

Konfigurasi Saluran Udara Keluar Jet Pesentakan Aliran Pekeliling Terbalik Pengumpul Fotovolta Terma Suria (PVT)

(Outlet Configuration of a Reversed Circular Flow Jet Impingement Photovoltaic Thermal (PVT))

Muhammad Amir Aziat Ishak^{a*} & Adnan Ibrahim^{b*}

^a*School of Engineering, Faculty of Innovation & Technology, Taylor's University Lakeside Campus, Subang Jaya, Selangor, Malaysia*

^b*Institut Penyelidikan Tenaga Suria, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia*

*Corresponding author: iadnan@ukm.edu.my & amir.ishak@taylors.edu.my

Received 14 August 2024, Received in revised form 24 October 2024

Accepted 24 November 2024, Available online 30 January 2025

ABSTRACT

The utilization of the jet impingement technique is a prevalent approach in enhancing the efficiency of photovoltaic thermal (PVT) collector through the augmentation of heat transfer rate. The present work introduces a novel approach known as the reverse circular flow jet impingement (RCFJI) on a PVT collector. The performance analysis of the PVT collector was assessed through the utilization of CFD simulation. The RCFJI was installed to a jet plate which incorporates 36 holes. The holes were positioned at a spacing of 113.4 mm (x-axis) and 126 mm (y-axis). The air outlet channel of the jet plate has been configured into four different configurations: one hole (1h), three holes (3h), four holes (4h) and five holes (5h) to analyze the best outlet configuration leading to the highest energy performance. The simulation evaluation encompassed a range of solar irradiance spanning from 600 W/m² to 900 W/m², while the mass flow rates varied from 0.01 kg/s to 0.14 kg/s for each geometrical design. Based on the research, the configuration that records the highest efficiency was 1h. The maximum photovoltaic efficiency recorded was 11.38% at 600 W/m² and mass flow rate of 0.14 kg/s. While the maximum thermal efficiency was 63.2% at solar irradiance 900 W/m² and mass flow rate of 0.14 kg/s.

Keywords: Jet impingement; photovoltaic thermal; heat transfer; solar collector; CFD Simulation

ABSTRAK

Kaedah pesentakan jet kebiasaannya digunakan untuk meningkatkan prestasi pengumpul fotovolt terma suria (PVT) dengan meningkatkan kadar pemindahan haba. Kajian ini membentangkan sebuah teknik jet pesentakan aliran pekeliling terbalik (JPAPT) ke atas sebuah pengumpul suria PVT. Prestasi dan kecekapan tenaga pengumpul suria PVT dianalisis menggunakan simulasi CFD COMSOL. JPAPT telah dilekatkan pada plat jet yang mempunyai 36 lubang jet plat dengan jarak mengikut arus, $X = 113.4$ mm, dan jarak mengikut arus, $Y = 126$ mm. Saluran lubang udara keluar plat jet adalah 3mm dan telah divariasikan kepada empat konfigurasi iaitu satu lubang (1h), tiga lubang (3h), empat lubang (4h) dan lima lubang (5h) untuk mengkaji konfigurasi saluran udara keluar yang memberikan kecekapan paling tinggi kepada pengumpul suria PVT. Setiap reka bentuk konfigurasi telah diuji dengan keamatan suria antara 600 W/m² hingga 900 W/m² dengan kadar aliran jisim diantara 0.01 kg/s hingga 0.14 kg/s. Berdasarkan dapatan kajian, konfigurasi yang merekodkan kecekapan terbaik adalah dengan menggunakan konfigurasi 1h. Kecekapan fotovolt maksimum yang direkodkan adalah 11.38% pada keamatan suria 600 W/m² dan kadar aliran jisim 0.14 kg/s. Manakala kecekapan terma maksimum adalah 63.2% pada keamatan suria 900 W/m² dan kadar aliran jisim 0.14 kg/s.

Kata kunci: Pesentakan jet; fotovolt terma; pemindahan haba; pengumpul suria; Simulasi CFD

PENDAHULUAN

Perkembangan pesat dalam penggunaan pengeluaran tenaga di seluruh dunia meningkatkan keperluan untuk tenaga boleh baharu (Tawfik et al. 2022). Permintaan tenaga elektrik juga meningkat setiap hari (Esmer 2022). Sel suria berfungsi dengan mengambil foton sinaran suria dan menukarkannya kepada tenaga elektrik yang berguna. Menggunakan sumber tenaga boleh baharu, kecekapan tenaga dan peningkatan penggunaan elektrik secara kumulatif boleh menghasilkan pengurangan 94% dalam pelepasan karbon (Rahmat et al. 2022; Imad et al. 2023; Bhattacharya et al. 2016). Tenaga boleh baharu suria mempunyai jangka hayat antara 20 hingga 30 tahun (Ibrahim et al. 2011; Aziz et al. 2023; Assadeg et al. 2023; Al-Aasam et al. 2023). Kebelakangan ini, terdapat usaha yang ditumpu dalam komuniti saintifik untuk membangunkan teknologi yang mampu memanfaatkan dan mengubah pelbagai bentuk tenaga boleh baharu, terutamanya tenaga solar, kepada bentuk tenaga yang boleh digunakan (Ismail et al. 2022). Tenaga boleh baharu telah menunjukkan peningkatan yang ketara dalam beberapa tahun kebelakangan ini (Shahinzadeh et al. 2016; Bassam et al. 2023). Adalah penting untuk meneroka pendekatan alternatif untuk menggunakan tenaga suria dalam bentuk yang efektif untuk menggantikan bahan api fosil. Salah satu teknologi suria baharu ialah teknologi fotovolta terma suria (PVT) yang mengintegrasikan pemanasan haba suria dan penjanaan tenaga fotovolta dalam satu sistem yang sama (Ishak et al. 2023, 2023). Pengumpul suria jenis ini menggabungkan faedah fotovolta suria (PV) dan teknologi terma (T). Akan tetapi, penambahan haba daripada pendedahan kepada matahari memberi kesan buruk terhadap kecekapan fotovolta pengumpul suria. Keupayaan modul PV untuk menjana elektrik berguna berkurangan apabila suhunya meningkat akibat daripada pendedahan kepada matahari (Ishak et al. 2023; Ewe et al. 2021).

Salah satu aspek penting dalam meningkatkan kecekapan pengumpul suria PVT ialah sistem penyejukannya. Kaedah pesentakan jet adalah teknik yang sering digunakan untuk meningkatkan kecekapan pengumpul suria PVT dengan meningkatkan kadar pemindahan haba. Kaedah pesentakan jet, sama ada dengan menggunakan teknik muncung jet atau plat jet, telah menjadi tumpuan utama dalam penyelidikan terdahulu untuk meningkatkan atau memodulasi pemindahan haba (Barrau et al. 2011). Salah satu pendekatan pasif untuk meningkatkan penghantaran haba adalah dengan memperkenalkan aliran gelora di mana bendalir dan haba bercampur dengan cepat (Bhuiya et al. 2012). Kaedah ini adalah antara jenis aliran yang paling biasa digunakan dalam aplikasi pemindahan haba. Kajian penyelidikan

mengenai pemindahan haba perolakan dalam kedua-dua aliran lamina dan gelora telah melaporkan peningkatan pemindahan haba yang ketara dalam aliran gelora (Zubir et al. 2016; El Bécaye Maïga et al. 2005).

Kajian ini membentangkan sebuah teknik jet pesentakan aliran pekeliling terbalik (JPAPT) untuk menurunkan suhu sistem pengumpul fotovolta terma suria (PVT) di samping meningkatkan kecekapan fotovolta dan habanya. Simulasi analisis pemodelan dinamik (CFD) telah dijalankan untuk menganalisis empat jenis konfigurasi reka bentuk saluran udara keluar JPAPT. JPAPT dilekatkan pada bahagian belakang plat jet yang terdiri daripada 36 lubang udara plat jet dengan jarak mengikut arus, $X = 113.4$ mm, dan jarak mengikut arus, $Y = 126$ mm. Saluran udara keluar plat jet telah divariasikan kepada empat konfigurasi iaitu satu lubang (1h), tiga lubang (3h), empat lubang (4h) dan lima lubang (5h), seperti yang ditunjukkan pada Rajah 1. Setiap reka bentuk konfigurasi telah diuji dengan keamatan suria antara 600 W/m^2 hingga 900 W/m^2 untuk mengkaji konfigurasi saluran udara keluar yang memberikan kecekapan paling tinggi kepada pengumpul suria PVT. Nombor berjulat antara 2,738-14,170 untuk menggalakkan aliran gelora di sepanjang saluran udara.



