

DEVELOPMENT AND PERFORMANCE OF A SOLAR DRYER HYBRID PHOTOVOLTAIC THERMAL SYSTEM

PEMBANGUNAN DAN PRESTASI SISTEM PENGERING SURIA HIBRID FOTOVOLTAN TERMA

Article history

Received
8 April 2020
Received in revised form
18 August 2022
Accepted
13 October 2022
Published Online
26 December 2022

*Corresponding author
syahriman@fsmt.upsi.edu.my

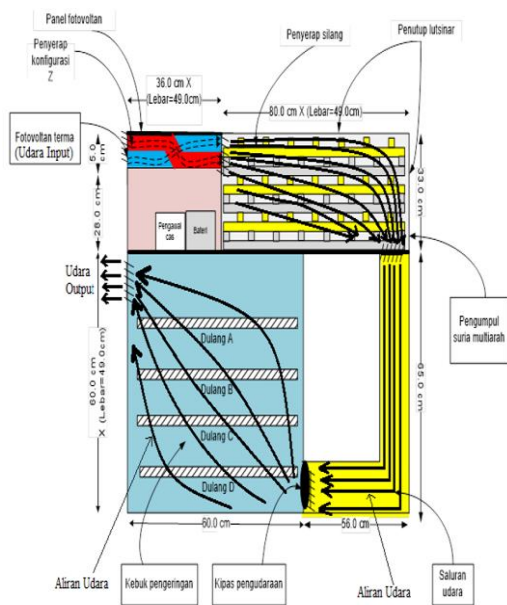
Mohd Syahriman Mohd Azmi^{a*}, Zafri Azran Abdul Majid^b, Mohd Hafidz Ruslan^c

^aJabatan Fizik, Fakulti Sains dan Matematik, Universiti Pendidikan Sultan Idris, 35900, Tanjong Malim, Perak, Malaysia

^bKulliyyah of Allied Health Sciences, Universiti Islam Antarabangsa Malaysia, 25200, Kuantan, Pahang, Malaysia

^cInstitut Penyelidikan Tenaga Suria, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600, UKM Bangi, Selangor, Malaysia

Graphical abstract



Abstract

A solar dryer hybrid photovoltaic thermal (PV/T) system has been designed, built and its performance has been studied. This research aims to develop a stand-alone solar dryer system, portable and less maintenance. This system consists of three main parts; PV/T system with configuration-Z thermal absorber plate, multi-direction solar collector with cross absorber plate and drying chamber. The designed system is named multi-direction solar collector as the solar radiates through upper and around the sides. This situation may increase the amount of heat that will absorb by the absorber plate. Six sets of cross absorber plates were used in the multi-direction solar collector and they were assembled row by row. PV/T airflow uses configuration-Z absorber plate which is placed under the photovoltaic (PV) module. The amount of heat produced from the PV/T configuration-Z is used as the pre-heat before the hot air flows to the multi-direction solar collector, while electric energy from PV is used to operate the ventilation fan. The effectiveness of the solar dryer hybrid PV/T system was tested in the field under the daily solar radiation. The total efficiency generated from PV/T configuration-Z system is in the range of 35% to 52%. For the multi-direction solar collector system, the output range was generated between 32.0 °C to 46.6 °C, whereas the thermal efficiency is in the range of 50% to 70%. In conclusion, this system is an alternative of solar dryers where drying is simple, innovative and easy to maintain.

Keywords: Solar dryer system, hybrid photovoltaic thermal, configuration-Z thermal absorber plate, multi-direction solar collector, system performance

Abstrak

Sistem pengering suria hibrid fotovoltaik termal (PV/T) telah direka bentuk, dibina dan dikaji prestasinya. Tujuan kajian ini adalah untuk menghasilkan satu reka bentuk sistem pengering suria sendiri, mudah alih dan senang diselenggara. Sistem ini dibahagikan kepada tiga bahagian utama iaitu sistem PV/T dengan plat penyerap termal konfigurasi-Z, sistem pengumpul suria multi-arah (PSMA) dengan plat penyerap termal bersilang dan kebuk pengeringan. Sistem yang direka bentuk ini dipanggil pengumpul suria multi-arah kerana sinaran matahari dapat menembusi bahagian atas dan sisinya. Keadaan ini boleh meningkatkan jumlah haba yang akan diserap oleh plat penyerap. Enam set plat penyerap termal bersilang digunakan dalam pengumpul suria multi-arah dan disusun secara bertingkat-tingkat. PV/T aliran udara pula menggunakan plat penyerap termal konfigurasi-Z yang diletakkan di bahagian bawah modul fotovoltaik (PV). Tenaga haba yang terhasil dari sistem PV/T konfigurasi-Z ini digunakan sebagai pra pemanasan sebelum udara panas ini dialirkan ke pengumpul suria multi-arah, manakala tenaga elektrik pula digunakan untuk menggerakkan kipas pengudaraan. Keberkesanan sistem pengering suria hibrid PV/T telah diuji di lapangan iaitu di bawah keamatan sinaran suria harian. Hasilnya kecekapan keseluruhan sistem PV/T konfigurasi-Z berada pada julat 35% hingga 52%. Bagi sistem PSMA pula, suhu output yang terjana adalah antara 32.0 °C hingga 46.6 °C, di mana kecekapan termal PSMA berada dalam lingkungan 50% hingga 70%. Kesimpulannya, sistem ini merupakan alternatif untuk pengering suria di mana ianya ringkas, inovatif dan mudah diselenggara.

