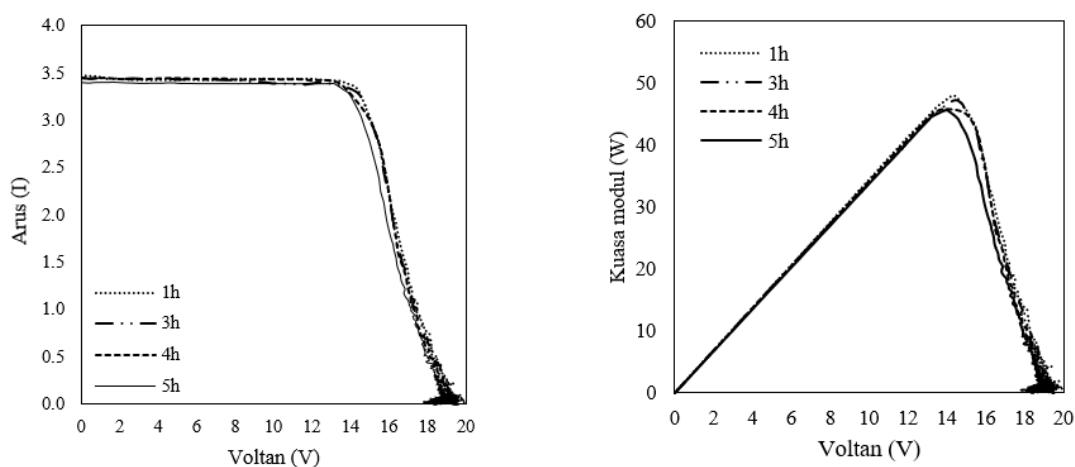
RAJAH 6. Suhu modul (atas) dan kecekapan fotovolta (bawah) pada keamatan suria 900 W/m<sup>2</sup>.

JADUAL 3. Analisis ketidakpastian radas pengukur.

Radas	Model	Parameter	Unit	Ketidakpastian (%)
Pengesan I-V	MP-11	Keamatan suria	W/m <sup>2</sup>	± 0.65 %
Data Logger	AT4824	Suhu	°C	± 0.1 °C
Termokopel	Jenis K	Suhu	°C	± 0.1 °C
Piranometer	TES132	Keamatan suria	W/m <sup>2</sup>	± 1.3 %
Meter angin	MT-4615	Halaju angin	m/s	± 1.45 %

Hasil pemerhatian, kecekapan fotovolta meningkat apabila kadar aliran jisim bertambah. Ini adalah kerana, apabila kadar aliran jisim bertambah, suhu modul PV mula berkurang dan menyebabkan kecekapan fotovolta modul dwimuka meningkat. Hal ini dapat dibuktikan dengan formula kecekapan fotovolta. Apabila  $P_{max}$  meningkat, kecekapan fotovolta juga meningkat kerana  $P_{max}$  berkadar terus dengan kecekapan fotovolta. Oleh itu, meningkatkan

kadar aliran jisim menyebabkan suhu modul berkurang dan menyumbang kepada bacaan  $P_{max}$  yang lebih tinggi. Kecekapan fotovolta maksimum yang direkodkan adalah dengan menggunakan konfigurasi 1h dengan nilai kecekapan fotovolta sebanyak 11.09% pada kadar aliran jisim 0.14 kg/s. Manakala bagi konfigurasi 3h, 4h, dan 5h pula, nilai kecekapan fotovolta maksimum yang direkodkan adalah 10.93%, 10.86%, dan 10.83%.