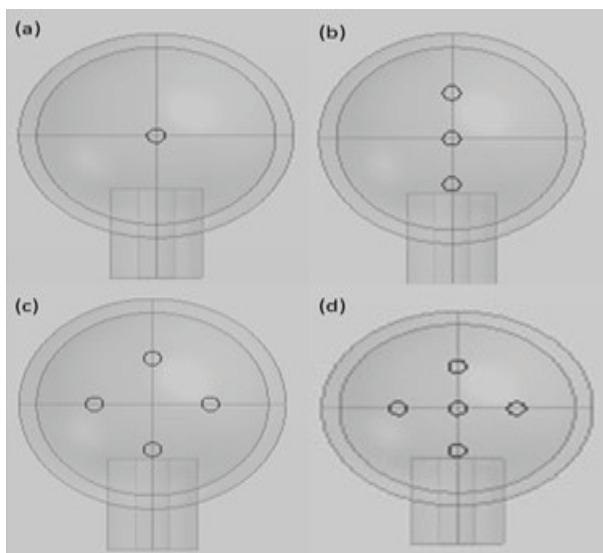
RAJAH 1. Konfigurasi reka bentuk saluran udara keluar (JPAPT): (a) satu lubang (1h), (b) tiga lubang (3h), (c) empat lubang (4h), dan lima lubang (5h).

ANALISIS KOMPUTERAN

MODEL GEOMETRI KOMPUTERAN

Analisis pemodelan dinamik bendalir (CFD) menggunakan COMSOL Multiphysics telah dijalankan untuk menganalisis

empat jenis konfigurasi reka bentuk saluran udara keluar JPAPT. Salur masuk udara cawan JPAPT ditetapkan kepada 6 mm dan saluran udara keluar plat jet adalah 3 mm untuk menggalakkan kesan pesentakan jet di samping meningkatkan halaju. JPAPT telah dilekatkan pada bahagian belakang plat jet (Ishak et al. 2023). Saluran udara keluar plat jet telah divariasikan kepada empat konfigurasi iaitu satu lubang (1h), tiga lubang (3h), empat lubang (4h) dan lima lubang (5h), seperti yang ditunjukkan pada Rajah 2 untuk mengenal pasti konfigurasi saluran udara keluar yang menghasilkan kecekapan tenaga yang paling baik. Cawan JPAPT dipasang di bahagian belakang plat jet yang terdiri daripada 36 lubang udara plat jet dengan jarak mengikut arus, $X = 113.4$ mm, dan jarak mengikut arus, $Y = 126$ mm. Dimensi pengumpul suria PVT ialah panjang, $L = 705$ mm, lebar, $W = 6784$ mm, dan kedalaman saluran, $d = 25$ mm. Parameter dan nilai asas boleh dirujuk pada Jadual 2. Bilangan saluran udara jet dan nilai jarak X dan Y plat jet dipilih berdasarkan kajian lepas yang telah terbukti mencapai kecekapan fotovolta dan kecekapan haba maksimum sebanyak 10.69% dan 51.09% pada keamatan suria 900 W/m^2 (Ewe et al. 2021). Diameter cawan JPAPT adalah 40 mm manakala kedalaman cawan JPAPT adalah 20 mm (Ishak et al. 2023). Setiap model disimulasikan menggunakan kadar aliran jisim antara 0.01-0.14 kg/s dengan keamatan suria antara 600-900 W/m^2 .

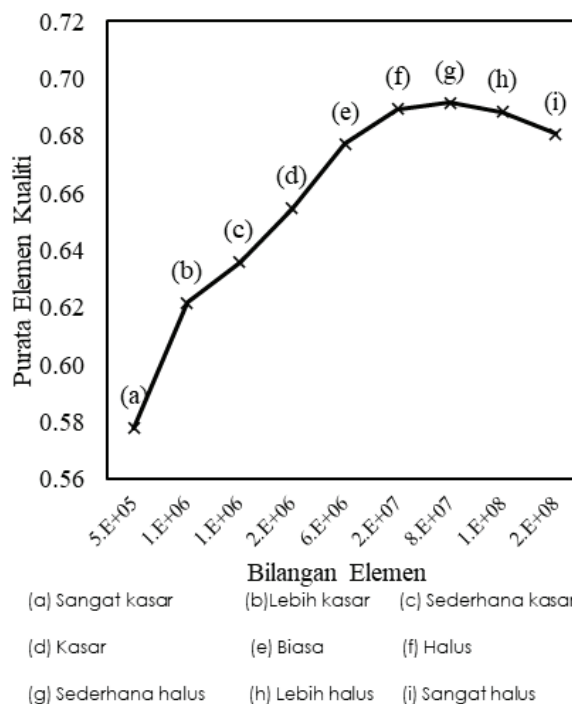


RAJAH 2. Konfigurasi saluran udara keluar plat jet (a) satu lubang (1h), (b) tiga lubang (3h), (c) empat lubang (4h), dan lima lubang (5h).

UJIAN KEBEBASAN JEJARING

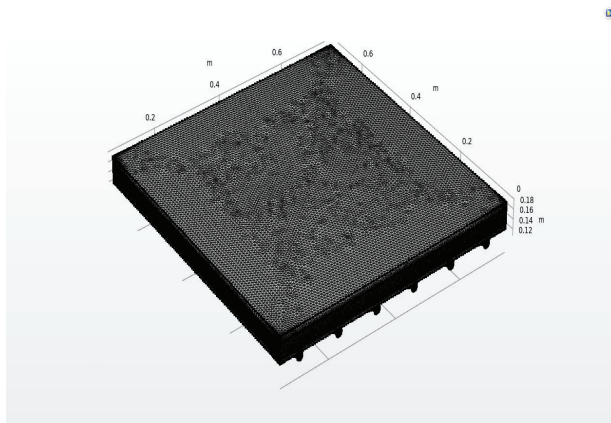
Model geometri jet pesentakan aliran terbalik (JPAPT) telah diuji dengan sembilan tetapan jejaring yang berbeza,

bermula dari tetapan jejaring yang paling rendah hingga yang tertinggi. Bilangan elemen dan purata kualiti elemen untuk setiap tetapan jejaring dianalisis untuk membezakan kualiti dan ketepatan antara jenis jejaring, seperti Rajah 3. Ujian Kebebasan jejaring dilakukan untuk membolehkan output simulasi mencapai tahap ketepatan tertinggi.



RAJAH 3. Ujian kebebasan jejaring untuk bilangan elemen terhadap purata kualiti elemen.

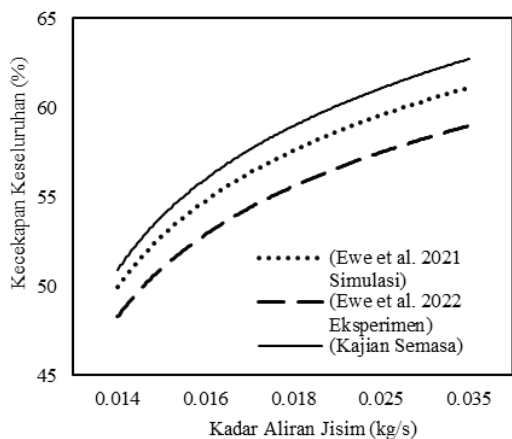
Ujian kebebasan jejaring telah dijalankan bermula daripada tetapan jejaring paling kasar sehingga tetapan jejaring yang paling halus. Bilangan elemen berjulat dari 488,094 hingga 178,316,508 dan purata kualiti elemen berjulat dari 0.578 hingga 0.681. Peratusan perbezaan antara purata kualiti elemen menurun daripada tetapan jejaring sangat kasar kepada halus. Walaubagaimanapun, apabila tetapan jejaring yang sederhana halus digunakan, peratusan perbezaan antara purata elemen kualiti mencapai nilai negatif 0.38%. Ini menunjukkan bahawa menggunakan tetapan jejaring melebihi tetapan sederhana halus tidak mempunyai kesan ketara ke atas ketepatan simulasi. Hal ini juga boleh diperhatikan daripada Rajah 3, tetapan jejaring sederhana halus mempunyai purata kualiti elemen tertinggi, iaitu 0.692. Oleh itu, tetapan jejaring sederhana halus digunakan dalam kajian simulasi ini, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 4.