Kata kunci: Sistem pengering suria, hibrid fotovoltaik termal, plat penyerap termal konfigurasi-Z, pengumpul suria multi-arah, prestasi sistem

© 2023 Penerbit UTM Press. All rights reserved

1.0 PENGENALAN

Penggunaan utama udara panas dari sistem pengumpul suria adalah untuk proses pengeringan hasil pertanian dan perikanan. Bagi kebanyakan hasil pertanian, proses pengeringan menjadi suatu proses yang mesti dijalankan untuk memastikan bahan yang dihasilkan bermutu dan mencapai tahap piawaian yang ditetapkan [1]. Pengeringan terbuka terdedah kepada gangguan binatang serta pencemaran udara persekitaran yang membawa kepada isu keselamatan dan kebersihan makanan [2]. Maka, penyelidikan dan pembangunan ditumpukan untuk menghasilkan sistem pengumpul suria dan sistem pengeringan yang mudah dan berprestasi baik untuk kegunaan komersial telah giat dilakukan oleh para penyelidik [3, 4].

Sistem pengering menggunakan pengumpul aliran udara berbentuk lekuk V untuk pengeringan herba dan hasil pertanian telah dibangunkan [5, 6]. Sistem pengering menggunakan pengumpul suria dua laluan dengan media berliang pada laluan kedua yang berfungsi sebagai media storan haba juga turut diperkenalkan [7]. Pengering terbantu suria dengan pengumpul suria jenis air untuk pengeringan herba perubatan juga telah dibangunkan dan dikaji prestasinya [8]. Selain itu, sistem pengering suria yang menggunakan pengumpul fotovoltaik termal (PV/T) telah direka bentuk dan dibangunkan oleh para penyelidik untuk meningkatkan suhu output pengumpul dan menjana tenaga elektrik secara

serentak yang mana ia amat sesuai bagi pengeringan herba, buah-buahan dan hasil pertanian [9, 10]. Pembangunan sistem pengering suria menggunakan pengumpul suria multifungsi turut diperkenalkan sebagai pengumpul suria yang dibangunkan boleh menyerap haba pada semua keadaan cuaca iaitu reka bentuknya mempunyai ciri-ciri pemindahan haba secara sinaran, konduksi dan perolakan [11]. Selain itu, sistem pengering suria menggunakan pengumpul suria kanta Fresnel untuk pengeringan asam gelugur juga telah dibangunkan dan dikaji prestasinya [12].

Walau bagaimanapun, kajian berkaitan reka bentuk sistem pengering suria yang bersifat sendiri, mudah alih dan senang diselenggara masih kurang dibangunkan [13, 14]. Oleh itu, objektif utama kajian ini dijalankan adalah untuk membangunkan dan menilai prestasi sistem pengering suria hibrid PV/T berasaskan udara yang inovatif dan sesuai digunakan untuk pengeringan hasil pertanian dan perikanan. Sistem ini akan menghasilkan udara panas dan output kuasa elektrik secara serentak. Sistem pengeringan suria ini menggunakan kipas untuk membawa udara panas ke dalam kebuk pengeringan dengan mengintegrasikan bersama sistem pengumpul suria multi-arah (PSMA). Oleh itu, sistem pengering ini akan beroperasi dengan menggunakan tenaga suria sepenuhnya.

2.0 METODOLOGI

Reka bentuk sistem pengering suria hibrid PV/T ini adalah seperti ditunjukkan pada Rajah 1. Sistem ini terbahagi kepada tiga bahagian utama iaitu:

- PV/T dengan plat penyerap terma konfigurasi-Z
- Pengumpul suria multi-arah dengan plat penyerap terma bersilang
- Kebuk pengeringan

Ujikaji ini menggunakan tenaga elektrik dari sistem suria sendiri yang terdiri daripada PV berkuasa 21 watt, bateri 14 Ah dan pengawal cas 12V/5A.



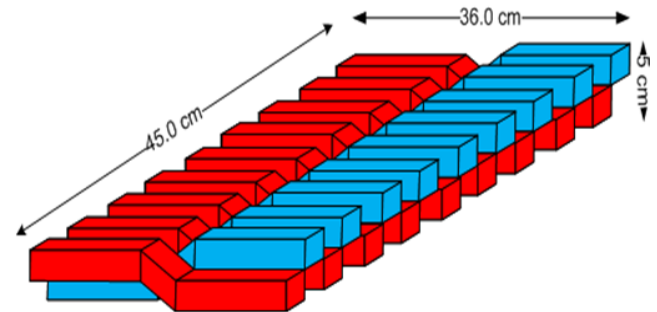
Rajah 1 Reka bentuk sistem pengering suria hibrid PV/T

2.1 PV/T dengan Plat Penyerap Terma Konfigurasi-Z

Plat penyerap terma konfigurasi-Z diletakkan di bahagian bawah modul PV. Apabila modul PV didedahkan kepada sinaran suria, ia akan menjadi panas. Haba panas dari bahagian bawah modul PV ini akan diserap oleh plat penyerap terma konfigurasi-Z. Udara dialirkan melalui plat penyerap untuk menurunkan suhu panel PV dan akan menghasilkan udara panas. Udara panas ini bertindak sebagai pra pemanasan kepada sistem ini. Kemudiannya, udara panas ini dialirkan ke pengumpul terma multi-arah. Manakala tenaga elektrik yang terhasil daripada modul PV tersebut pula digunakan untuk mengoperasikan kipas pengudaraan.

Aluminium berlohong bersaiz 2.5 cm sisinya yang berketebalan 1.0 mm akan digunakan sebagai plat penyerap dan ia juga bertindak sebagai saluran udara. 18 unit plat penyerap terma konfigurasi-Z dengan panjangnya 36.0 cm akan dipasang secara

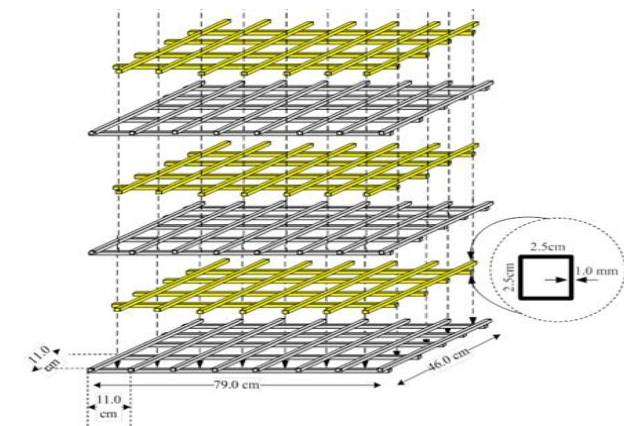
selang-seli seperti Rajah 2. Permukaan belakang modul PV akan disentuh dengan plat penyerap terma konfigurasi-Z supaya pemindahan haba dapat dilakukan.