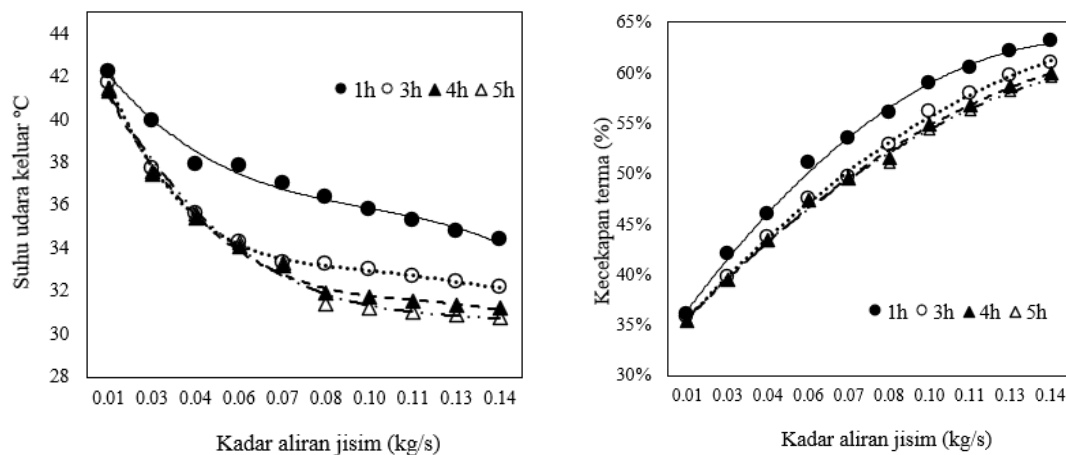


RAJAH 7. Nilai bacaan I-V (atas) dan P-V (bawah) yang direkodkan pada keamatan suria 900 W/m<sup>2</sup> dan 0.14 kg/s kadar aliran jisim

Rajah 7. Menunjukkan graf arus, I dan kuasa modul, P melawan voltan, V yang direkodkan menggunakan pengesanan I-V pada keamatan suria sebanyak  $900 \text{ W/m}^2$  dan kadar aliran jisim  $0.14 \text{ kg/s}$ . Pada pemerhatian, arus, voltan dan kuasa modul yang direkodkan tidak jauh berbeza. Prestasi I-V tertinggi yang direkodkan adalah dengan menggunakan konfigurasi 1h, dengan nilai bacaan voltan sebanyak  $19.87 \text{ V}$  dan arus sebanyak  $3.48 \text{ A}$ . Bagi konfigurasi 3h, 4h dan 5h pula, nilai bacaan voltan maksimum yang direkodkan adalah  $19.57 \text{ V}$ ,  $19.47 \text{ V}$  dan  $19.41 \text{ V}$ . Manakala nilai arus maksimum adalah  $3.45 \text{ A}$ ,  $3.46 \text{ A}$ , dan  $3.40 \text{ A}$ . Bagi kuasa modul pula, nilai maksimum yang direkodkan untuk konfigurasi 1h, 3h, 4h dan 5h adalah  $47.91 \text{ W}$ ,  $47.25 \text{ W}$ ,  $45.82 \text{ W}$ , dan  $45.65 \text{ W}$ .

#### KECEKAPAN TERMA

Rajah 8 membentangkan suhu udara keluar dan juga kecekapan terma pada keamatan suria  $900 \text{ W/m}^2$ .



RAJAH 8. Suhu udara keluar (atas) dan kecekapan terma (bawah) pada keamatan suria  $900 \text{ W/m}^2$

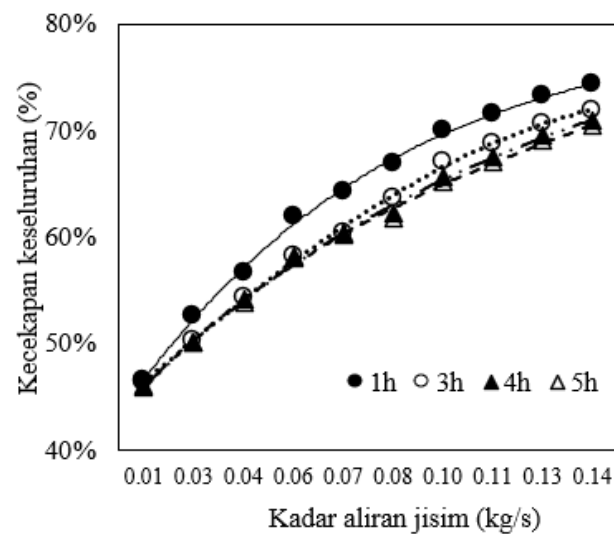
#### KECEKAPAN KESELURUHAN

Seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 9, konfigurasi 1h mempunyai kecekapan fotovolta dan terma sebanyak  $11.09\%$  dan  $63.2\%$  pada  $900 \text{ W/m}^2$  keamatan suria dan  $0.14 \text{ kg/s}$  kadar aliran jisim menyumbang kepada kecekapan keseluruhan PVT tertinggi dengan nilai bacaan sebanyak  $74.28\%$ . Hal ini seterusnya diikuti oleh konfigurasi 3h, 4h, dan 5h yang merekodkan kecekapan keseluruhan PVT maksimum sebanyak  $71.91\%$ ,  $70.87\%$ , dan  $70.40\%$ .

