

Perbandingan Analisis Eksperimen Untuk Prestasi Pengumpul Udara Suria Laluan Berganda Menggunakan Sirip Berbentuk Berlian dan Komposit Lilin Parafin Bulu Keluli

(Comparison Experimental Analysis on the Effects of Using Staggered Diamond Fins Composite Phase Change Material-Porous Media in Double Pass Solar Air Heater)

Nurul Jannah Yusaidi, Mohd Faizal Fauzan*, Ahmad Fazlizan Abdullah & Adnan Ibrahim

Solar Energy Research Institute, Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi 43600, Malaysia

*Corresponding author: drfaizalfauzan@ukm.edu.my

Received 5 June 2025, Received in revised form 13 November 2025

Accepted 13 December 2025, Available online 30 March 2026

ABSTRAK

Kajian penyelidikan ini membentangkan mengenai kedua – dua eksperimen pada pengumpul udara suria laluan berganda (PUSLB) untuk sirip sahaja (PUSLBS) dan sirip dengan komposit bahan perubahan fasa media berliang (PUSLBSBPFMB). Fokus utama penyelidikan ini adalah untuk mengkaji prestasi kecekapan haba. Penambahan sirip, lilin parafin dan bulu keluli di dalam pengumpul suria, didapati dapat meningkatkan peningkatan pemindahan haba, tempoh penyimpanan tenaga dan kecekapan haba. Empat puluh bilangan sirip berbentuk berlian, 4kg lilin parafin RT-44 (bahan perubahan fasa) dan satu gulung bulu keluli (media berliang) digunakan di dalam eksperimen. Untuk eksperimen pertama, hanya sirip berbentuk berlian sahaja digunakan manakala untuk eksperimen kedua, terdapat penambahan pencampuran antara lilin parafin dan bulu keluli yang diletakkan di bahagian bawah pengumpul suria. Terdapat empat kadar aliran jisim (0.0104 kg/s, 0.0157 kg/s, 0.0209 kg/s, 0.0261 kg/s) dan empat variasi sinaran suria (400 W/m², 600 W/m², 800 W/m² dan 1000W/m²) yang digunakan. Kesan kadar aliran jisim, sinaran suria dan suhu keluar telah memberi kesan terhadap prestasi keseluruhan PUSLB. Kecekapan haba tertinggi yang diperolehi untuk PUSLBS dan PUSLBSBPFMB ialah 59.34% dan 97.91%, masing-masing pada 0.0261kg/s dan 1000 W/m². Untuk kecekapan haba terendah yang diperolehi untuk PUSLBS dan PUSLBSBPFMB pula ialah 43.51% dan 60.33%, masing-masing pada 0.0104kg/s dan 400 W/m². Eksperimen kedua menunjukkan peningkatan kecekapan haba yang lebih tinggi hasil dari penambahan storan tenaga dan pemindahan haba yang baik. Ini membuktikan bahawa PUSLBSBPFMB mempunyai kecekapan terma yang lebih tinggi berbanding PULBS.

Kata kunci: PUSLB; PUSLBSBPFMB; sirip; lilin parafin; bulu keluli; kecekapan haba

ABSTRACT

This research study presents on both experiments on double pass solar air heater (DPSAH) for fins only (DPSAHWF) and fins with a composite phase change material porous medial (DPSAHWFPCMSW). The objective of this study is on the thermal performance evaluation. The addition of fins, paraffin wax and steel wool has been found to improve the increase of heat transfer, energy storage period and heat efficiency. Forty diamond-shaped fins, 4kg of RT-44 paraffin wax (phase change material) and one roll of steel wool (porous media) were used in the experiment. For the first experiment, only diamond-shaped fins were used while for the second experiment, there was an addition of paraffin wax and steel placed at the bottom. There are four mass flow rates (0.0104 kg/s, 0.0157 kg/s, 0.0209 kg/s, 0.0261 kg/s) and four variations of solar radiation (400 W/m², 600 W/m², 800 W/m² and 1000 W/m²) used. The effect of mass flow rate, solar radiation and outlet temperature has had an impact on the overall performance for DPSAH. The highest thermal efficiency obtained for DPSAHWF and DPSAHWFPCMSW were 59.34% and 97.91%, at 0.0261kg/s and 1000 W/m²,

respectively. The lowest thermal efficiency obtained for DPSAHWF and DPSAHWFPCMSW was 43.51% and 60.33%, at 0.0104kg/s and 400 W/m² respectively. The second experiment showed a huge improvement in energy efficiency due to the added energy storage and better heat transfer. This confirms that DPSAHWFPCMSW was more thermally efficient than DPSAHWF.

Keywords: DPSAHWF; DPSAHWFPCMSW; fins; paraffin wax; steel wool; heat efficiency

PENDAHULUAN

Demi merealisasikan impian untuk ke arah penggunaan tenaga mampan, tenaga suria telah mendapat perhatian yang luar biasa oleh dunia kerana ia mempunyai sumber yang banyak dan bebas pencemaran (Mund et al. 2021). Antara perkara yang penting di dalam tenaga suria adalah haba suria, yang dihasilkan oleh Matahari. Penyelidik telah mereka cipta pengumpul udara suria (PUS) untuk memberi manfaat dan memainkan peranan penting dalam sektor pertanian, pemanasan ruang dan pemanasan di dalam industri kerana matahari memberikan haba secara sama rata untuk setiap penerimaan permukaan kawasan tersebut (Mondragón et al. 2019). Pelbagai penyelidikan telah dilakukan untuk mencari solusi bagi meningkatkan prestasi tenaga. Walau bagaimanapun, di sebalik potensinya, PUS konvensional sering mengalami kecekapan haba yang rendah disebabkan oleh had dalam kadar pemindahan haba dan ketersediaan sinaran suria (Menni et al. 2018). Oleh itu, penyelidik telah mencari alternatif baru untuk meningkatkan prestasi haba melalui reka bentuk inovatif seperti pengumpul suria laluan berganda (PSLB) dan penambahbaikan dari segi jenis bahan (Raj et al. 2019).

Dengan reka bentuk inovatif baharu dan peningkatan jenis bahan, prestasi terma dapat ditingkatkan dengan lebih baik daripada PUS konvensional. Untuk meningkatkan lagi prestasi terma, para penyelidik menjadi kreatif dengan menambah sirip ke dalam PUSLB untuk meningkatkan kawasan sentuhan antara permukaan yang dipanaskan dan udara untuk meningkatkan kadar pemindahan haba (Singh et al. 2022). Namun begitu, walaupun sirip berfungsi untuk meningkatkan pemindahan haba, kapasitinya untuk menyimpan tenaga haba kekal terhad.

Untuk menangani isu ini, penggunaan bahan perubahan fasa (BPF) telah menarik minat dalam bidang penyelidikan kerana ia mempunyai keupayaan untuk menyimpan tenaga (Imaduddin et al. 2023). BPF (cth lilin parafin) termasuk di dalam kategori penyimpanan haba terpendam di mana ia memerlukan suhu tertentu untuk cair daripada fasa pepejal kepada fasa cecair. BPF akan menyerap dan menyimpan haba semasa peralihan fasa yang boleh dilepaskan kemudian, sekali gus akan memudahkan turun naik suhu dan mempunyai kecenderungan untuk memanjangkan tempoh operasi sistem PUSLB (Alam &

Kim, 2017). BPF digunakan secara meluas kerana ia kos rendah, mesra alam dan mempunyai kapasiti penyimpanan tenaga yang tinggi (Razali et al. 2025).