Rajah 2 Reka bentuk plat penyerap terma konfigurasi-Z

2.2 PSMA dengan Plat Penyerap Terma Bersilang

Dalam kajian ini, pengumpul suria multi-arah (PSMA) akan dibangunkan untuk meningkatkan kecekapan pengumpul suria dengan bahagian sisinya tidak akan ditebat tetapi digantikan dengan polikarbonat supaya sinaran matahari dapat menembusi bahagian atas dan sisinya. Keadaan ini akan menambah atau meningkatkan jumlah keamatan sinaran matahari yang jatuh ke atas pengumpul suria. Pengumpul suria ini juga menggunakan plat penyerap terma bersilang yang akan dibina secara bertingkat-tingkat seperti Rajah 3. Akibatnya tenaga haba yang terhasil adalah lebih besar berbanding reka bentuk pengumpul suria konvensional. Jadual 1 menunjukkan perbezaan antara pengumpul suria konvensional dengan pengumpul suria multi-arah.



Rajah 3 Reka bentuk plat penyerap bersilang menggunakan aluminium berlohong

Jadual 1 Perbezaan antara pengumpul suria konvensional dengan pengumpul suria multi-arah

Pengumpul suria konvensional	Pengumpul suria multi-arah
Sinaran matahari hanya menembusi bahagian atas penutup sahaja	Sinaran matahari bukan sahaja menembusi bahagian atas tetapi ia juga menembusi bahagian tepi dan sisi
Kotak atau bekas pengumpul perlu lebih luas supaya permukaan plat penyerap dapat diperbesarkan	Kotak atau bekas pengumpul tidak perlu saiz yang luas dan besar kerana plat penyerap boleh disusun bertingkat-tingkat
Bahagian sisi dan bawah pengumpul suria ditebat dengan penebat termal	Hanya bahagian bawah kotak pengumpul suria yang ditebat

2.3 Kebuk Pengeringan

Kebuk pengeringan dibina berbentuk kuboid berdimensi (60.0 × 60.0 × 49.0) cm³ dengan isipadu 176.4 liter. Kerangka dan dinding kebuk pengeringan yang dibangunkan menggunakan keluli tahan karat. Di dalam kebuk pengeringan, terdapat empat dulang yang dibina daripada jaring keluli tahan karat bagi meletakkan bahan-bahan makanan untuk dikeringkan. Keluli tahan karat digunakan kerana ia memenuhi spesifikasi keselamatan makanan.

Dalam kajian ini, kipas digunakan untuk menggerakkan udara dari sistem pengumpul suria ke kebuk pengeringan. Udara memasuki kebuk pengeringan melalui bahagian bawah kebuk dan melalui celah jaring dan para bertingkat yang digunakan untuk mengampai dan meletakkan bahan yang akan dikeringkan dan keluar melalui bahagian atas sistem ini. Selain itu, suhu udara di dalam kebuk pengeringan boleh dikawal dengan mengubah kelajuan aliran udara. Oleh yang demikian, bahan dapat dikeringkan mengikut lengkung pengeringannya yang sesuai.

2.4 Peralatan

2.4.1 Modul Fotovoltan

Modul PV yang digunakan dalam penyelidikan ini adalah jenama Kyocera (KC21T02) yang berdimensi (32 × 47) cm² dengan kapasiti maksimum 21 W di bawah keadaan piawaian 25 °C pada 1000 W/m².

2.4.2 Penutup

Dalam kajian ini, polikarbonat digunakan sebagai penutup di bahagian atas dan sisi pengumpul suria multi-arah. Ini kerana bahan ini mempunyai ketahanan terhadap cuaca, tahan lama sehingga 10 tahun, tahan lasak berbanding kaca, kos yang murah dan kerja-kerja pengendaliannya lebih mudah. Selain itu, polikarbonat mempunyai sifat penyerapan sinaran dan indeks biasan yang hampir sama dengan kaca. Jadual 2 menunjukkan

spesifikasi polikarbonat dengan ketebalan 3 mm telah dipilih sebagai penutup dan sisi pengumpul suria multi-arah.

Jadual 2 Spesifikasi polikarbonat sebagai penutup

Permukaan	Lutsinar
Ketumpatan	1189 kg/m ³
Haba spesifik	1130 J/kg°C
Indeks biasan	1.54
Rintangan hentakan	13.8
Kekonduksian termal	0.20 W/m°C
Pemalar kebolehpencar	0.88

2.4.3 Plat Penyerap

Plat penyerap jenis aluminium digunakan kerana harganya murah berbanding kuprum, mudah didapati di pasaran, tidak mudah berkarat dan selamat digunakan untuk tujuan pengeringan bahan makanan. Spesifikasi plat penyerap adalah seperti ditunjukkan pada Jadual 3.

Dalam kajian ini, reka bentuk plat penyerap adalah bersilang dan disusun bertingkat-tingkat. Batang aluminium berlojong segiempat dipotong dalam dua saiz berbeza iaitu 46 cm dan 79 cm dan kemudiannya disusun secara bersilang. Terdapat enam set plat penyerap bersilang yang digunakan iaitu melibatkan 12 tingkat keseluruhannya. Ianya dicat dengan warna hitam sebagai permukaan penyerap terpilih.