RAJAH 4. Tetapan jejaringan (g) Sederhana halus yang digunakan dalam analisis simulasi.

UJIAN PENGESAHAN MODEL SIMULASI

Ketepatan tetapan model simulasi di validasikan melalui ujian pengesahan model simulasi. Kajian simulasi daripada Ewe et al. (2021) (Ewe et al. 2021) dan kajian eksperimen daripada Ewe et al. (2022) (Ewe et al. 2022) telah disimulasikan menggunakan syarat sempadan dan tetapan komputeran yang telah dibangunkan daripada kajian ini. Hanya kecekapan keseluruhan diambil kira untuk membandingkan hasil kajian semasa dengan kajian lepas. Tetapan reka bentuk pengumpul suria PVT ialah: lebar = 684 mm, panjang = 705 mm, kedalaman saluran = 25 mm, dan kadar aliran jisim = 0.014-0.035 kg/s. Berdasarkan Rajah 5, tetapan kajian semasa menunjukkan trend yang sama dengan hasil kajian hasil kajian terdahulu. Purata ketepatan antara kajian simulasi terdahulu ialah 97.7%, manakala ketepatan 94.3% diperhatikan jika dibandingkan dengan kajian eksperimen terdahulu, seperti yang dibentangkan dalam Jadual 1.



RAJAH 5. Ujian Pengesahan model simulasi dibandingkan dengan kajian terdahulu.

TETAPAN KOMPUTERAN DAN SYARAT SEMPADAN

Tetapan *Temperature-dependent* di dalam COMSOL Multiphysics telah dipilih untuk membolehkan analisis sifat domain bendalir dan pepejal dapat dilakukan secara serentak. Sebelum menjalankan simulasi, beberapa andaian telah di buat antaranya: (i) tiada kehilangan haba di dalam pengumpul suria PVT, (ii) Suhu kedua-dua belah modul dwimuka adalah sama dan, (iii) faktor pembungkusan ditetapkan kepada 0.66 (Ishak et al. 2023). Ciri pemindahan haba konjugat yang melibatkan penyepaduan pemindahan haba dan analisis bendalir telah digunakan untuk membolehkan penilaian menyeluruh terhadap kelakuan sistem. Aliran gelora telah diguna pakai dalam simulasi. Tetapan *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) juga telah digunakan untuk mensimulasikan aliran gelora dalam sistem. Untuk mewakili tingkah laku aliran dalam sistem dengan tepat, aliran bukan isoterma antara domain bendalir dan pepejal telah dimasukkan ke dalam simulasi. Suhu rujukan, T_{ref} dikekalkan malar pada 303.15 K. Manakala fluks haba perolakan juga disertakan di mana pekali pemindahan haba, h , ditetapkan kepada $9 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Simulasi telah dijalankan dengan kadar aliran jisim diantara 0.01-0.14 kg/s dan dengan keamatan suria antara 600-900 W/m^2 . Jadual 2 membentangkan parameter dan nilai asas yang digunakan dalam simulasi.

NOMBOR REYNOLDS

Nombor Reynolds digunakan untuk menentukan jenis aliran udara di dalam pengumpul suria PVT. Berdasarkan formula di bawah, Nombor Reynolds berjulat antara 2,738-14,170. Julat kadar aliran jisim antara 0.01-0.14 kg/s. Oleh itu tetapan pemindahan haba konjugat gelora digunakan

dalam COMSOL. Pemindahan haba konjugat menggabungkan analisis antara pemindahan haba dan aliran bendalir. Nombor Reynolds, Re , ditentukan menggunakan formula berikut (Fudholi et al. 2019):

$$\text{Nombor Reynolds} = \frac{\dot{m} Dh}{W \mu} \quad (1)$$

Di mana diameter hidraulik, Dh , dikira menggunakan (Ewe et al. 2022):

$$Dh = \frac{4 W d}{2 (W+d)} \quad (2)$$

Dan kelikatan udara dikira menggunakan (Ewe et al. 2022):

$$\mu = [1.983 + 0.00184 (T - 300)] \times 10^{-5} \quad (3)$$

FLUKS HABA PEROLAKAN

Fluks haba perolakan, q_0 , ditentukan menggunakan:

$$q_0 = h \cdot (T_{\text{keluar}} - T_{\text{masuk}}) \quad (4)$$

KECEKAPAN FOTOVOLTA

Kecekapan fotovolt, η_{PV} , system dikira menggunakan:

$$\eta_{PV} = \frac{P_{\text{max}}}{(I \times A_c)} \quad (5)$$

JADUAL 1. Ujian pengesahan model dengan membandingkan kecekapan keseluruhan daripada kajian terdahulu.

Kadar Aliran Jisim (kg/s)	Kecekapan Keseluruhan (%)					
	(Ewe et al. 2021) Simulasi	Kajian Semasa	Ralat (%)	(Ewe et al. 2022) Eksperimen	Kajian Semasa	Ralat (%)
0.014	51.51	52.57	2.02	50.16	52.57	4.59
0.016	53.44	54.50	1.95	51.31	54.5	5.86
0.018	55.11	56.42	2.32	52.68	56.42	6.62
0.025	59.49	61.01	2.49	57.09	61.01	6.42
0.035	63.48	65.16	2.58	61.99	65.16	4.87
Purata peratusan ralat (%)			2.27%	5.67%		
Purata peratusan ketepatan (%)			97.73%	94.33%		

Oleh kerana sistem pengumpul suria PVT sel suria dwimuka, kuasa maksimum, P_{max} , dikira menggunakan (Ewe et al. 2021):

$$P_{\text{max}} = I A_c \alpha_{PV} P (\eta_{pv\text{front}}) + I A_c \tau_i (1 - P) \eta_r \alpha_{PV} P (\eta_{pv\text{front}}) \quad (6)$$

Di mana kecekapan sel ditentukan menggunakan (Ewe et al. 2021):

$$\eta_{pv\text{front}} = \eta_{pv\text{rear}} = \eta_{\text{ref}} [1 - \beta (T_{pv} - T_{\text{ref}})] \quad (7)$$

KECEKAPAN TERMA

Kecekapan terma, η_{terma} , pengumpul suria PVT ditentukan menggunakan:

$$\eta_{\text{terma}} = \frac{Q_u}{(I \times A_c)} \quad (8)$$

Di mana penambahan haba berguna, Q_u , dikira menggunakan:

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_{\text{keluar}} - T_{\text{masuk}}) \quad (9)$$

KECEKAPAN KESELURUHAN

Kecekapan keseluruhan pengumpul PVT boleh dinyatakan seperti berikut:

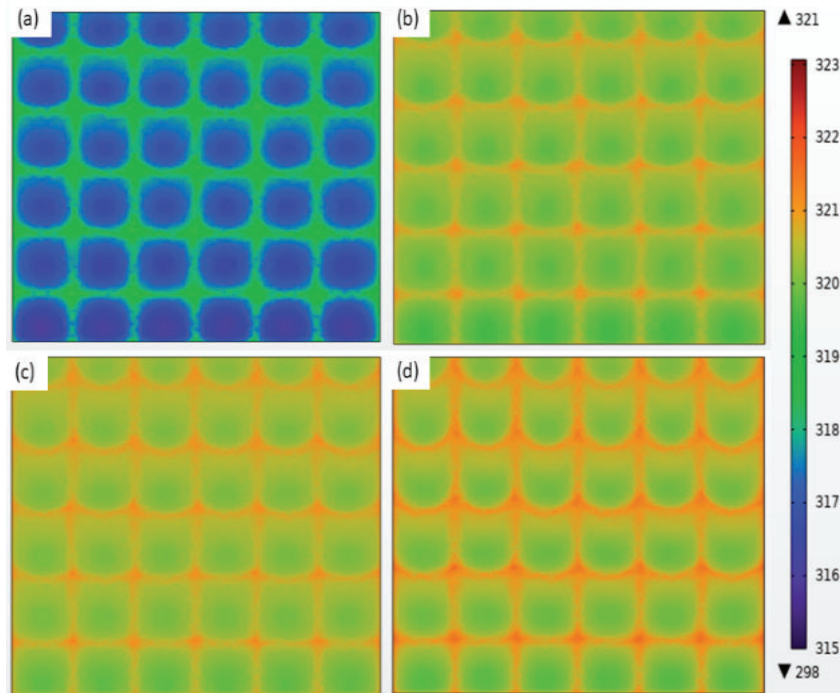
$$\eta_{\text{keseluruhan}} = \eta_{\text{pv}} + \eta_{\text{terma}} \quad (10)$$

HASIL DAN PERBINCANGAN

KONTUR SUHU MODUL PV

Suhu modul PV telah dianalisis untuk menilai kecekapan fotovolta empat jenis konfigurasi reka bentuk saluran udara

keluar JPAPT di bawah keamatan suria malar $900\text{W}/\text{m}^2$ seperti yang dipaparkan pada Rajah 6. Daripada pemerhatian, dapat dilihat bahawa konfigurasi 1h mempunyai kontur suhu yang lebih rendah berbanding konfigurasi yang lain. Kontur warna biru dan hijau lebih jelas kelihatan pada konfigurasi 1h yang menunjukkan kadar suhu yang lebih rendah. Berdasarkan hasil dapatan simulasi, meningkatkan bilangan saluran udara keluar JPAPT tidak memberi manfaat pada suhu PV modul. Kontur suhu modul PV menunjukkan peningkatan suhu yang jelas apabila bilangan saluran udara keluar JPAPT meningkat. Titik panas berwarna merah dan hijau juga adalah lebih ketara pada konfigurasi 5h yang menandakan kontur suhu yang lebih panas. Secara keseluruhannya, suhu modul PV untuk konfigurasi 1h, 3h, 4h, dan 5h pada $900\text{W}/\text{m}^2$ adalah $43.90\text{-}54.69\text{ }^\circ\text{C}$, $47.05\text{-}54.74\text{ }^\circ\text{C}$, $48.29\text{-}54.79\text{ }^\circ\text{C}$, dan $48.87\text{-}54.77\text{ }^\circ\text{C}$.

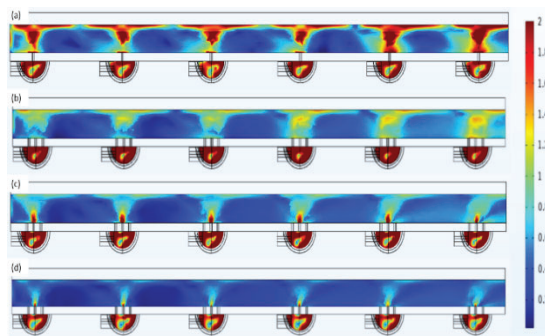


RAJAH 6. Perbezaan kontur suhu PV (a) 1h, (b) 3h, (c) 4h, dan (d) 5h pada $900\text{W}/\text{m}^2$ dan kadar aliran jisim $0.14\text{kg}/\text{s}$.

KONTUR HALAJU DAN GARISAN STRIM JPAPT

Rajah 7 menunjukkan kontur halaju JPAPT bagi keempat-empat konfigurasi saluran udara keluar. Pada pemerhatian, konfigurasi 1h menunjukkan kontur halaju yang paling tinggi berbanding dengan konfigurasi yang lain. Hal ini kerana udara mampat di dalam cawan JPAPT dipaksa keluar melalui satu saluran udara keluar plat jet sahaja menyebabkan halaju udara lebih tinggi dan kesan

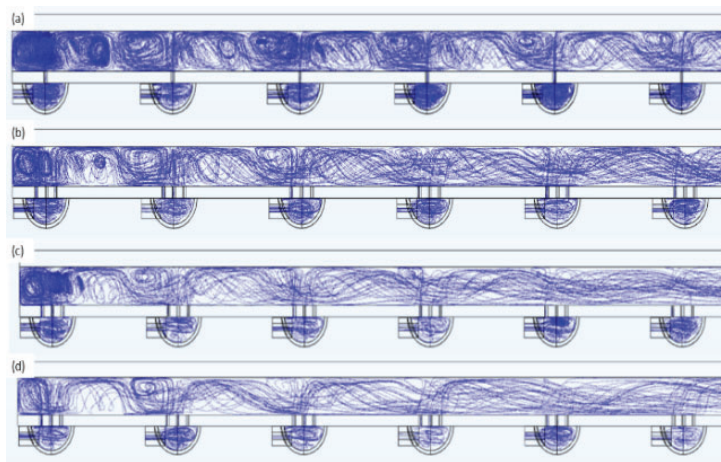
pesentakan yang lebih efektif. Kontur berwarna merah yang menunjukkan halaju yang tinggi lebih jelas kelihatan pada konfigurasi 1h berbanding dengan konfigurasi lain. Apabila kontur halaju dianalisis, dapat di simpulkan bahawa kesan halaju udara dan kesan pesentakan jet mula berkurang apabila bilangan saluran udara keluar JPAPT bertambah. Hal ini adalah kerana apabila bilangan saluran udara keluar bertambah, kawasan saluran udara keluar makin besar menyebabkan tekanan udara di dalam cawan JPAPT kurang mampat.



RAJAH 7. Kontur halaju JPAPT; (a) 1h, (b) 3h, (c) 4h, dan (d) 5h pada kadar aliran jisim 0.14kg/s.

Garisan strim udara dapat dirujuk pada Rajah 8. Aliran gelora jelas kelihatan pada garisan strim udara konfigurasi 1h. Ciri-ciri berpusar campuran aliran gelora membantu untuk meningkatkan kadar pemindahan haba dan menghalang pembentukan lapisan sempadan pada permukaan teras pemindahan haba. Kajian penyelidikan mengenai pemindahan haba perolakan dalam kedua-dua aliran lamina dan gelora telah melaporkan peningkatan

pemindahan haba yang ketara dalam aliran gelora (Zubir et al. 2016; El Bécaye Maïga et al. 2005). Apabila bilangan saluran udara keluar bertambah, kesan aliran gelora pada garisan strim di dapati mula berkurang seperti yang ditunjukkan pada konfigurasi 3h, 4h, dan 5h. Akibat daripada itu, kadar pemindahan haba juga tidak begitu efektif berbanding dengan konfigurasi 1h.