Banyak kajian telah dijalankan untuk menyasat secara teori dan eksperimen prestasi terma PUSLB menggunakan sirip dan BPF. J. Assadeg et al. (2022) telah menjalankan pelbagai jenis eksperimen di mana salah satu eksperimen menggunakan kapsul dan sirip BPF dalam PUSLB (Assadeg et al. 2022). Beliau membuat kesimpulan bahawa menggunakan sirip dan kapsul BPF memperoleh kecekapan terma tertinggi. Salih et al. (2019) membuat kesimpulan bahawa menggunakan kapsul segi empat tepat yang diisi dengan BPF telah memperoleh 93% kecekapan terma untuk PUSLB.

Muthukumaran & Senthil (2022) menyatakan di dalam karya mereka bahawa mereka telah menggunakan tiub lurus dan lingkaran bersama-sama dengan gliserol dan BPF sebagai simpanan tenaga (Muthukumaran & Senthil, 2022). Mereka membuat pemerhatian selama 9 jam dan merekodkan data dengan selang 30 minit. Kesimpulan yang dapat disimpulkan adalah tiub lingkaran dengan BPF mempunyai prestasi terma yang lebih tinggi dalam PUSLB dengan 29.86%.

Yusaidi et al. telah melakukan eksperimen menggunakan PUSLB dengan sirip berbentuk berlian secara berperingkat. Penulis melakukan eksperimen di dalam suhu bilik dan mendapati bahawa kecekapan haba yang paling tinggi menggunakan sinaran suria 1000 W/m² dan kadar aliran jisim 0.0261 kg/s ialah 59.34%. Penulis menyimpulkan bahawa dengan meletakkan sirip di bahagian atas dapat membantu meningkatkan kawasan pemindahan haba dengan cepat kerana mendapat haba secara terus tanpa ada halangan (Yusaidi, Fauzan, Abdullah, Ibrahim, et al. 2024).

Sharol et al. (2022) memfokuskan kepada kesan penggunaan bahan penyimpanan tenaga haba (BPF) terhadap prestasi PUSLB dengan penyerap silang matriks (Sharol et al. 2022). Kajian menunjukkan faedah prestasi menyepadukan BPF ke dalam PUSLB, di mana ia boleh memanjangkan masa nyahcas dan mengeluarkan haba pada waktu malam atau ketika sinaran suria rendah. Penulis membuat kesimpulan bahawa mereka mencapai 68.23% kecekapan terma untuk eksperimen luar suhu bilik dan 60% pada eksperimen dalam suhu bilik.

Sajawal et al. (2019) melakukan kajian eksperimen prestasi terma PUSLB yang menggabungkan BPF yang terkandung dalam tiub bersirip aluminium (Sajawal et al. 2019). Penulis telah menunjukkan keberkesanan BPF dalam meningkatkan storan tenaga dan kadar pemindahan haba. Kajian ini telah membandingkan tiga konfigurasi iaitu tiada penggunaan BPF, tiub bersirip separuh bulatan (SFT – RT44HC) dan konfigurasi ketiga ialah gabungan tiub bersirip kedua dan bulat (FT – RT18HC) menggunakan kadar aliran jisim malar, iaitu 0.02kg/s. Kesimpulan daripada eksperimen adalah, kecekapan terma keseluruhan untuk tiga konfigurasi masing-masing ialah 53.2%, 68.4% dan 71.9%.

Baig & Ali (2019) menjalankan eksperimen ke atas PUSLB dengan lilin parafin yang disepadukan dengan aluminium buih (berliang) dan menjalankan eksperimen luar suhu bilik selama 10 jam semasa musim sejuk (Baig & Ali, 2019). Empat saluran tembaga segi empat tepat yang dinamakan bersama empat aluminium buih. Penulis menggunakan tiga konfigurasi iaitu plat rata ringkas, dua buih aluminium segi empat tepat diletakkan di dalam dua saluran tembaga dan empat buih aluminium segi empat tepat di dalam empat saluran tembaga. Lilin parafin yang cair diisi di dalam buih aluminium segi empat tepat untuk konfigurasi kedua dan ketiga. Mereka membuat kesimpulan bahawa mereka telah mencapai 97% maksimum kecekapan haba menggunakan konfigurasi yang ketiga berbanding konfigurasi lain.

Murali et al. (2020) melakukan dua jenis eksperimen iaitu meletakkan sirip di bahagian atas dan sirip di bahagian bawah bagi menyiasat prestasi keseluruhan PSLB (Murali et al. 2020). Kajian ini menganalisis kesan penempatan sirip di bahagian yang berbeza dari segi kadar pemindahan haba, pekali pemindahan haba dan kecekapan keseluruhan. Tiga kadar aliran jisim yang berbeza telah diuji: 0.015 kg/s, 0.033 kg/s, dan 0.044 kg/s. Kajian menyimpulkan bahawa PUSLB dengan sirip di bahagian bawah menunjukkan kecekapan yang lebih tinggi berbanding PUSLB dengan sirip di bahagian atas.

Sivarathinamoorthy & Syureshkannan (2021) mengkaji pengaruh kedua – dua sirip membujur dan medium penyimpanan haba karbon berbutir terhadap prestasi pengumpul udara suria laluan berganda (PUSLB) (Sivarathinamoorthy & Sureshkannan, 2021). Para penyelidik menguji tiga konfigurasi PSLB: tanpa sirip atau storan haba (PSLBTS), dengan sirip tetapi tanpa simpanan haba (PSLBTSH), dan dengan kedua – dua sirip dan storan haba (PSLBSSH). Mereka bereksperimen dengan tiga kadar aliran jisim udara yang berbeza: 0.008 kg/s, 0.012 kg/s, dan 0.016 kg/s. Sinaran suria maksimum yang

direkodkan semasa tempoh ujian ialah 849 W/m². Keputusan menunjukkan bahawa peningkatan kadar aliran udara membawa kepada peningkatan dalam kecekapan haba, dengan konfigurasi PSLBSSH mencapai kecekapan tertinggi. Kecekapan terendah yang direkodkan semasa waktu puncak cahaya matahari ialah 33% untuk PSLBTS, manakala yang tertinggi ialah 65% untuk PSLBSSH. Menggunakan karbon berbutir sebagai medium penyimpanan haba yang boleh dirasakan telah menghasilkan 90 minit lebih lama.