Jadual 3 Spesifikasi plat penyerap

Bahan	Aluminium
Jenis	Berlojong segiempat
Saiz	2.5 cm × 2.5 cm
Tebal	1 mm
Pemalar kebolehpencar	0.1
Pemalar kedayaserapan	0.9

2.4.4 Tapak Pengumpul Suria

Tapak pengumpul suria dibina sebagai tempat untuk diletakkan plat penyerap di atasnya. Tapak pengumpul yang digunakan bersifat pantulan di mana ia akan memantulkan sinaran matahari supaya dapat ditujukan di bahagian bawah dan tepi plat penyerap. Sifat penyerapan haba yang rendah dengan permukaan yang menghampiri permukaan pantulan terpilih iaitu kepingan keluli tahan karat dengan permukaan berkilat digunakan sebagai tapak pengumpul dalam sistem ini. Spesifikasi tapak pengumpul suria yang dibina adalah ditunjukkan pada Jadual 4.

Jadual 4 Spesifikasi tapak pengumpul suria

Bahan	Keluli tahan karat
Jenis	Permukaan pantulan terpilih
Tebal	0.8 mm
Pemalar keboleh-pancaran	0.03
Pemalar kedayaserapan	0.18

2.4.5 Kipas Pengudaraan

Sistem aliran paksa menggunakan kipas dipilih kerana kecekapan proses pemanasan dan pengeringan adalah dipengaruhi oleh kadar aliran jisim udara. Terdapat dua unit kipas yang digunakan di dalam sistem ini agar udara dapat dialirkan dengan baik ke kebuk pengeringan. Kipas yang digunakan ini adalah jenis berpusat. Jadual 5 menunjukkan spesifikasi kipas tersebut.

Jadual 5 Spesifikasi kipas pengudaraan

Jenama	Sinwan
Model	S938AP-11-1
Jenis	Berpusat
Laju	0 ~ 3 m/s
Kuasa	9 watt

2.4.6 Saluran Udara

Saluran udara digunakan untuk memindahkan udara panas daripada pengumpul suria ke kebuk pengeringan dengan menggunakan kipas pengudaraan. Bahan yang digunakan untuk membina saluran udara ialah jenis polytetrafluoroethylene (PTFE) dengan diameter dalam 10.0 cm. Bahan ini sesuai digunakan kerana ia mempunyai sifat penebat yang baik, harganya yang murah serta mudah didapati di pasaran.

2.5 Analisis Sistem

Sistem pengering suria hibrid PV/T ini akan diuji keberkesannya apabila didedahkan di bawah sinaran suria harian. Proses pengukuran dan pencerapan data dibuat di kawasan lapang tingkat tiga, Bangunan Sains Fizik, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia menggunakan perakam data AdamView. Ujikaji ini akan dilakukan selama tiga hari bermula pukul 9.00 pagi hingga 5.00 petang. Kadar aliran jisim udara, \dot{m} pula ditetapkan pada tiga bacaan berbeza iaitu 0.022 kg/s, 0.036 kg/s dan 0.042 kg/s. Nilai ini dipilih berdasarkan kapasiti kawalan pengawal voltan motor terhadap kuasa pusingan kipas. Di samping itu, nilai ini sesuai digunakan untuk penganalisisan data.

Data-data yang diperolehi akan dianalisis untuk menilai kecekapan dan prestasi sebenar sistem pengeringan suria ini. Analisis prestasi dan kecekapan sistem ini terbahagi kepada dua

bahagian utama iaitu pada sistem PV/T dan sistem PSMA. Bagi sistem PV/T, ia akan melibatkan analisis aspek terma dan aspek elektrik. Manakala bagi sistem PSMA, ia hanya melibatkan analisis aspek terma sahaja.

2.5.1 Analisis Aspek Terma

Dalam penyelidikan ini, reka bentuk sistem adalah dibuat untuk laluan aliran udara bagi pengumpul suria terma. Prestasi pemindahan haba untuk aliran udara bergantung kepada keberkesanan bendalir itu untuk memindahkan haba [15]. Ini kerana haba yang mengalir dari pepejal (bahagian bawah PV) ke bendalir (udara) dalam pengumpul dan dipindahkan dengan proses konduksi dan proses perolakan [16].

Bagi sistem PV/T, proses konduksi akan berlaku antara bahagian belakang modul fotovoltaik (PV) dengan pengumpul suria terma. Seperti yang sudah difahami, konduksi adalah satu proses yang memindahkan tenaga pada peringkat molekul tanpa pergerakan fizikal antara persentuhan dua jasad [17]. Dalam peringkat atom, atom-atom dalam kawasan lebih panas adalah lebih bertenaga berbanding yang lebih sejuk. Atom-atom pada kawasan panas akan menolak antara satu sama lain dan memindahkan haba kepada kawasan yang kurang tenaga. Bahagian bawah modul PV mempunyai suhu yang lebih tinggi berbanding bahagian atas disebabkan faktor perbezaan perolakan udara ambien [16].

Haba akan mengalir ke seluruh permukaan pengumpul suria terma secara konduksi, maka pemindahan haba akan menjadi lebih baik. Kadar pemindahan haba, Q boleh dikira dengan menggunakan formula;

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Nilai kekonduksian terma, k untuk keluli tahan karat ialah 16.3 W/m°C [18]. A ialah luas permukaan pengumpul suria terma. Manakala (dT/dx) ialah kadar perubahan suhu. Kadar pengaliran haba yang keluar melalui pengumpul suria terma diperoleh daripada formula [19];

$$Q_{output} = \dot{m} C_p (T_o - T_i) \quad (2)$$

di mana,

- Q_{output} : tenaga haba yang dihasilkan oleh pengumpul suria
- \dot{m} : kadar aliran jisim udara
- C_p : muatan haba tentu udara
- T_o : suhu udara keluar (output)
- T_i : suhu udara masuk (input)

Suhu udara keluar dan suhu udara masuk perlu diukur. Haba yang dipindahkan dijangka meningkat kerana ia berkadar terus dengan perbezaan suhu bendalir keluar dan suhu bendalir masuk. Sementara

itu, kecekapan bagi tenaga suria bertukar kepada tenaga haba boleh dikira dengan menggunakan formula berikut [20];

$$\eta_{th} = \left[\frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{A I_a} \right] \times 100\% \quad (3)$$

$$\eta_{th} = \left[\frac{Q_{output}}{A I_a} \right] \times 100\% \quad (4)$$

di mana, η_{th} : kecekapan penukaran haba
 A : luas permukaan pengumpul suria
 I_a : keamatan sinaran matahari

Formula ini membuktikan bahawa kecekapan terma berkadar terus dengan pengaliran haba output.