Berdasarkan pemerhatian, suhu udara keluar mula menurun apabila kadar aliran jisim bertambah. Konfigurasi 1h merekodkan bacaan suhu udara keluar yang paling tinggi berbanding dengan konfigurasi lain. Suhu udara keluar yang direkodkan oleh konfigurasi 1h berjalut antara  $34.37\text{--}42.22 \text{ }^\circ\text{C}$ . Suhu udara keluar untuk konfigurasi 3h, 4h dan 5h pula berjalut antara  $32.15\text{--}41.70 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $31.18\text{--}41.33 \text{ }^\circ\text{C}$ , dan  $30.74\text{--}41.46 \text{ }^\circ\text{C}$ . Suhu udara keluar bagi konfigurasi 1h adalah lebih tinggi kerana udara yang keluar dari pengumpul suria PVT adalah lebih perlahan berbanding dengan konfigurasi lain yang mempunyai lebih banyak saluran udara keluar pada plat jet. Suhu udara keluar yang lebih tinggi membantu untuk menaikkan kadar kecekapan terma pengumpul suria PVT. Kecekapan terma maksimum yang direkodkan untuk konfigurasi 1h adalah  $63.2\%$ , manakala bagi konfigurasi 3h, 4h, dan 5h pula adalah  $60.98\%$ ,  $60.01\%$  dan  $59.57\%$ .

Berdasarkan pemerhatian, menambahkan bilangan saluran udara keluar plat jet tidak memberi kesan positif kepada PJAPT kerana teknik PJAPT bertujuan untuk memampatkan udara di dalam cawan PJAPT dan meningkatkan halaju angin yang keluar melalui plat jet yang akan menggalakkan kesan pesentakan jet ke atas modul dwimuka. Apabila bilangan saluran udara keluar, halaju angin yang keluar melalui plat jet berkurang, sekali gus menghasilkan kesan pesentakan jet yang lemah.





RAJAH 9. Kecekapan keseluruhan PVT pada keamatan suria 900 W/m<sup>2</sup>.

#### KESIMPULAN

Eksperimen dalaman telah dijalankan ke atas empat jenis konfigurasi pesentakan jet aliran pekeliling terbalik (PJAPT) untuk mengkaji konfigurasi saluran udara keluar yang menyumbang kepada prestasi tenaga terbaik ke atas sebuah pengumpul fotovolta terma suria (PVT) modul dwimuka. PJAPT telah dipasang pada sebuah plat jet dengan empat jenis konfigurasi saluran udara keluar iaitu satu lubang (1h), tiga lubang (3h), empat lubang (4h), dan lima lubang (5h). Setiap konfigurasi telah diuji di bawah keamatan suria 900 W/m<sup>2</sup> menggunakan simulator suria dan kadar aliran jisim di antara 0.01 kg/s hingga 0.14 kg/s. Berdasarkan hasil kajian, konfigurasi 1h merekodkan kecekapan fotovolta tertinggi berbanding konfigurasi lain dengan nilai bacaan maksimum sebanyak 11.09% pada kadar aliran jisim 0.14 kg/s. Manakala bagi konfigurasi 3h, 4h, dan 5h pula, kecekapan fotovolta maksimum yang direkodkan adalah 10.93%, 10.86%, dan 10.83%. Bagi kecekapan terma pula, nilai kecekapan yang direkodkan untuk konfigurasi 1h, 3h, 4h, dan 5h adalah 63.2%, 60.98%, 60.01% dan 59.57% bawah 0.14 kg/s kadar aliran jisim.

Secara keseluruhannya, prestasi tenaga tertinggi yang dicapai adalah menggunakan konfigurasi 1h dengan kecekapan keseluruhan PVT sebanyak 72.35%. Ini menunjukkan bahawa meningkatkan bilangan saluran udara plat jet tidak memberikan kesan positif ke atas kecekapan fotovolta dan terma. Apabila bilangan saluran udara plat jet bertambah, misalnya kepada 3h, 4h dan 5h, halaju angin yang keluar melalui saluran udara keluar PJAPT adalah terlalu lemah dan perlahan. Sekali gus menghasilkan kesan pesentakan jet yang kurang. Kesan

pesentakan jet yang lemah menyebabkan kesan penurunan suhu modul PV yang tidak begitu efektif jika dibandingkan dengan kesan pesentakan jet yang di hasilkan oleh konfigurasi 1h. Hal demikian menyebabkan prestasi fotovolta juga tidak begitu efektif.