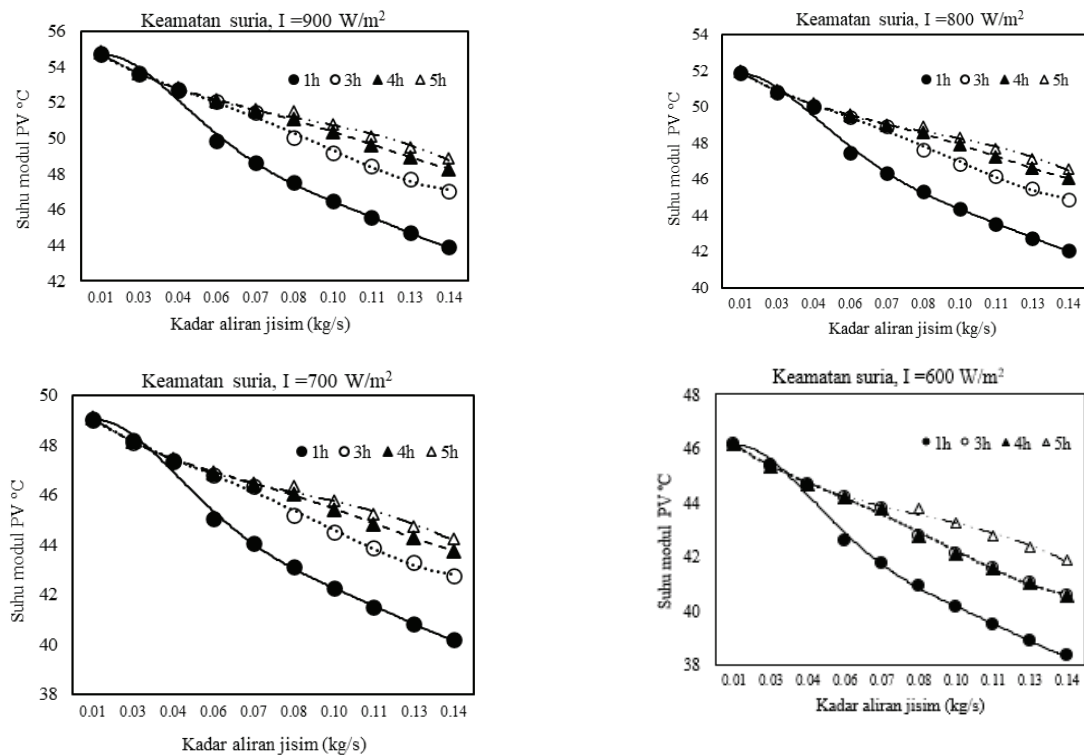


RAJAH 8. Garisan strim JPAPT; (a) 1h, (b) 3h, (c) 4h, dan (d) 5h pada kadar aliran jisim 0.14kg/s.

KECEKAPAN FOTOVOLTA

Suhu modul PV dalam Rajah 9 menunjukkan aliran menurun untuk keempat-empat konfigurasi saluran udara keluar JPAPT. Daripada pemerhatian, suhu PV juga menurun apabila kadar aliran jisim dan keamatan suria menurun. Merujuk kepada persamaan (5), suhu modul PV adalah berkadar terus dengan kecekapan fotovolta. Oleh itu, menurunkan suhu modul PV boleh meningkatkan kecekapan fotovolta. Berdasarkan Rajah 9, konfigurasi 1h

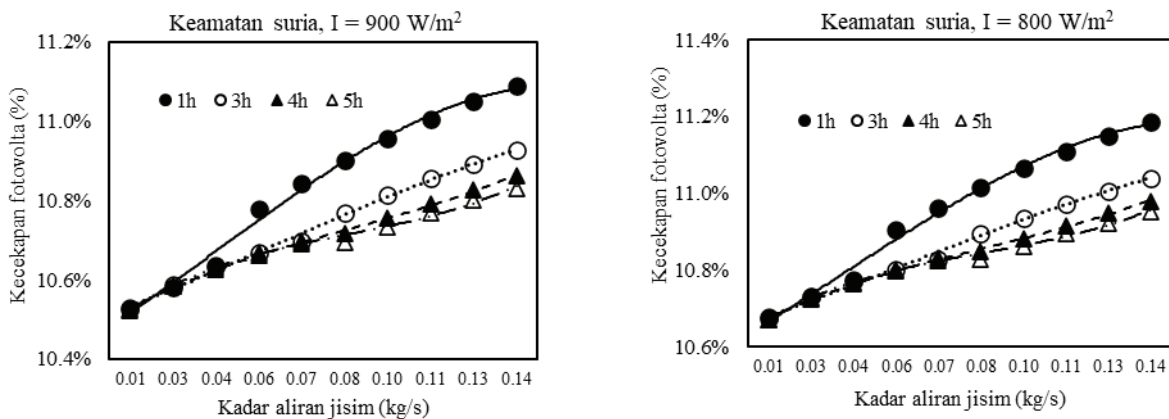
mempunyai suhu PV paling rendah berbanding kepada konfigurasi yang lain. Suhu terendah yang direkodkan ialah pada keamatan suria 600 W/m^2 pada kadar aliran jisim 0.14 kg/s yang merekodkan bacaan $38.32 \text{ }^\circ\text{C}$. Di bawah keadaan operasi yang sama, suhu modul PV yang dicatatkan untuk konfigurasi 3h, 4h, dan 5h ialah $40.58 \text{ }^\circ\text{C}$, $41.47 \text{ }^\circ\text{C}$, dan $41.88 \text{ }^\circ\text{C}$. Apabila diuji di bawah keamatan suria yang tertinggi 900 W/m^2 , suhu PV modul yang terendah direkodkan untuk konfigurasi 1h, 3h, 4, dan 5h ialah $43.90 \text{ }^\circ\text{C}$, $47.05 \text{ }^\circ\text{C}$, $48.29 \text{ }^\circ\text{C}$, dan $48.87 \text{ }^\circ\text{C}$.



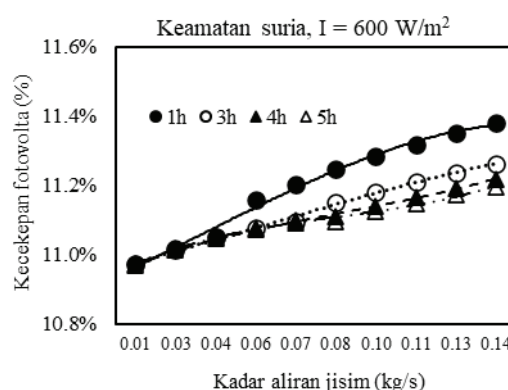
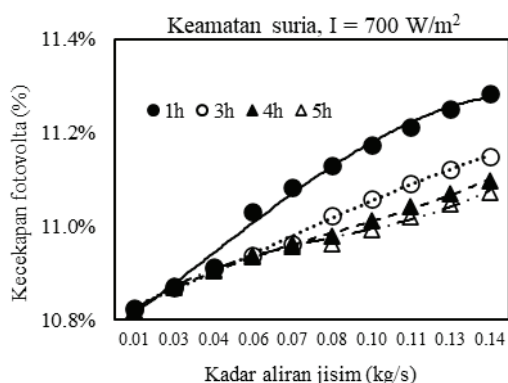
RAJAH 9. Perbezaan suhu PV pada tahap keamatan suria yang berbeza.

Kecekapan fotovolta meningkat apabila kadar aliran jisim meningkat dan keamatan suria menurun. Hal ini selari dengan hasil kajian yang dibentangkan dalam Rajah 9. Suhu modul PV memainkan peranan penting ke atas kecekapan fotovolta. Keadaan modul yang mempunyai suhu yang lebih rendah memberikan kecekapan fotovolta yang lebih baik. Rajah 10, menunjukkan bahawa konfigurasi 1h mempunyai kecekapan fotovolta yang tertinggi berbanding konfigurasi lain. Ini adalah disebabkan, angin di dalam cawan JPAPT adalah lebih padat dan menghasilkan halaju udara yang lebih tinggi dan kesan jet pesentakan yang lebih efektif berbanding konfigurasi lain. Apabila saluran udara keluar ditambah, udara di dalam

cawan JPAPT kurang padat kerana udara telah terbias keluar dan menyebabkan halaju udara dan kesan pesentakan jet pada PV modul berkurang. Oleh sebab itu, konfigurasi mempunyai kadar pemindahan haba yang lebih tinggi dan membantu untuk menurunkan suhu modul PV sekali gus meningkatkan kecekapan fotovolta. Kecekapan maksimum yang dicapai dengan menggunakan konfigurasi 1h ialah 11.38% pada keamatan suria 600 W/m^2 dan kadar aliran jisim 0.14 kg/s . Manakala dalam keadaan sama, kecekapan fotovolta maksimum oleh konfigurasi 3h, 4h, dan 5h ialah 11.26%, 11.22%, dan 11.20%. Pada keamatan suria 900 W/m^2 , kecekapan fotovolta untuk konfigurasi 1h, 3h, 4h, dan 5h ialah 11.09%, 10.93%, 10.86% dan 10.83%.



bersambung ...