2.5.2 Analisis Aspek Elektrik

Kecekapan bagi modul PV/T dijangka meningkat berbanding modul PV konvensional kerana pengurangan perbezaan suhu bagi modul PV/T yang berkaitan dengan peningkatan bagi kecekapan terma [21]. Ia juga boleh dibuktikan dengan kaitan kecekapan elektrik, η_{pv} bergantung kepada suhu bagi modul PV yang diberi oleh [22];

$$\eta_{pv} = \eta_r [1 - \beta(T_c - T_r)] \quad (5)$$

di mana β adalah pekali suhu, η_r adalah kecekapan rujukan pada suhu rujukan, T_r dan T_c adalah suhu sel PV yang boleh didapati secara ujikaji [23, 24]. Selain itu, kecekapan elektrik modul PV boleh dikira dengan formula [19];

$$\eta_{pv} = \left[\frac{I_{maks} V_{maks}}{I_a A} \right] \times 100\% \quad (6)$$

dengan A ialah luas permukaan PV dan I_a ialah keamatan sinaran matahari. Nilai arus maksimum (I_{maks}) dan voltan maksimum (V_{maks}) boleh diukur dari cerapan graf lengkungan cirian arus (I) – voltan (V).

Kuasa, P boleh dihitung dengan menggunakan formula $P=IV$. Kuasa maksimum, P_{maks} pula boleh didapati daripada puncak tertinggi di dalam graf lengkung cirian kuasa (P) – voltan (V).

Daripada teori, nilai kecekapan penukaran tenaga suria kepada tenaga elektrik bagi sesuatu modul PV ditakrifkan sebagai [19];

$$\eta_{pv} = \frac{P_{maks}}{I_a A} \times 100\% \quad (7)$$

Nilai kecekapan juga boleh diperolehi daripada teori, nilai kecekapan sel fotovoltan dapat dikira menggunakan formula [25];

$$\eta_{pv} = \frac{P_{maks}}{P_{in}} \times 100\% \quad (8)$$

$$\eta_{pv} = \frac{I_{maks} V_{maks}}{P_{in}} \times 100\% \quad (9)$$

$$\eta_{pv} = \frac{I_{maks} V_{oc} FF}{P_{in}} \times 100\% \quad (10)$$

Kecekapan sel fotovoltan dapat dikira apabila nilai kuasa output maksimum, P_{maks} dan nilai kuasa input, P_{in} diketahui. V_{oc} ialah voltan litar terbuka dan FF ialah faktor pengisi bagi modul PV. Nilai-nilai ini diperolehi daripada:

P_{maks} = Diambil daripada cerapan graf lengkung cirian kuasa (P) – voltan (V)

P_{in} = Luas permukaan PV × Keamatan sinaran
 $= A \times I_a$

Kecekapan keseluruhan bagi sistem PV/T, $\eta_{pv/t}$ boleh dikira menggunakan persamaan [26];

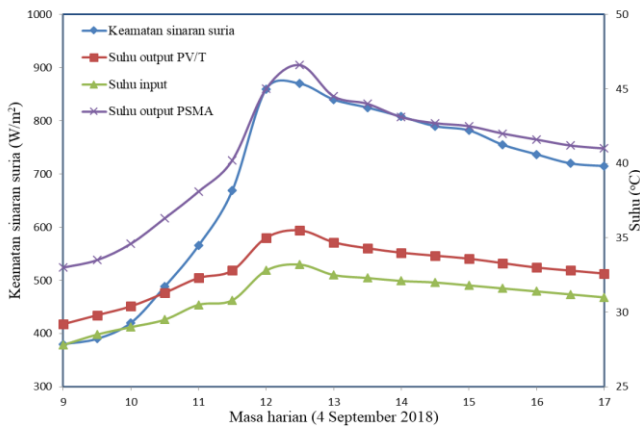
$$\eta_{pv/t} = \eta_{pv} + \eta_{th} \quad (11)$$

dan jangkaan yang boleh dibuat adalah kecekapan keseluruhan akan meningkat sebagaimana peningkatan bagi kecekapan elektrik dan terma.

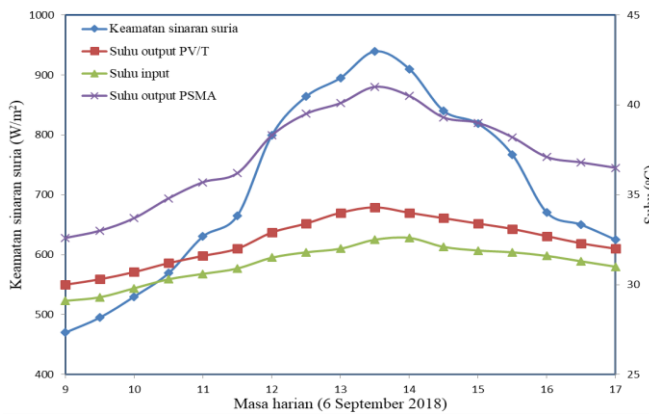
3.0 DAPATAN DAN PERBINCANGAN

Dapatan ujikaji yang diperolehi semasa eksperimen di lapangan ini dianalisis untuk menentukan kecekapan PV/T konfigurasi-Z dan kecekapan PSMA pada keadaan mantap. Oleh itu, data-data yang diperolehi perlu dipuratakan dan sela masa selama 30 minit dipilih bertujuan untuk memudahkan analisis dilakukan [27]. Rajah 4, Rajah 5 dan Rajah 6 menunjukkan keamatan sinaran suria harian, suhu input ke dalam sistem, suhu output dari sistem PV/T konfigurasi-Z dan suhu output dari sistem PSMA pada hari-hari tersebut.