Nagaraj et al. (2023) menggunakan analisis eksperimen dan berangka dalaman untuk menyiasat potensi menyepadukan sirip aerofoil dengan PUSLB (Nagaraj et al. 2023). Ia mempunyai dua bahagian di mana saluran masuk mempunyai sudut condong 10° dan dilekatkan pada ruang bawah manakala saluran keluar adalah sebaliknya dan kadar aliran jisim antara 0.00651kg/s hingga 0.04614kg/s. Sirip aerofoil mempunyai dua konfigurasi; semua sirip hujung ekor menghadap jauh dari garis tengah saluran penyerap (Konfigurasi 1) dan sirip hujung ekor menolak dan menjauhi garis tengah saluran penyerap (Konfigurasi II). Untuk eksperimen ini, mereka menggunakan ketinggian sirip pada 30,10, 5 dan 3mm. Mereka membuat kesimpulan bahawa konfigurasi aerofoil II dengan 10mm (ketinggian sirip) adalah lebih baik untuk prestasi PUSLB di mana ia mencapai kecekapan terma 23.24%.

Jalil et al. (2021) menyiasat kesan penggunaan sirip beralun di PUSLB untuk prestasi haba (M. Jalil & J. Ali, 2021). Untuk eksperimen ini, terdapat dua jenis penyerap sirip dengan dua susunan geometri sirip yang berbeza di mana yang pertama mempunyai tiga gelombang dan yang kedua mempunyai tujuh gelombang. Sirip dipasang di bahagian atas dan bawah di mana pemilihan bahan adalah aluminium. Penulis menggunakan kadar aliran jisim antara 0.008575 kg/s hingga 0.0214375 kg/s. Sinaran suria adalah antara 500 W/m² hingga 800 W/m² menggunakan 100 selang masa. Kesimpulan yang dapat diberikan oleh penulis ialah tujuh sirip beralun mencapai kecekapan terma yang lebih baik berbanding tiga sirip beralun, masing-masing adalah 84% dan 80%.

Fahmi et al. (2020) melakukan analisis tenaga dan latihan PUSLB yang dipertingkatkan dengan sirip membujur segi tiga yang dilekatkan pada permukaan penyerap dalam pelbagai konfigurasi (Fahmi et al. 2020). Penyelidikan ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh susunan sirip terhadap kecekapan terma dan eksersgetik PUSLB. Eksperimen telah dijalankan dengan tiga kadar aliran jisim berbeza antara 0.027 hingga 0.037 kg/s. Perbezaan suhu maksimum yang dicapai ialah 20.6°C

dengan konfigurasi sirip berganda, menghasilkan kecekapan haba maksimum 99.9% dan kecekapan eksergetik maksimum 43.08%.

Machi et al. (2022) mengkaji prestasi pengumpul udara suria dua laluan dengan dan tanpa sirip bersepadu segi tiga (Machi et al. 2022). Penyelidikan ini memberi tumpuan kepada penilaian prestasi berasaskan tenaga dan menganalisis kesan kadar aliran jisim terhadap kecekapan pengumpul. Para penyelidik menguji pengumpul pada tiga kadar aliran jisim yang berbeza: 0.0081 kg/s, 0.0101 kg/s, dan 0.0121 kg/s. Kajian mendapati bahawa pengumpul bersirip secara berperingkat mencapai kecekapan yang lebih tinggi. Bagi PSLB bersirip, kecekapan terma harian masing-masing ialah 56.57%, 59.41%, dan 61.42%, untuk ketiga-tiga kadar aliran. PSLB tanpa sirip mencapai kecekapan harian sebanyak 51.04%, 53.28% dan 57.08% untuk kadar aliran yang sama. Ini menunjukkan terdapat peningkatan sebanyak 5.53%, 6.13% dan 4.34%.

Ini menunjukkan terdapat jurang penyelidikan yang ada di dalam PUSLB iaitu masih kurang lagi kajian mengenai pencampuran atau komposit bahan perubahan fasa dan media berliang di luar sana. Oleh itu, objektif kajian ini adalah bertujuan untuk mengkaji prestasi kecekapan haba PUSLB antara kedua – dua eksperimen iaitu sirip sahaja dan sirip dengan komposit bahan perubahan fasa media berliang.

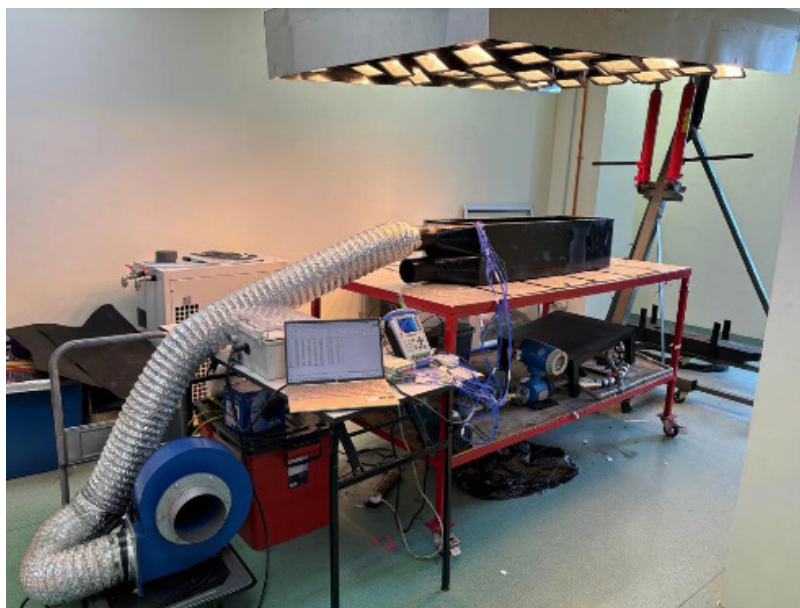
PERSEDIAAN EKSPERIMEN

Pelaksanaan perancangan untuk persediaan eksperimen telah dibuat dan dilaksanakan seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1. Simulator ini menggunakan 40 lampu halogen, dan setiap satu lampu halogen itu mempunyai kuasa 500Watt. Pengatur voltan digunakan untuk mengawal keamatan cahaya lampu halogen.

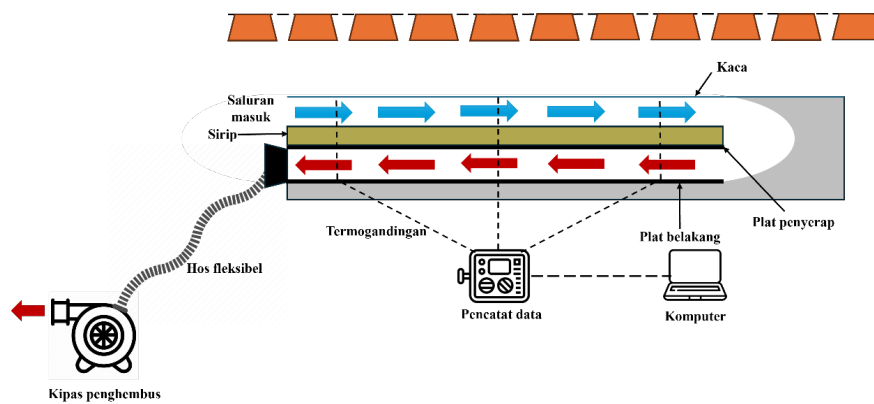
Pengumpul suria terdiri daripada plat penyerap, sirip berbentuk berlian, plat belakang, lilin parafin, bulu keluli dan penutup kaca. Dimensi untuk keseluruhan panjang pengumpul suria ialah 1m panjang, 0.3m lebar dan 0.13m tinggi. Untuk dimensi bahagian atas dan bawah ialah 30mm dan 100mm dan plat penyerap diletakkan di bahagian tengah untuk dijadikan sebagai pembahagi. Dimensi plat penyerap adalah 0.9m panjang dan 0.3m lebar kerana ia membolehkan udara masuk dari bahagian atas dan lalu pada bahagian bawah. Untuk penutup kaca dan plat belakang, ia mempunyai dimensi yang sama, iaitu 1m x 0.3m untuk panjang dan lebar dan mempunyai ketebalan yang berbeza iaitu 4mm (penutup kaca) dan 1mm (plat belakang). Sirip berbentuk berlian dipasang pada bahagian atas pengumpul suria seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2. Kedudukan termogandingan di tunjukkan di Rajah 3.