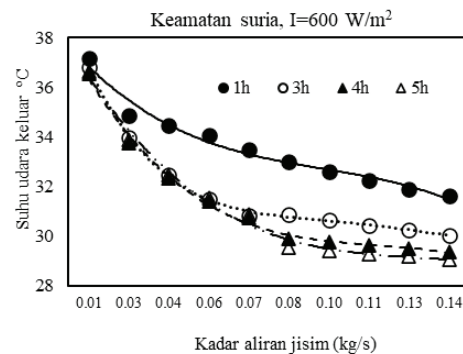
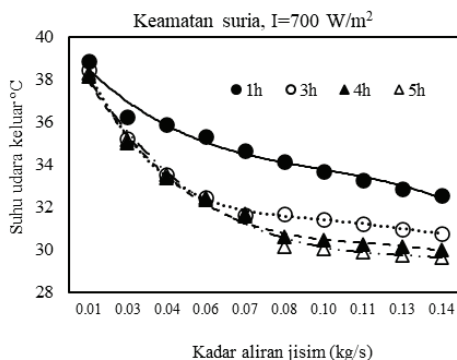
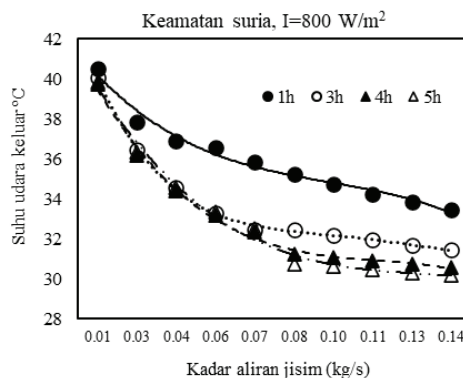
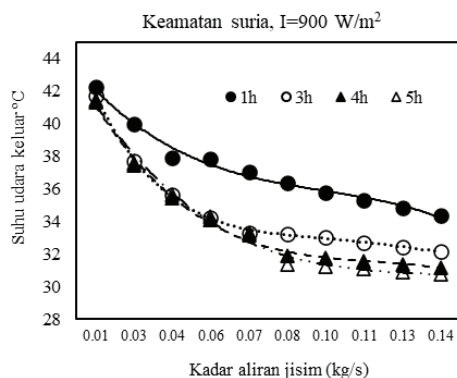


RAJAH 10. Perbezaan kecekapan fotovolta pada tahap keamatan suria yang berbeza.

KECEKAPAN TERMA

Suhu udara keluar direkodkan pada setiap tahap keamatan suria yang diuji. Aliran menurun pada suhu udara keluar boleh diperhatikan pada Rajah 11 apabila kadar aliran jisim meningkat untuk kesemua konfigurasi. Walau bagaimanapun, konfigurasi 5h mempunyai suhu udara keluar yang paling rendah berbanding dengan konfigurasi yang lain untuk kesemua tahap keamatan suria yang diuji. Peningkatan pada kadar aliran jisim menyebabkan suhu

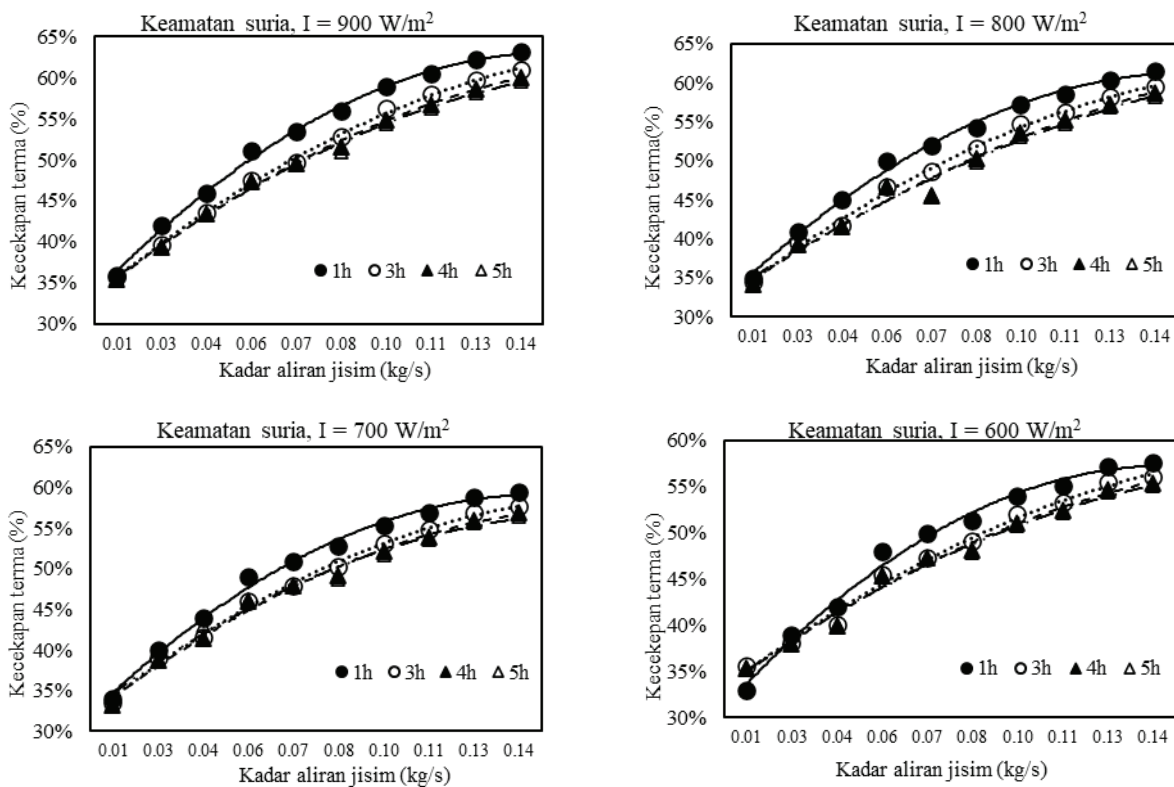
udara keluar menurun kerana haba di dalam pengumpul suria PVT telah dipindahkan. Suhu udara keluar terendah yang direkodkan ialah 29.07 °C menggunakan konfigurasi 5h pada keamatan suria 600 W/m² dan kadar aliran jisim 0.14 kg/s. Manakala itu, suhu udara keluar yang tertinggi ialah menggunakan konfigurasi 1h dengan merekodkan baca suhu sebanyak 34.37 °C pada 900 W/m² dan kadar aliran jisim 0.14 kg/s. Pada keadaan ini, suhu maksimum yang direkodkan untuk konfigurasi 3h, 4h dan 5h ialah 32.15 °C, 31.18 °C, dan 30.78 °C.



RAJAH 11. Perbezaan suhu udara keluar pada tahap keamatan suria yang berbeza.

Pada Rajah 12, dapat diperhatikan bahawa kecekapan terma adalah berkadar terus dengan kadar aliran jisim. Kecekapan terma bertambah baik apabila kadar aliran jisim meningkat. Konfigurasi 1h merekodkan kecekapan terma yang tertinggi dengan nilai bacaan 63.2% pada keamatan suria 900 W/m² dan kadar aliran jisim 0.14 kg/s. Sementara itu, kecekapan terma untuk konfigurasi 3h, 4h dan 5h di bawah keadaan yang sama ialah 60.98%, 60.01% dan 59.57%. Konfigurasi 1h mempunyai kadar kecekapan terma yang tertinggi disebabkan mempunyai suhu udara yang lebih tinggi berbanding dengan konfigurasi yang lain seperti yang di tunjukkan pada Rajah 12. Saluran udara di

dalam 1h adalah lebih padat menyebabkan halaju angin keluar yang lebih tinggi dan kesan pesentakan jet yang lebih efektif. Akan tetapi, udara yang keluar dari pengumpul suria PVT adalah lebih perlahan berbanding dengan konfigurasi lain yang mempunyai lebih banyak saluran udara keluar pada plat jet. Ini menyebabkan haba panas di dalam pengumpul suria PVT lebih tinggi berbanding konfigurasi lain dan menyebabkan kecekapan terma yang lebih tinggi. Pada keamatan suria yang terendah iaitu 600 W/m², kecekapan terma maksimum yang direkodkan untuk konfigurasi 1h, 3h, 4h, dan 5h ialah 57.6%, 56.08%, 55.40%, dan 55.10%.