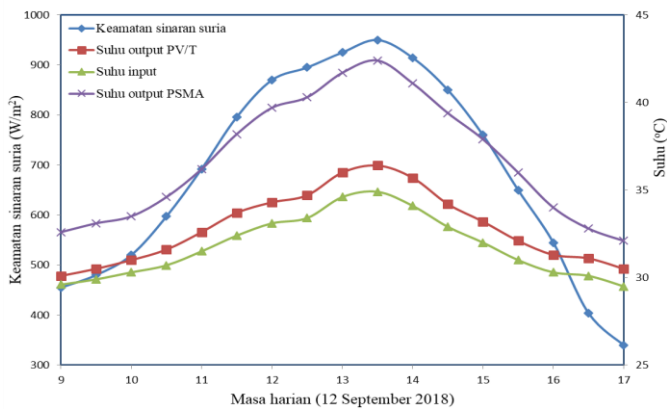
Secara amnya, dapat dinyatakan bahawa apabila keamatan sinaran suria meningkat, suhu output PV/T dan PSMA juga akan meningkat. Suhu output dari PSMA yang paling tinggi direkodkan masuk ke kebuk pengeringan adalah 46.6 °C iaitu pada keamatan sinaran suria 870 W/m² pada kadar aliran jisim udara 0.022 kg/s. Secara keseluruhannya, suhu output yang terhasil di dalam kebuk pengeringan adalah melebihi 32.0 °C dan amat sesuai untuk pengeringan hasil pertanian seperti herba perubatan [28, 29].



Rajah 4 Keamatan sinaran suria harian, suhu input ke dalam sistem, suhu output dari PV/T dan suhu output dari PSMA pada 4 September 2018 dengan kadar aliran jisim udara, \dot{m} 0.022 kg/s



Rajah 5 Keamatan sinaran suria harian, suhu input ke dalam sistem, suhu output dari PV/T dan suhu output dari PSMA pada 6 September 2018 dengan kadar aliran jisim udara, \dot{m} 0.036 kg/s

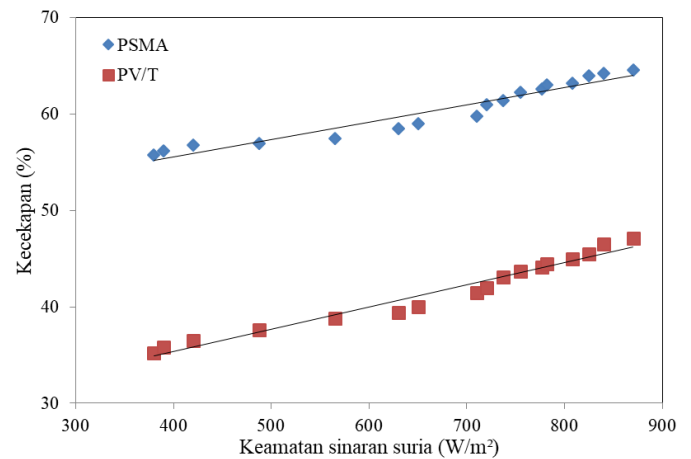


Rajah 6 Keamatan sinaran suria harian, suhu input ke dalam sistem, suhu output dari PV/T dan suhu output dari PSMA pada 12 September 2018 dengan kadar aliran jisim udara, \dot{m} 0.042 kg/s

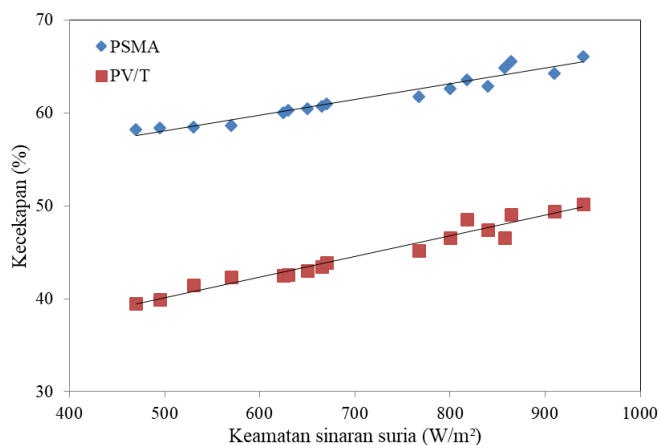
Rajah 7, Rajah 8 dan Rajah 9 pula menunjukkan kecekapan sebenar PSMA dan PV/T pada tiga kadar aliran jisim udara yang berbeza apabila diuji di lapangan. Daripada rajah-rajah tersebut didapati apabila keamatan sinaran suria bertambah, kecekapan PSMA dan PV/T juga bertambah. Semakin besar keamatan sinaran suria yang menimpa PSMA dan PV/T, semakin besar kecekapan yang terhasil daripada kedua-dua sistem tersebut. Ini kerana apabila keamatan sinaran suria adalah tinggi, ia akan menjanakan suhu output yang besar dari sistem dan seterusnya meningkatkan kecekapan sistem tersebut.

Sebagai contoh, pada 12 September 2018 didapati kecekapan PV/T konfigurasi-Z dan kecekapan PSMA meningkat dengan pertambahan keamatan sinaran suria yang menimpa ke atas sistem tersebut. Keadaan ini berlaku pada pukul 9.00 pagi hingga 1.30 tengahari pada hari tersebut. Kadar aliran jisim udara ditetapkan pada bacaan 0.042 kg/s, didapati kecekapan PV/T konfigurasi-Z bertambah dari 42.8% hingga mencapai 51.8% dan kecekapan PSMA meningkat 15.2% apabila keamatan suria berubah dari 340 W/m² kepada 950 W/m².