JADUAL 1. Dimensi yang dicadangkan untuk konsep reka bentuk pengumpul udara suria laluan berganda

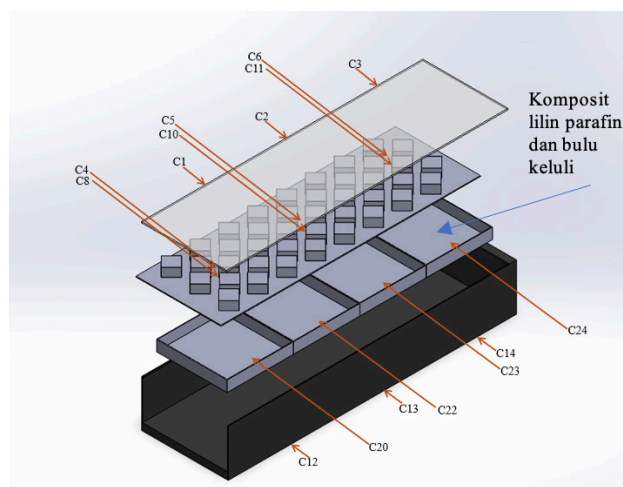
Parameter	Nilai
Panjang pengumpul udara suria (P_c)	1.0 m
Lebar pengumpul udara suria (L_c)	0.3 m
Ketinggian bahagian atas	30 mm
Ketinggian bahagian bawah	100 mm
Ketebalan telus kaca	4 mm
Panjang plat penyerap	900 mm
Lebar plat penyerap	295 mm
Ketebalan plat penyerap	1 mm
Panjang sirip	50 mm
Lebar sirip	50 mm
Ketinggian sirip	30 mm
Ketebalan plat belakang	1 mm
Suhu masuk (T_{masuk})	27 °C
Suhu ambien (T_a)	25 °C
Berat lilin parafin (kg)	4
Bilangan bulu keluli	1 gulung



RAJAH 1. Persediaan eksperimen dilakukan di Institut Penyelidikan Tenaga Suria, UKM



RAJAH 2. Gambar rajah keseluruhan skematik pengumpul suria laluan berganda



RAJAH 3. Rajah skematik lokasi termogandingan dan lokasi komposit lilin parafin bulu keluli

Terdapat dua eksperimen yang telah dijalankan di mana eksperimen pertama hanya menggunakan sirip dalam PUSLB, dan eksperimen kedua menggunakan sirip dan komposit bahan perubahan fasa media berliang. Kadar aliran jisim adalah antara 0.0104kg/s hingga 0.0261kg/s dan sinaran suria adalah antara 400 W/m² sehingga 1000 W/m² dengan perbezaan 100 selang. Data telah direkodkan menggunakan pencatat data Applent AT4824 dan termogandingan yang diletakkan di pelbagai lokasi untuk memantau dan merekod suhu. Meter Kuasa Suria RS PRO digunakan untuk mengukur sinaran suria dan Testo 450i digunakan untuk mengukur kelajuan udara.

KETIDAKPASTIAN DAN ANALISIS TERMA

Pada permulaan eksperimen, adalah penting untuk melakukan analisis ketidakpastian. Analisis ketidakpastian digunakan untuk mengukur ketepatan instrumen dan ralat yang berkaitan dengan pelbagai parameter (Holman, 2012). Parameter yang boleh diubah yang digunakan dalam eksperimen ialah keamatan suria, kadar aliran, suhu masuk dan keluar. Jadual 2 menunjukkan anggaran ketidakpastian.

Ralat peratusan digunakan untuk menentukan perbezaan antara keputusan simulasi dan keputusan eksperimen yang diperolehi manakala ketepatan peratusan adalah untuk mengetahui ketepatan antara keputusan simulasi dan eksperimen. Ralat peratusan antara kedua-dua kaedah ini dinilai untuk mengesahkan dan membandingkan kedua-dua keputusan. Ralat peratusan dan ketepatan peratusan antara kedua-dua keputusan boleh dikira menggunakan formula (Hussain et al. 2021).

Perkara yang paling penting dalam terma suria ialah mengenal pasti bendalir kerja untuk kegunaan sistem. Dalam kes ini, udara berfungsi sebagai cecair operasi. Apabila peniup kipas membekalkan udara kepada pengumpul suria, ia akan melalui plat penyerap panas dan udara akan membawa haba untuk memasuki bahagian bawah. Ini menunjukkan peniup kipas berada dalam keadaan tekanan positif.

Reynolds Number, Re boleh membantu untuk menentukan rejim aliran di dalam pengumpul suria laluan berganda. Ia boleh menjadi udara laminar atau udara pergolakan, yang akan memberi kesan terhadap pemindahan haba, kecekapan haba dan prestasi keseluruhan. Aliran bergelora adalah baik dalam sistem kerana ia akan menyebabkan pergolakan dengan mencampurkan udara dan boleh mengurangkan lapisan sempadan haba manakala aliran laminar lebih boleh diramal dan tidak menyebabkan banyak pencampuran. Oleh kerana aliran udara bergelora diperlukan untuk kajian ini, *Reynolds number, Re* lebih

besar daripada 2300 ($Re > 2300$) diperlukan untuk mewujudkan rejim aliran bergelora untuk meningkatkan pemindahan haba. Untuk kajian ini, Reynolds number yang diperoleh adalah antara 3496 hingga 8739.

Nombor *Reynolds* dikira sebagai (Ishak, Ibrahim, Sopian, et al. 2023):

$$Re = \frac{\dot{m}D_h}{\mu} \quad (1)$$

Di mana diameter hidraulik ditentukan oleh (Ishak, Ibrahim, Sopian, et al. 2023):

$$D_h = \frac{4PL}{2(P+L)} \quad (2)$$

Kadar aliran jisim boleh ditentukan menggunakan formula (Sivarathinamoorthy & Sureshkannan, 2021):

$$\dot{m}_{udara} = KV\rho_{udara} \quad (3)$$

Kapasiti haba, dikira oleh C_p (Ishak et al. 2024):

$$C_p = 1.0057 + 0.000066 (T-300) \quad (4)$$

Keuntungan haba yang berguna, Q_u dikira sebagai (Ishak, Ibrahim, Fazlizan, et al. 2023):

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

Kecekapan terma boleh ditentukan dengan formula (M. Jalil & J. Ali, 2021):

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_i} \times 100\% \quad (6)$$