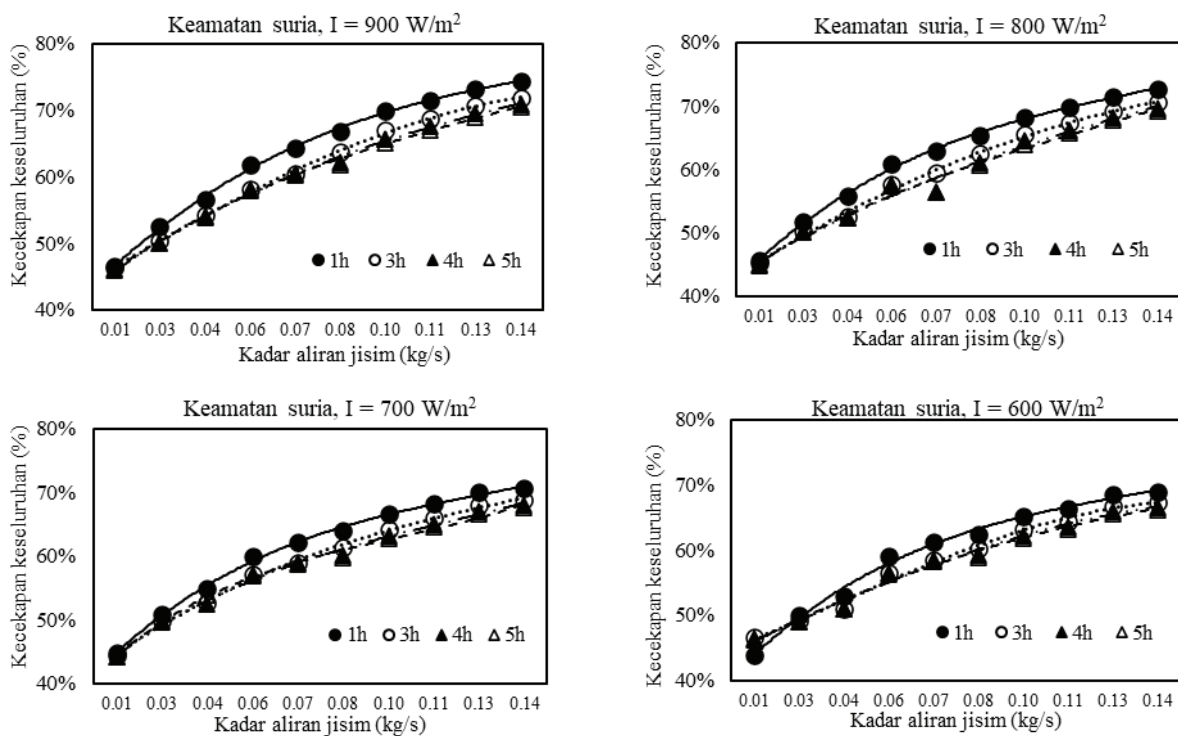


RAJAH 12. Perbezaan kecekapan terma pada tahap keamatan suria yang berbeza.

KECEKAPAN KESELURUHAN

Kecekapan keseluruhan untuk setiap konfigurasi telah dianalisis untuk mengenal pasti konfigurasi saluran udara keluar plat jet untuk JPAPT. Kecekapan keseluruhan JPAPT dapat diperhatikan pada rajah 13. Berdasarkan pemerhatian, kecekapan fotovolta dan terma tertinggi yang diperolehi

adalah dengan menggunakan konfigurasi. Hal ini diikuti seterusnya dengan 3h, 4h dan 5h. Ini menunjukan menambahkan bilangan saluran udara keluar pada plat jet tidak membantu untuk menaikkan kecekapan keseluruhan sistem JPAPT. Pada keamatan suria tertinggi iaitu 900 W/m², kecekapan keseluruhan tertinggi yang direkodkan oleh konfigurasi 1h, 3h, 4h, dan 5h ialah 74.28%, 71.91%, 70.87% dan 70.40%.



RAJAH 13. Perbezaan kecekapan keseluruhan pada tahap keamatan suria 900 W/m^2 .

KESIMPULAN

Kajian ini membentangkan sebuah teknik JPAPT ke atas sebuah pengumpul suria PVT. Saluran lubang udara keluar plat jet adalah 3mm dan telah divariasikan kepada empat konfigurasi iaitu satu lubang (1h), tiga lubang (3h), empat lubang (4h) dan lima lubang (5h) untuk mengkaji konfigurasi saluran udara keluar yang memberikan kecekapan paling tinggi kepada pengumpul suria PVT. Secara kesimpulannya, konfigurasi 1h, mempunyai kecekapan fotovolta dan terma yang tertinggi berbanding dengan konfigurasi lain. Kecekapan fotovolta maksimum dapat diperhatikan apabila berapa di bawah keamatan suria 600 W/m^2 , dengan kecekapan maksimum sebanyak 11.38% bagi konfigurasi 1h. Manakala di bawah keamatan suria yang sama, kecekapan fotovolta maksimum untuk konfigurasi 3h, 4h dan 5h ialah 11.26%, 11.22%, dan 11.20%. Pada keamatan suria 900 W/m^2 , kecekapan fotovolta untuk konfigurasi 1h, 3h, 4h, dan 5h ialah 11.09%, 10.93%, 10.86% dan 10.83%. Di segi kecekapan terma pula, bacaan maksimum yang direkodkan antara pada keamatan suria 900 W/m^2 dengan bacaan kecekapan untuk 1h, 3h, 4h, dan 5h sebanyak 63.2%, 60.98%, 60.01% dan 59.57%. Konfigurasi 1h mempunyai kadar kecekapan terma yang tertinggi disebabkan mempunyai suhu udara yang lebih tinggi berbanding dengan konfigurasi yang lain.

Di samping itu, kecekapan keseluruhan tertinggi yang direkodkan oleh konfigurasi 1h, 3h, 4h, dan 5h ialah 74.28%, 71.91%, 70.87% dan 70.40%.

JADUAL 2. Parameter dan nilai asas.

Parameter	Nilai
Kadar aliran jisim, \dot{m}	0.1 – 0.14 kg/s
Lebar pengumpul, W	684mm
Panjang pengumpul, L	705mm
Kedalaman salur, d	25mm
Keamatan suria, I (W/m^2)	600, 700, 800, 900
Luas pengumpul, A_c	0.481 m^2
Suhu persekitaran, T_a	30°C
Penyerapan sel PV, α_{pv}	0.91
Faktor pembungkusan, P	0.66
Pekali pemindahan haba, h	$9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Suhu luaran, T_{ext}	30°C
Penghantaran laminasi, T_1	0.85
Pemantulan plat jet, n_r	0.7
Kecekapan elektrik pada keadaan rujukan, n_{ref}	0.16
Pekali suhu, β	0.0045 K^{-1}
Suhu pada keadaan rujukan, T_{ref}	303.15 K

PENGHARGAAN

Kajian ini disokong oleh Institut Penyelidikan Tenaga Suria, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia

PENGISYTIHARAN MINAT BERSAING

Tiada.