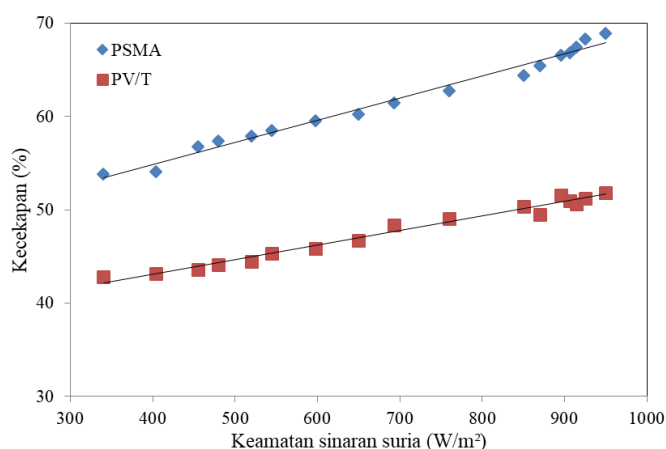
Selain itu, faktor kadar aliran jisim udara di dalam PSMA dan PV/T juga mempengaruhi kecekapan sistem, dengan kadar aliran jisim udara berkadar terus dengan kecekapan sistem. Ini dapat dilihat pada ketiga-tiga graf kecekapan PV/T tersebut. Sebagai contoh, pada keamatan sinaran suria dalam lingkungan 840 W/m² dan kadar aliran jisim udara 0.022 kg/s didapati kecekapan PV/T ialah 46.5%. Pada keamatan sinaran suria yang hampir sama dan kadar aliran jisim udara 0.036 kg/s dan 0.042 kg/s, didapati kecekapan PV/T masing-masing adalah 47.5% dan 50.4%. Ini menunjukkan bahawa apabila kadar aliran jisim udara bertambah, kecekapan sistem juga bertambah.



Rajah 7 Kecekapan PSMA dan PV/T pada kadar aliran jisim udara 0.022 kg/s



Rajah 8 Kecekapan PSMA dan PV/T pada kadar aliran jisim udara 0.036 kg/s



Rajah 9 Kecekapan PSMA dan PV/T pada kadar aliran jisim udara 0.042 kg/s

4.0 KESIMPULAN

Ujikaji sistem pengering suria hibrid PV/T ini di lapangan menunjukkan sistem PV/T konfigurasi-Z berada pada tahap memuaskan dan sistem PSMA berada dalam prestasi yang baik. Di bawah keamatan sinaran suria harian sebenar didapati kecekapan keseluruhan PV/T konfigurasi-Z berada pada tahap 35% hingga 52% bergantung kepada kadar aliran jisim udara di dalam sistem. Sistem PSMA pula dikira baik kerana suhu output yang terjana adalah antara 32.0 °C hingga 46.6 °C dari 9.00 pagi hingga 5.00 petang, yang mana ia amat sesuai untuk pengeringan hasil pertanian dan perikanan. Manakala kecekapan terma PSMA berada dalam lingkungan 50% hingga 70% apabila diuji dan didedahkan kepada keamatan sinaran suria harian.

Secara keseluruhannya, sistem pengering suria hibrid PV/T ini amat berpotensi untuk dimajukan dan dikomersialkan. Kaedah alternatif ini adalah sangat mudah digunakan, inovatif dan sendiri. Sistem ini boleh digunakan untuk proses pengeringan hasil

pertanian seperti herba dan buah-buahan serta hasil perikanan. Sistem pengeringan ini memberi kesan positif antaranya ia menjimatkan penggunaan tenaga elektrik, kos penyelenggaraan dan perkhidmatan yang rendah serta kualiti dan kebersihan produk berada pada tahap terbaik. Sistem pengeringan ini amat sesuai untuk perusahaan kecil dan sederhana.

Penghargaan

Setinggi-tinggi penghargaan kepada Jabatan Fizik Gunaan, Universiti Kebangsaan Malaysia kerana memberi kebenaran menggunakan kemudahan dan peralatan dalam menayakan kajian ini.

Rujukan

- [1] Sandali, M., Boubekri, A. and Mennouche, D. 2019. Improvement of the Thermal Performance of Solar Drying Systems Using Different Techniques: A Review. *Journal of Solar Energy Engineering*. 141(5): 050802. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4043613>.
- [2] Kamfa, I., Fluch, J., Bartali, R. and Baker, D. 2020. Solar-thermal Driven Drying Technologies for Large-scale Applications: State of the Art, Gaps, and Opportunities. *International Journal of Energy Research*. 44: 9864-9888. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.5622>.
- [3] Mohd Syahrman Mohd Azmi, Mohd Yusof Hj. Othman, Mohd Hafidz Ruzlan, Kamaruzzaman Sopian, Zafri Azran Abdul Majid and Ahmad Fudholi. 2015. Research and Development Work on Solar Assisted Drying Systems. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 11(7): 701-714. DOI: <http://dx.doi.org/10.19026/rjaset.11.2033>.
- [4] Evangelisti, L., Vollaro, R.D.L. and Asdrubali, F. 2019. Latest Advances on Solar Thermal Collectors: A Comprehensive Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 114: 109318. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109318>.
- [5] Zulkifle, I., Alwaeli, A. H., Ruslan, M.v H., Ibarahim, Z., Othman, M. Y. H. and Sopian, K. 2018. Numerical Investigation of V-groove Air-collector Performance with Changing Cover in Bangi, Malaysia. *Case Studies in Thermal Engineering*. 12: 587-599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.07.012>.
- [6] Nurul Aiman Mhd Safri, Zalita Zainuddin, Mohd Syahrman Mohd Azmi, Ahmad Fudholi, Idris Zulkifle and Mohd Hafidz Ruslan. 2020. Temperature Performance of a Portable Solar Greenhouse Dryer with Various Collector Design. *Sains Malaysiana*. 49(10): 2539-2545. DOI: <http://dx.doi.org/10.17576/jsm-2020-4910-19>.
- [7] Kumar, D., Bhoyar, S. and Karankoti, S. V. 2017. Performance Analysis for the High Mass Flow Rate Double-Pass Solar Air Collector with and without Porous Media. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 8(4): 69-85.
- [8] Daghigh, R. and Shafieian, A. 2016. An Experimental Study of a Heat Pipe Evacuated Tube Solar Dryer with Heat Recovery System. *Renewable Energy*. 96: 872-880.
- [9] Poonia, S., Singh, A. K. and Jain, D. 2018. Design Development and Performance Evaluation of Photovoltaic/thermal (PV/T) Hybrid Solar Dryer for Drying of ber (*Zizyphus mauritiana*) Fruit. *Cogent Engineering*. 5(1): 1-18. DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1507084>.