Ralat peratusan boleh ditentukan dengan menggunakan formula ((Hussain et al. 2021):

$$\text{Ralat peratusan} = \frac{|\text{keputusan simulasi} - \text{keputusan eksperimen}|}{\text{keputusan eksperimen}} \times 100\% \quad (7)$$

Ketepatan peratusan dikira sebagai (Hussain et al. 2021):

$$\text{Ketepatan peratusan} = 100\% - \text{ralat peratusan} \quad (8)$$

JADUAL 2. Ketidakpastian alat pengukur

Peralatan	Model	Parameter	Unit	Ketidaktentuan
Pencatat data	AT4824	Suhu	°C	±0.1°C
Termogandingan	Jenis K	Suhu	°C	±0.1°C
Anemometer	Testo 450i	Halaju udara	m/s	±0.1 m/s
Meter Kuasa Suria	Meter Kuasa Suria RS PRO	Penyinaran suria	W/m ²	±1 W/m ²

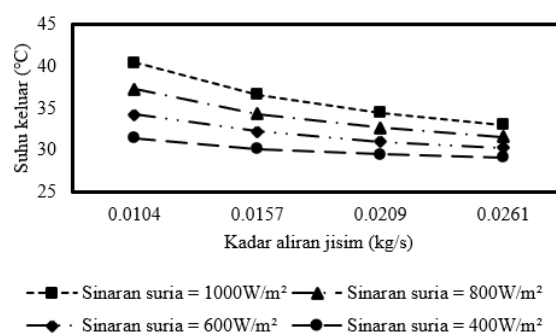
HASIL KAJIAN DAN PERBINCANGAN

PENGUMPUL UDARA SURIA LALUAN BERGANDA DENGAN SIRIP BERPERINGKAT

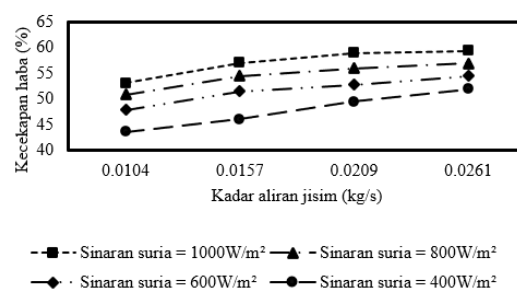
Rajah 4 menunjukkan pola berlawanan arah antara suhu keluar lawan kadar aliran jisim dalam pengumpul udara suria laluan berganda. Berdasarkan pemerhatian, peningkatan kadar aliran jisim menyebabkan penurunan suhu keluar. Empat variasi sinaran suria dan kada aliran jisim yang digunakan di dalam eksperimen, masing-masing dalam julat 400 W/m² sehingga 1000 W/m² dan 0.0104 kg/s sehingga 0.0261 kg/s. Berdasarkan Rajah 4, apabila sinaran suria ditetapkan pada 400 W/m² dan kadar aliran jisim 0.0261 kg/s, suhu keluar yang direkodkan adalah 29.1°C. Ketika sinaran suria ditingkatkan kepada 1000 W/m² menggunakan kadar aliran jisim 0.0261 kg/s, suhu keluar adalah 33°C. Ini berlaku apabila sinaran suria meningkat, haba yang diserap juga tinggi menyebabkan suhu keluar juga tinggi walaupun kadar aliran jisim dikekalkan kepada 0.0261 kg/s. Apabila sinaran suria dikekalkan kepada 1000 W/m², menggunakan kadar aliran jisim 0.0104 kg/s, suhu yang keluar adalah 40.40°C. Ini berlaku apabila kadar aliran jisim meningkat, udara bergerak semakin laju melalui saluran atas pengumpul suria menyebabkan ia tidak dapat mengambil haba sebanyak yang mungkin sebelum memasuki saluran bawah pengumpul suria. Ini dapat mengurangkan keupayaan uadra menyerap haba secara maksimum. Selain itu, faktor kecil seperti kebocoran udara antara plat penyerap dan pengumpul suria ketika proses fabrikasi juga turut menyumbang kepada penurunan suhu keluar.

Rajah 5 menunjukkan graf kecekapan haba lawan kadar aliran jisim. Ia menunjukkan apabila kadar aliran jisim meningkat, kecekapan haba juga semakin meningkat. Kecekapan haba tertinggi direkodkan adalah 59.34% menggunakan sinaran suria 1000 W/m² dan kadar aliran jisim 0.0261 kg/s manakala kecekapan haba terendah adalah 43.51% menggunakan sinaran suria 400 W/m² dan kadar aliran jisim 0.0104 kg/s. Berdasarkan persamaan (13), apabila kadar aliran jisim meningkat, ia akan menyebabkan perbezaan suhu menjadi lebih kecil tetapi masih lagi mampu untuk meningkatkan jumlah tenaga haba yang diserap secara keseluruhan (M. Jalil & J. Ali, 2021).

Ini kerana lebih banyak udara yang terlibat dalam proses pemindahan haba.



RAJAH 4. Suhu keluar untuk PULSBS



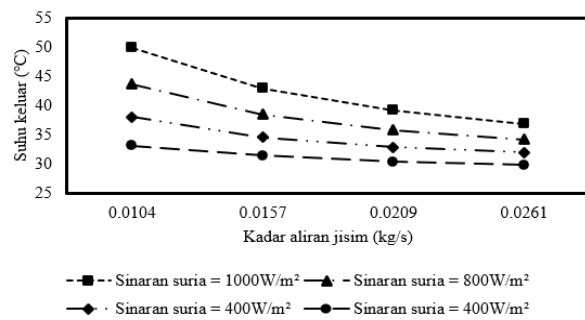
RAJAH 5. Kecekapan haba untuk PULSBS

PENGUMPUL UDARA SURIA LALUAN BERGANDA DENGAN SIRIP BERPERINGKAT DAN KOMPOSIT BAHAN PERUBAHAN FASA MEDIA BERLIANG

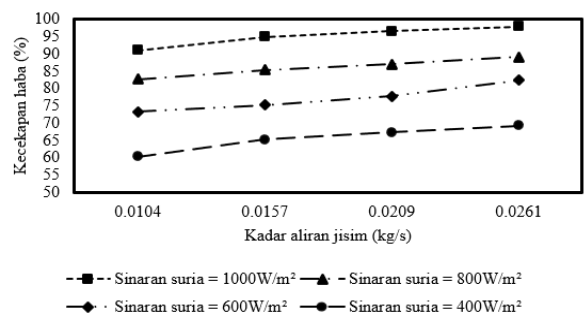
Berdasarkan analisis eksperimen PUSLB dengan sirip berperingkat, lilin parafin dan bulu keluli telah ditambah ke dalam analisis eksperimen ini. Rajah 6 menggambarkan suhu keluar secara tidak langsung berkadar dengan kadar aliran jisim. Trend graf menunjukkan apabila kadar aliran jisim meningkat, suhu keluar akan berkurangan. Penyinaran suria dan kadar aliran jisim yang digunakan dalam analisis eksperimen adalah antara 400 – 1000 W/m² dan 0.0104 - 0.0261 kg/s, masing-masing. Pemerhatian menunjukkan apabila sinaran suria 1000 W/m² dan kadar aliran jisim