REFERENCES

- Al-Aasam, Anwer Basim., Ibrahim, Adnan., Sopian, Kamaruzzaman., Abdulsahib, M. Bassam, & Dayer, Mojtaba. 2023. Enhancing the Performance of Photovoltaic Thermal Solar Collectors using Twisted Absorber Tubes and Nanofluids with Optimal Design Parameters. *International Journal of Renewable Energy Research* 13(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.20508/ijrer.v13i3.14163.g8799>
- Assadeg, Jalal, Sopian, Kamaruzzaman, Ibrahim, Adnan, Fudholi, Ahmad, Fatima, Noshin, Al-Waeli, Ali H. A., & Hamid, Ag Sufiyan Abd. 2023. Thermal and Thermo-hydraulic Performance of Finned Double-Pass Solar Air Collector Utilizing Cylindrical Capsules Nano-Enhanced PCM. *International Journal of Renewable Energy Research* 13(1): 125–135. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v13i1.13880.g8668>
- Aziz, Muhammad Syazwan Bin, Ibrahim, Adnan, & Ishak, Muhammad Amir Aziat. 2023. Energy performance evaluation of a photovoltaic thermal phase change material (PVT-PCM) using a spiral flow configuration. *International Journal of Renewable Energy Development* 12(5): 952–958. <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.56052>
- Barrau, Jérôme, Rosell, Joan, Chemisana, Daniel, Tadrst, Lounes, & Ibañez, M. 2011. Effect of a hybrid jet impingement/micro-channel cooling device on the performance of densely packed PV cells under high concentration. *Solar Energy* 85(11): 2655–2665. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.08.004>
- Bassam, Abdulsahib M., Sopian, Kamaruzzaman, Ibrahim, Adnan, Al-Aasam, Anwer B., & Dayer, Mojtaba. 2023. Experimental analysis of photovoltaic thermal collector (PVT) with nano PCM and micro-fins tube counterclockwise twisted tape nanofluid. *Case Studies in Thermal Engineering* 45(November 2022): 102883. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102883>
- Bhattacharya, Mita, Paramati, Sudharshan Reddy, Ozturk, Ilhan, & Bhattacharya, Sankar. 2016. The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries. *Applied Energy* 162: 733–741. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.104>
- Bhuiya, M. M. K., Chowdhury, M. S. U., Islam, M., Ahamed, J. U., Khan, M. J. H., Sarker, M. R. I., & Saha, M. 2012. Heat transfer performance evaluation for turbulent flow through a tube with twisted wire brush inserts. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 39(10): 1505–1512. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.10.005>
- El Bécaye Maïga, Sidi, Palm, Samy Joseph, Nguyen, Cong Tam, Roy, Gilles, & Galanis, Nicolas. 2005. Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 26(4 SPEC. ISS.): 530–546. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2005.02.004>
- Esmer, Sadullah. 2022. *Design of PMASynRM for Flywheel Energy Storage System in Smart Grids* 6(4): 0–7.
- Ewe, Win Eng., Fudholi, Ahmad., Sopian, Kamaruzzaman., Asim, Nilofar., Ahmudiarto, Yoyon., & Salim, Agus. 2021. Overview on Recent PVT Systems with Jet Impingement. *International Journal of Heat and Technology* 39(6): 1951–1956. <https://doi.org/10.18280/ijht.390633>
- Ewe, Win Eng., Fudholi, Ahmad., Sopian, Kamaruzzaman., & Asim, Nilofar. 2021. Modeling of bifacial photovoltaic-thermal (PVT) air heater with jet plate. *International Journal of Heat and Technology* 39(4): 1117–1122. <https://doi.org/10.18280/ijht.390409>
- Ewe, Win Eng., Fudholi, Ahmad., Sopian, Kamaruzzaman., Moshery, Refat, Asim, Nilofar, Nuriana, Wahidin., & Ibrahim, Adnan. (2022). Thermo-electro-hydraulic analysis of jet impingement bifacial photovoltaic thermal (JIBPVT) solar air collector. *Energy* 254: 124366. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124366>
- Fudholi, Ahmad, Zohri, Muhammad, Rukman, Nurul Shahirah Binti, Nazri, Nurul Syakirah, Mustapha, Muslizainun, Yen, Chan Hoy, Mohammad, Masita, & Sopian, Kamaruzzaman. 2019. Exergy and sustainability index of photovoltaic thermal (PVT) air collector: A theoretical and experimental study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 100(July 2018): 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.019>
- Ibrahim, Adnan, Othman, Mohd Yusof, Ruslan, Mohd Hafidz, Mat, Sohif, & Sopian, Kamaruzzaman. 2011. Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(1): 352–365. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.024>
- Imad, Sahibzada, Ibrahim, Adnan, Sopian, Kamaruzzaman, Fazlizan, Ahmad, & Ishak, Muhammad Amir Aziat Bin. 2023. Performance analysis of a novel photovoltaic thermal PVT double pass solar air heater with cylindrical PCM capsules using CFD. *International Journal of Renewable*

- Energy Research* 13(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.20508/ijrer.v13i3.14136.g8814>
- Ishak, Muhammad Amir Aziat Bin, Ibrahim, Adnan, Faizal, Mohd, Fazlizan, Ahmad, Eng, Win, & Kazem, Hussein A. 2023. The effect of a reversed circular jet impingement on A bifacial module PVT collector energy performance. *Case Studies in Thermal Engineering* 52(November): 103752. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103752>
- Ishak, Muhammad Amir Aziat Bin., Ibrahim, Adnan., Fazlizan, Ahmad., Fauzan, Mohd Faizal., Sopian, Kamaruzzaman., & Rahmat, Muhammad Aqil Afham. 2023. Exergy performance of a reversed circular flow jet impingement bifacial photovoltaic thermal (PVT) solar collector. *Case Studies in Thermal Engineering* 49. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103322>
- Ishak, Muhammad Amir Aziat Bin., Ibrahim, Adnan., Sopian, Kamaruzzaman., Fauzan, Mohd Faizal., Rahmat, Muhammad Aqil Afham., & Hamid, Ag sufiyan Abd. 2023. Classification of Jet Impingement Solar Collectors – A Recent Development in Solar Energy Technology. *International Journal of Renewable Energy Research-IJRER* 13(2): 802–817. <https://doi.org/https://doi.org/10.20508/ijrer.v13i2.13884.g8755>
- Ishak, Muhammad Amir Aziat Bin., Ibrahim, Adnan., Sopian, Kamaruzzaman., Fauzan, Mohd Faizal., Rahmat, Muhammad Aqil Afham., & Hamid, Ag sufiyan Abd. 2023. *Heat Transfer Performance of a Novel Circular Flow Jet Impingement Bifacial Photovoltaic Thermal PVT Solar Collector*. 13(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.20508/ijrer.v13i2.13886.g8756>
- Ishak, Muhammad Amir Aziat Bin., Ibrahim, Adnan., Sopian, Kamaruzzaman., Fauzan, Mohd Faizal., Rahmat, Muhammad Aqil Afham., & Yusaidi, Nurul Jannah. 2023. 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/ijred.2023.54348>
- Ismail, Amar Fahmi, Hamid, Ag Sufiyan Abd, Ibrahim, Adnan, Jarimi, Hasila, & Sopian, Kamaruzzaman. 2022. Performance analysis of a double pass solar air thermal collector with porous media using lava rock. *Energies* 15(3). <https://doi.org/10.3390/en15030905>
- Rahmat, Muhammad Aqil Afham., Hamid, Ag Sufiyan Abd., Lu, Yuanshen., Ishak, Muhammad Amir Aziat Bin., Suheel, Shaikh Zishan., Fazlizan, Ahmad., & Ibrahim, Adnan. 2022. An Analysis of Renewable Energy Technology Integration Investments in Malaysia Using HOMER Pro. *Sustainability (Switzerland)*:14(20). <https://doi.org/10.3390/su142013684>
- Shahinzadeh, Hossein, Gheiratmand, Alireza, Moradi, Jalal, & Fathi, S. Hamid. 2016. Simultaneous operation of near-to-sea and off-shore wind farms with ocean renewable energy storage. *4th Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation, ICREDG 2016, April*, 38–44. <https://doi.org/10.1109/ICREDG.2016.7875916>
- Tawfik, T. M., Badr, M. A., Abdellatif, O. E., Zakaria, H. M., & EL-Bayoumi, M. 2022. Techno-Enviro-Economic Evaluation for Hybrid Energy System Considering Demand Side Management. *International Journal of Renewable Energy Research* 12(2): 623–635. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v12i2.12805.g8449>
- Zubir, Mohd Nashrul Mohd, Muhamad, Mohd Ridha, Amiri, Ahmad, Badarudin, A., Kazi, S. N., Oon, Cheen Sean, Abdullah, Hussein Togun, Gharehkhani, Samira, & Yarmand, Hooman. 2016. Heat transfer performance of closed conduit turbulent flow: Constant mean velocity and temperature do matter! *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 64: 285. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.04.013>