Di samping itu juga, suhu udara keluar bagi konfigurasi 1h adalah lebih tinggi kerana udara yang keluar dari pengumpul suria PVT adalah lebih perlahan berbanding dengan konfigurasi lain yang mempunyai lebih banyak saluran udara keluar pada plat jet. Hal ini disebabkan aliran udara yang lebih efektif berlaku di dalam pengumpul terma suria (PVT). Apabila saluran udara di tambah kepada 3h, 4h, dan 5h, aliran udara di dalam pengumpul PVT adalah lemah, sekali gus menghasilkan kecekapan terma yang rendah. Oleh itu, konfigurasi 1h adalah konfigurasi saluran udara keluar plat jet yang terbaik dan menghasilkan kecekapan fotovolta dan terma yang tertinggi jika dibandingkan dengan konfigurasi yang lain.

#### PENGHARGAAN

Penulis berterima kasih kepada Institut Penyelidikan Tenaga Suria, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia atas sokongan penyelidikan ini.

#### PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada

## REFERENCES

- Bassam Abdul Sahib, Kamaruzzaman Sopian, Adnan Ibrahim, Mohd Faizal Fauzan, Anwer Basim Al-Aasam & Ghaith Yahya Abusaibaa. 2023. Experimental analysis for the photovoltaic thermal collector (PVT) with nano PCM and micro-fins tube nanofluid. *Case Studies in Thermal Engineering* 41: 102579. DOI:https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102579.
- Brideau, Sébastien A. & Collins, Michael R. 2012. Experimental model validation of a hybrid PV/thermal air based collector with impinging jets. *Energy Procedia* 30: 44–54. DOI:https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.007.
- Brideau, Sébastien A. & Collins, Michael R. 2014. Development and validation of a hybrid PV/Thermal air based collector model with impinging jets. *Solar Energy* 102: 234–246. DOI:https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.022.
- Charles Ezugwu, Kelechi Onyekweredike, Adegboyega Odumade, Chisom Ezugwu, Stephen Ifionu, Amodu Oloyede & Okechukwu Omunakwe. 2022. A review on dam engineering practice and sustainability in Nigeria. *Jurnal Kejuruteraan* 34(5): 777–784. DOI:https://doi.org/10.17576/jkukm-2022-34(5)-03.
- Elumalai Vengadesan & Ramalingam Senthil. 2020. A review on recent developments in thermal performance enhancement methods of flat plate solar air collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 134: 110315. DOI:https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110315.
- Hosny Abou-Ziyan, Mohammed Ibrahim & Hala Abdel-Hameed. 2020. Characteristics enhancement of one-section and two-stepwise microchannels for cooling high-concentration multi-junction photovoltaic cells. *Energy Conversion and Management* 206: 112488. DOI:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112488.
- Li Yang & Irina Harun. 2022. Renewable energy scenarios for sustainable electricity in Malaysia and the application of analytical hierarchy process (AHP) for decision-making. *Jurnal Kejuruteraan* 34(6): 1271–1279. DOI:https://doi.org/10.17576/jkukm-2022-34(6)-27.
- Marhama Jelita & Habibis Saleh. 2023. Improvement of solar cell efficiency and electrical energy of a photovoltaic-thermal system by using nanofluid. *Jurnal Kejuruteraan* 35(3): 735–745.
- Mohammad Hemmat, Mohammad Hassan & Majid Valadkhani. 2020. Application of nanofluids and fluids in photovoltaic thermal system: An updated review. *Solar Energy* 199: 796–818. DOI:https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.015.
- Muhammad Amir Aziat Ishak, Adnan Ibrahim, Mohd Faizal, Ahmad Fazlizan, Win Eng & Hussein A. Kazem. 2023a. The effect of a reversed circular jet impingement on a bifacial module PVT collector energy performance. *Case Studies in Thermal Engineering* 52: 103752. DOI:https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103752.
- Muhammad Amir Aziat Ishak, Adnan Ibrahim, Ahmad Fazlizan, Mohd Faizal Fauzan, Kamaruzzaman Sopian & Aqil Afham Rahmat. 2023b. Exergy performance of a reversed circular flow jet impingement bifacial photovoltaic thermal (PVT) solar collector. *Case Studies in Thermal Engineering* 49: 103322. DOI:https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103322.
- Muhammad Amir Aziat Ishak, Adnan Ibrahim, Kamaruzzaman Sopian, Mohd Faizal Fauzan, Muhammad Aqil Afham Rahmat & Ag Sufiyan Abd Hamid. 2023c. Classification of jet impingement solar collectors: A recent development in solar energy technology. *International Journal of Renewable Energy Research-IJRER* 13(2): 802–817. DOI:https://doi.org/https://doi.org/10.20508/ijrer.v13i2.13884.g8755.
- Muhammad Amir Aziat Ishak, Adnan Ibrahim, Kamaruzzaman Sopian, Mohd Faizal Fauzan, Muhammad Aqil Afham Rahmat & Ag Sufiyan Abd Hamid. 2023d. Heat transfer performance of a novel circular flow jet impingement bifacial photovoltaic thermal PVT solar collector. *International Journal of Renewable Energy Research-IJRER* 13(2): 13. DOI:https://doi.org/https://doi.org/10.20508/ijrer.v13i2.13886.g8756.
- Muhammad Amir Aziat Ishak, Adnan Ibrahim, Kamaruzzaman Sopian, Mohd Faizal Fauzan, Muhammad Aqil Afham Rahmat & Nurul Jannah Yusaidi. 2023e. Performance and economic analysis of a reversed circular flow jet impingement bifacial PVT solar collector. *International Journal of Renewable Energy Development* 12(4): 780–788. DOI:https://doi.org/https://doi.org/10.14710/ijred.2023.54348.
- Muhammad Aqil Afham Rahmat, Ag Sufiyan Abd. Hamid, Yuanshen Lu, Muhammad Amir Aziat Ishak, Shaikh Zishan Suheel, Ahmad Fazlizan & Adnan Ibrahim. 2022. An analysis of renewable energy technology integration investments in Malaysia using HOMER pro. *Sustainability* 14(20): 13684. DOI:https://doi.org/10.3390/su142013684.
- Muhamad Zahin Mohd Ashhar & Chin Haw Lim. 2023. Development of amphibious mobile solar power generator with ultra water filtration system for disaster relief. *Jurnal Kejuruteraan* 35(2): 399–410. DOI:https://doi.org/10.17576/jkukm-2023-35(2)-11.