0.0104kg/s, ia telah mencapai suhu yang paling tinggi iaitu 50°C dan suhu yang paling rendah adalah 29.80°C apabila menggunakan sinaran suria 400 W/m² dan kadar aliran jisim 0.0104kg/s. Rajah 7 menunjukkan kadar aliran jisim berkadar terus dengan kecekapan haba. Kecekapan haba tertinggi diperolehi ialah 97.91% menggunakan 1000 W/m² pada 0.0261kg/s manakala kecekapan haba terendah yang diperolehi ialah 60.33% menggunakan 400 W/m² pada 0.0104kg/s. Dengan menambah lilin parafin dan bulu keluli ke dalam pengumpul udara suria laluan berganda, ia dapat memberi perbezaan yang besar di mana lilin parafin akan menyimpan haba pada siang hari dan mempunyai tempoh pelepasan ketika waktu malam dan bulu keluli (media berliang) bertindak sebagai pemindahan haba konvektif yang mempunyai fungsi yang sama seperti sirip juga (Sharol et al. 2022). Oleh itu, terdapat dua jenis media yang membantu meningkatkan pemindahan haba konvektif dua kali ganda lebih banyak daripada pemindahan haba biasa (Goel et al. 2021)

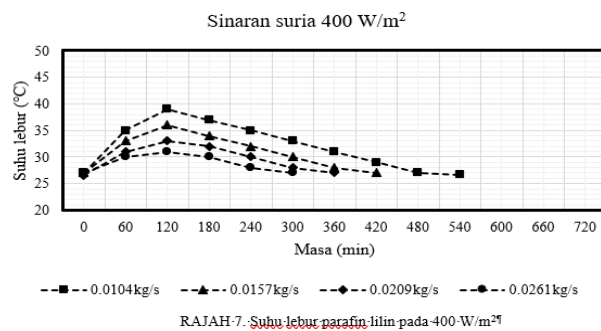
Rajah 8 sehingga Rajah 11 memaparkan kesan kadar aliran jisim pada takat lebur komposit lilin parafin bulu keluli, dan suhu keluar udara berbanding masa caj/pelepasan untuk kadar aliran jisim yang berbeza dan penyinaran suria antara 0.0104 – 0.0261kg/s dan 400 –1000 W/m², masing-masing. Keputusan menunjukkan bahawa peningkatan kadar aliran jisim menyebabkan per lengahan suhu lebur bulu lilin parafin semasa proses pengecasan. Selain itu, masa pembekuan bergantung kepada kadar aliran jisim secara songsang yang boleh menjadi faktor sumbangan untuk mengurangkan pertukaran haba antara plat penyerap dan aliran udara apabila kadar aliran jisim meningkat. Juga, dapat diperhatikan bahawa hasil takat lebur lilin dan suhu udara keluar melengkung menurun sama seperti aliran jisim meningkat dari 0.0104kg/s hingga 0.0261kg/s dalam pengumpul udara suria. Suhu takat lebur maksimum yang dicapai oleh aliran udara di PUSLB dengan lilin parafin bulu keluli semasa proses ini ialah 44°C. Kajian dapati apabila berlaku proses takat lebur, kecekapan terma penyimpanan juga meningkat apabila tenaga makin banyak diserap dengan lapisan lilin parafin disebabkan oleh konduksi haba. Apabila masuk kepada fasa pembekuan, prestasi penyimpanan semakin menurun apabila sinaran suria juga semakin menurun. Tetapi apabila sinaran suria meningkat, prestasi masa untuk penyimpanan juga semakin meningkat sehingga 660min.



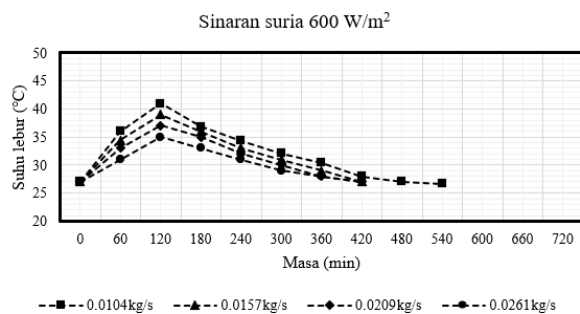
RAJAH 6. Suhu keluar untuk PULSBSBPFMB



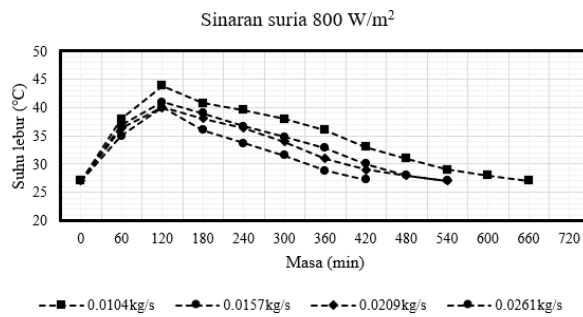
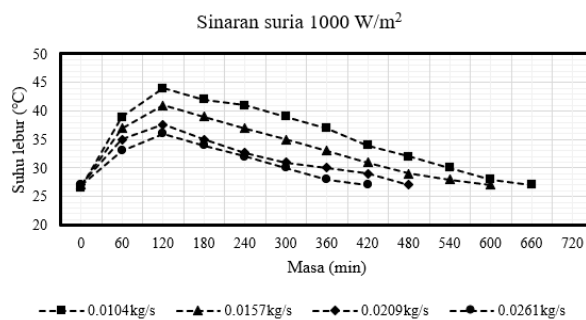
RAJAH 7. Kecekapan haba PULSBSBPFMB



RAJAH 8. Suhu lebur parafin lilin pada 400 W/m²



RAJAH 9. Suhu lebur parafin lilin pada 600 W/m²

RAJAH 10. Suhu lebur parafin lilin pada 800 W/m²RAJAH 11. Suhu lebur parafin lilin pada 1000 W/m²

PENGESAHAN PERBEZAAN ANTARA EKSPERIMEN PUSLB DENGAN SIRIP BERPERINGKAT DAN SIRIP BERPERINGKAT KOMPOSIT BAHAN PERUBAHAN FASA MEDIA BERLIANG

Eksperimen ini bertujuan untuk mengesahkan perbezaan prestasi keseluruhan terma antara kedua – dua konfigurasi menggunakan PUSLB, iaitu dengan sirip berperingkat (PUSLBS) sahaja dan dengan sirip berperingkat dan komposit bahan perubahan fasa media berliang (PUSLBSBPFMB) seperti di Jadual 3. Ujian eksperimen dijalankan menggunakan empat jenis variasi sinaran suria iaitu 400 W/m² sehingga 1000 W/m² menggunakan selang sebanyak 200. Selain itu, bagi kadar aliran jisim, empat julat digunakan bermula dengan 0.0104 kg/s, 0.0157 kg/s,

0.0209 kg/s dan 0.0261 kg/s bagi melihat perubahan terhadap kecekapan pemindahan haba.