- [10] Kong, D., Wang, Y., Li, M., Keovisar, V., Huang, M. and Yu, Q. 2020. Experimental Study of Solar Photovoltaic/thermal (PV/T) Air Collector Drying Performance. *Solar Energy*. 208: 978-989.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.067>.
- [11] Zafri, M. A. A., Othman, M. Y. H., Ruslan, M. H. and Sopian, K. 2007. Development and Application of Multifunctional Solar Thermal Collector on Heat Pump Dryer System. *Mathematical Sciences in Engineering Conference Proceedings*. 48-53.
- [12] Idris Zulkifle, Mohd Hafidz Hj Ruslan, Mohd. Yusof Hj Othman, Zahari Ibarahim and Kamaruzzaman Sopian. 2018. Pengeringan Asam Gelugur (*Garcinia Atroviridis*) Menggunakan Sistem Pengering Suria. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*. 80(5): 129-133.
DOI: <https://doi.org/10.11113/jt.v80.11822>.
- [13] Udomkun, P., Romuli, S., Schock, S., Mahayothee, B., Sartas, M., Wossen, T., Njukwe, E., Vanlauwe, B. and Müller, J. 2020. Review of Solar Dryers for Agricultural Products in Asia and Africa: An Innovation Landscape Approach. *Journal of Environmental Management*. 268: 110730.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110730>.
- [14] Kumar, P. and Singh, D. 2020. Advanced Technologies and Performance Investigations of Solar Dryers: A Review. *Renewable Energy Focus*. 35: 148-158.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ref.2020.10.003>.
- [15] Fisk, M. J. and Anderson, H. C. W. 1982. *Introduction to Solar Technology*. New York: Addison Wesley Publishing.
- [16] Chow, T. T. 2003. Performance Analysis of Photovoltaic Thermal Collector by Explicit Dynamic Model. *Solar Energy*. 75: 143-152.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.07.001>.
- [17] Young, H. D. and Freedman, R. A. 2019. *University Physics with Modern Physics*. 15th edition. Harlow, United Kingdom: Pearson Education Limited.
- [18] Vliet, G. C., Howell, J. R. and Bannerot, R. B. 1982. *Solar-thermal Energy System: Analysis and Design*. United States of America: McGraw-Hill Inc.
- [19] Charalambus, P. G., Maidment, G. G., Kalogirou, S. A. and Yiakoumetti, K. 2007. Photovoltaic Thermal (PV/T) Collectors: A Review. *Applied Thermal Engineering*. 27: 275-286.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.06.007>.
- [20] Moss, K. J. 1998. *Heat and Mass Transfer in Building Services Design*. London: Alden Press Oxford.
- [21] Sopian, K., Yigit, K. S., Liu, H. T., Kakac, S. and Veziroglu, T. N. 1996. Performance Analysis of Photovoltaic Thermal Air Heaters. *Energy Conversion and Management*. 37(11): 1657-1670.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(96\)00010-6](https://doi.org/10.1016/0196-8904(96)00010-6).
- [22] Swapnil, D., Jatin, N. S. and Bharath, S. 2013. Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World – A Review. *Energy Procedia*. 33: 311-321.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.072>.
- [23] Hsieh, J. S. 1986. *Solar Energy Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.
- [24] Tonui, J. K. and Tripanagnostopoulos, Y. 2007. Improved PV/T Solar Collectors with Heat Extraction by Forces or Natural Air Convection. *Renewable Energy*. 32: 623-637.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2006.03.006>.
- [25] Mazer, J. A. 1997. *Solar Cells: An Introduction to Crystalline Photovoltaic Technology*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- [26] Tiwari, A. and Sodha, M. S. 2006. Performance Evaluation of Solar PV/T System: An Experimental Validation. *Solar Energy*. 80: 751-759.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2005.07.006>.
- [27] Zafri Azran Abdul Majid. 2011. *Kajian Prestasi Sistem Pengering Pam Haba Terbantur Suria dengan Pengumpul Suria Multifungsi*. Tesis Ijazah Doktor Falsafah, Universiti Kebangsaan Malaysia.
- [28] Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M. H., AlGhoul, M. A. and Sulaiman, M. Y. 2010. Review of Solar Dryers for Agricultural and Marine Products. *Renewable and Sustainable Energy Review*. 14: 1-30.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.032>.
- [29] Nurul Aiman Mhd Safri, Zalita Zainuddin, Mohd Syahrman Mohd Azmi, Idris Zulkifle, Ahmad Fudholi, Mohd Hafidz Ruslan and Kamaruzzaman Sopian. 2021. Current Status of Solar-assisted Greenhouse Drying Systems for Drying Industry (Food Materials and Agricultural Crops). *Trends in Food Science & Technology*. 114: 633-657.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.035>.