- Mukhlis Mokhtar, Samir Ahmad, Suhaila Sepeai, Norizam M. Daud & Saleem H. Zaidi. 2019. Inexpensive current-voltage system with electronically-controlled resistance under xenon arc light for solar cell efficiency measurements. *Jurnal Kejuruteraan* 31(2): 335–340. DOI:[https://doi.org/10.17576/jkukm-2019-31\(2\)-19](https://doi.org/10.17576/jkukm-2019-31(2)-19).
- Poorya Ooshaksaraei, Kamaruzzaman Sopian, Saleem H. Zaidi & Rozli Zulkifli. 2017. Performance of four air-based photovoltaic thermal collectors configurations with bifacial solar cells. *Renewable Energy* 102: 279–293. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.043>.
- Refat Moshery, Yong Chai Tan, Kamaruzzaman Sopian, Ahmad Fudholi & Ali H. Al-Waeli. 2021a. Thermal performance of jet-impingement solar air heater with transverse ribs absorber plate. *Solar Energy* 214: 355–366. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.11.059>.
- Refat Moshery, Yong Chai Tan, Kamaruzzaman Sopian, Ahmad Fudholi & Ali H. Al-Waeli. 2021b. Thermal performance of jet-impingement solar air heater with transverse ribs absorber plate. *Solar Energy* 214: 355–366. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.11.059>.
- Win Eng Ewe, Ahmad Fudholi, Kamaruzzaman Sopian & Nilofar Asim. 2021. Modeling of bifacial photovoltaic-thermal (PVT) air heater with jet plate. *International Journal of Heat and Technology* 39(4): 1117–1122. DOI:<https://doi.org/10.18280/ijht.390409>.