Hasil kajian menunjukkan PUSLBSBPFMB mempunyai peratusan haba yang lebih tinggi berbanding PUSLBS dalam semua keputusan. Pada sinaran suria 1000 W/m² dan kadar aliran jisim 0.0261 kg/s, peratusan haba bagi PUSLBS ialah 59.34% dan bagi PUSLBSBPFMB ialah 97.91%. Ini menunjukkan peningkatan haba yang ketara sebanyak 39.39%. Secara umumnya, nilai peningkatan haba yang dicatatkan adalah dalam lingkungan 25% sehingga 42% bergantung kepada kadar aliran jisim, sinaran suria, jenis pemindahan haba dan pemilihan bahan yang digunakan (Mund et al. 2021; Vengadesan & Senthil, 2020; Yusaidi et al. 2023).

Peningkatan kecekapan haba ini jelas menunjukkan kelebihan reka bentuk PUSLBSBPFMB yang menggabungkan sirip berperingkat, bahan perubahan fasa (lilin parafin) dan media berliang (bulu keluli). Reka bentuk ini telah berjaya membolehkan proses penyerapan dan pemindahan haba berlaku dengan efisien berbanding PUSLBS dan sistem konvensional (Yusaidi, Fauzan, Abdullah, & Ibrahim, 2024). Menurut kajian terdahulu, pemilihan reka bentuk PUSLB sangat penting. Antara nya adalah, penggunaan warna hitam untuk plat penyerap, penebat untuk mengelakkan kehilangan haba dan jenis penggunaan penyimpanan bahan (Ghritlahre et al. 2022). Semua ini telah diambil kira untuk mereka bentuk PUSLBSBPFMB. Kajian terdahulu juga menunjukkan pemilihan parafin lilin adalah terbaik kerana ia murah dan mesra alam (Salih et al. 2019). Meletakkan sirip berbentuk berlian di bahagian atas dan bulu keluli sebagai media berliang di bahagian laluan bawah ternyata membantu untuk memudahkan proses pemindahan haba berlaku dengan lebih cepat (Yusaidi, Fauzan, Abdullah, Ibrahim, et al. 2024). Secara keseluruhannya, eksperimen ini dapat membuktikan bahawa penggunaan komposit lilin parafin bulu keluli dan reka bentuk PUSLB yang inovatif mampu meningkatkan prestasi pemindahan haba sekaligus tingkatkan prestasi keseluruhan kecekapan haba. Ini amat sesuai untuk diaplikasikan dalam sistem pemanasan ruang dan juga sektor pertanian.

JADUAL 3. Ringkasan jadual kecekapan haba

Sinaran suria, I (W/m ²)	ṁ (kg/s)	Eksperimen	Peratusan haba (%)	Peningkatan peratusan haba (%)
400	0.0104	PUSLBS	43.51	27.87
		PUSLBSBPFMB	60.33	
	0.0157	PUSLBS	45.99	29.55
		PUSLBSBPFMB	65.27	
	0.0209	PUSLBS	49.45	26.47
		PUSLBSBPFMB	67.25	
	0.0261	PUSLBS	51.92	25.00
		PUSLBSBPFMB	69.23	

continue...

	0.0104	PUSLBS	47.80	34.68
		PUSLBSBPFMB	73.18	
	0.0157	PUSLBS	51.43	31.58
600		PUSLBSBPFMB	75.16	
	0.0209	PUSLBS	52.74	32.20
		PUSLBSBPFMB	77.80	
	0.0261	PUSLBS	54.39	34.00
		PUSLBSBPFMB	82.41	
	0.0104	PUSLBS	50.78	38.50
		PUSLBSBPFMB	82.58	
	0.0157	PUSLBS	54.44	36.17
800		PUSLBSBPFMB	85.30	
	0.0209	PUSLBS	55.88	35.80
		PUSLBSBPFMB	87.03	
	0.0261	PUSLBS	56.86	36.11
		PUSLBSBPFMB	89.01	
	0.0104	PUSLBS	53.01	41.74
		PUSLBSBPFMB	90.98	
	0.0157	PUSLBS	56.96	40.00
1000		PUSLBSBPFMB	94.94	
	0.0209	PUSLBS	58.94	38.93
		PUSLBSBPFMB	96.52	
	0.0261	PUSLBS	59.34	39.39
		PUSLBSBPFMB	97.91	

KESIMPULAN

Kajian ini membentangkan perbandingan eksperimen untuk pengumpul udara suria laluan berganda dengan sirip berbentuk berlian berperingkat dan sirip berbentuk berlian dengan komposit bahan perubahan fasa media berliang untuk kecekapan haba. Keputusan yang diperolehi menunjukkan bahawa ia sesuai digunakan untuk aplikasi yang mempunyai suhu rendah dan sederhana. Hasil kajian ini dapat diringkaskan dengan:

1. Sirip berbentuk berlian dan bulu keluli (media berliang) digunakan di dalam eksperimen, yang berfungsi untuk meningkatkan kawasan pemindahan haba
2. Penggunaan lilin parafin (bahan perubahan fasa) pada bahagian bawah PUSLB adalah untuk dijadikan sebagai tempat penyimpanan haba dan dilepaskan secara perlahan – lahan ketika cuaca mendung atau pada waktu malam.
3. Kecekapan haba yang tertinggi dan terendah diperolehi pada sinaran suria 1000 W/m² untuk PUSLBS ialah 53.01% dan 59.34% menggunakan kadar aliran jisim 0.0104kg/s dan 0.0261kg/s.

4. Kecekapan haba yang tertinggi dan terendah diperolehi pada sinaran suria 1000 W/m² untuk PUSLBSBPFMB ialah 97.91% dan 90.98% menggunakan kadar aliran jisim 0.0104kg/s dan 0.0261kg/s.
5. Suhu keluar tertinggi yang diperolehi untuk PUSLBS dan PUSLBSBPFMB ialah 40.40°C dan 50°C yang mempunyai kenaikan 10.4°C.

PENGHARGAAN

Penulis merakamkan ucapan terima kasih kepada UKM kerana memberikan sokongan kewangan untuk kajian ini di bawah geran bernombor UKM-GGPM-2022-068. Selain itu, kami ingin mengucapkan terima kasih kepada UKM kerana membantu Nurul Jannah dengan perbelanjaan ijazah sarjananya dengan menawarkan biasiswa (Zamalah UKM).

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

- Alam, T. & Kim, M. H. 2017. Performance improvement of double-pass solar air heater – A state of art of review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79: 779–793. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.087>
- Assadeg, J., Abd Hamid, A. S., Abd Rahman, A. B., Fudholi, A., Fazlizan, A., Al-Waeli, A. H. A., Sopian, K. & Ibrahim, A. 2022. Thermal performance of a finned double-pass solar air collector integrated with a nanoparticle enhanced-PCM tubular storage system. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4079377>
- Baig, W. & Ali, H. M. 2019. An experimental investigation of performance of a double pass solar air heater with foam aluminum thermal storage medium. *Case Studies in Thermal Engineering* 14: 100440. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100440>
- Fahmi, M. S., Khalil, W. H. & Shareef, A. J. 2020. Energy and exergy analysis of a finned-plate double pass solar air heater with different arrangement. *Journal of Power and Energy Engineering* 8(10): 1–17. <https://doi.org/10.4236/jpee.2020.810001>
- Ghritlahre, H. K., Verma, M., Parihar, J. S., Mondloe, D. S. & Agrawal, S. 2022. A detailed review of various types of solar air heaters performance. *Solar Energy* 237: 173–195. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.042>
- Goel, V., Hans, V. S., Singh, S., Kumar, R., Pathak, S. K., Singla, M., Bhattacharyya, S., Almatrafi, E., Gill, R. S. & Saini, R. P. 2021. A comprehensive study on the progressive development and applications of solar air heaters. *Solar Energy* 229: 112–147. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.040>
- Holman, J. P. 2012. *Experimental methods for engineers*. 8th ed. New York: McGraw Hill.
- Hussain, M. K., Rasham, A. M. & Alshadeedi, B. M. 2021. Finite element modeling of finned double-pass solar air heaters. *Proceedings of the 4th International Conference on Energy Conservation and Efficiency (ICECE)*. <https://doi.org/10.1109/ICECE51984.2021.9406296>
- Imaduddin, S., Ibrahim, A., Fazlizan, A., Ishak, A. A., Nawab, F. & Hamid, A. S. A. 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): 1418–1430. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v13i3.14136.g8814>
- Ishak, M. A. A. bin, Ibrahim, A., Fazlizan, A., Fauzan, M. F., Sopian, K. & Rahmat, A. A. 2023. Exergy performance of a reversed circular flow jet impingement bifacial photovoltaic thermal (PVT) solar collector. *Case Studies in Thermal Engineering* 49: 103322. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103322>
- Ishak, M. A. A., Ibrahim, A., Lim, Y. S., Amel, D. & Zouheyr, N. 2024. A recent jet impingement PVT collector technique developed (reversed circular flow jet impingement): Energy and exergy analysis. *Jurnal Kejuruteraan* 36(5): 1885–1895. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2024-36\(5\)-09](https://doi.org/10.17576/jkukm-2024-36(5)-09)
- Ishak, M. A. A., Ibrahim, A., Sopian, K., Fauzan, M. F., Rahmat, M. A. A. & Hamid, A. S. A. 2023. Heat transfer performance of a novel circular flow jet impingement bifacial photovoltaic thermal PVT solar collector. *International Journal of Renewable Energy Research* 13(2): 818–830. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v13i2.13886.g8756>
- Jalil, J. M. & Ali, S. J. 2021. Thermal investigations of double pass solar air heater with two types of porous media of different thermal conductivity. *Engineering and Technology Journal* 39(1A): 79–88. <https://doi.org/10.30684/etj.v39i1A.1704>
- Machi, M. H., Al-Neama, M. A., Buzás, J. & Farkas, I. 2022. Energy-based performance analysis of a double pass solar air collector integrated to triangular shaped fins. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 13(1): 219–229. <https://doi.org/10.1007/s40095-021-00422-z>
- Menni, Y., Azzi, A. & Chamkha, A. 2018. A review of solar energy collectors: Models and applications. *Journal of Applied and Computational Mechanics* 4(4): 375–401. <https://doi.org/10.22055/JACM.2018.25686.1286>
- Mondragón, R., Sánchez, D., Cabello, R., Llopis, R. & Juliá, J. E. 2019. Flat plate solar collector performance using alumina nanofluids: Experimental characterization and efficiency tests. *PLoS ONE* 14(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212260>
- Mund, C., Rathore, S. K. & Sahoo, R. K. 2021. A review of solar air collectors about various modifications for performance enhancement. *Solar Energy* 228: 140–167. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.040>
- Murali, G., Sai Nandan, B., Sampath Kumar Reddy, N., Teja, D. & Kalyan Kumar, N. 2020. Experimental study on double pass solar air heater with fins at lower and upper channel. *Materials Today: Proceedings* 21: 578–583. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.718>
- Muthukumaran, J. & Senthil, R. 2022. Experimental performance of a solar air heater using straight and spiral absorber tubes with thermal energy storage. *Journal of Energy Storage* 45: 103796. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103796>
- Nagaraj, M., Reddy, M. K., Honnesara Sheshadri, A. K. & Karanth, K. V. 2023. Numerical analysis of an aerofoil fin integrated double pass solar air heater for thermal performance enhancement. *Sustainability* 15(1). <https://doi.org/10.3390/su15010591>
- Raj, A. K., Srinivas, M. & Jayaraj, S. 2019. A cost-effective method to improve the performance of solar air heaters using discrete macro-encapsulated PCM

- capsules for drying applications. *Applied Thermal Engineering* 146: 910–920. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.055>
- Razali, S. N., Ibrahim, A., Fazlizan, A., Fauzan, M. F., Aqil, M., Rahmat, A. & Jannah, N. 2025. Experimental investigation on use of U-grooved fins to enhance the performance of photovoltaic modules. *Jurnal Kejuruteraan* 37(3): 1339–1348.
- Sajawal, M., Rehman, T. U., Ali, H. M., Sajjad, U., Raza, A. & Bhatti, M. S. 2019. Experimental thermal performance analysis of finned tube-phase change material based double pass solar air heater. *Case Studies in Thermal Engineering* 15: 100543. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100543>
- Salih, S. M., Jalil, J. M. & Najim, S. E. 2019. Double-pass solar air heater (DP-SAH) utilizing latent thermal energy storage (LTES). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 518(3): 032038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/518/3/032038>
- Sharol, A. F., Razak, A. A., Majid, Z. A. A., Azmi, M. A. A., Tarminzi, M. A. S. M., Ming, Y. H., Zakaria, Z. A., Harun, M. A., Fazlizan, A. & Sopian, K. 2022. Effect of thermal energy storage material on the performance of double-pass solar air heater with cross-matrix absorber. *Journal of Energy Storage* 51: 104494. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104494>
- Singh, V. P., Jain, S., Karn, A., Kumar, A., Dwivedi, G., Meena, C. S., Dutt, N. & Ghosh, A. 2022. Recent developments and advancements in solar air heaters: A detailed review. *Sustainability* 14(19): 12149. <https://doi.org/10.3390/su141912149>
- Sivarathinamoorthy, H. & Sureshkannan, G. 2021. The influence of internal heat storage material and longitudinal fins on a double-pass solar air heater performance. *Journal of Solar Energy Engineering* 143(1). <https://doi.org/10.1115/1.4047454>
- Vengadesan, E. & Senthil, R. 2020. A review on recent developments in thermal performance enhancement methods of flat plate solar air collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 134: 110315. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110315>
- Yusaidi, N. J., Fauzan, M. F., Abdullah, A. F. & Ibrahim, A. 2024. Numerical simulation of arrangement of diamond shaped fins in double pass solar air heater for drying application. *Proceedings of the International Conference on Power and Renewable Energy Engineering (PREE)*: 1–4. <https://doi.org/10.1109/PREE63126.2024.10955836>
- Yusaidi, N. J., Fauzan, M. F., Abdullah, A. F., Ibrahim, A. & Ishak, A. A. 2024. Theoretical and experimental investigations on the effect of double pass solar air heater with staggered-diamond shaped fins arrangement. *Case Studies in Thermal Engineering* 60: 104619. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104619>
- Yusaidi, N. J., Fauzan, M. F., Ibrahim, A., Jarimi, H., Fazlizan, A. & Sopian, K. 2023. Recent development on double pass solar thermal collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 183: 113545. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113545>