

STUDI NUMERIK KINERJA HEAT SINK BERBASIS ALIRAN DUA FASE DENGAN ETIL ASETAT SEBAGAI ALTERNATIF PENDINGIN *CONCENTRATED PHOTOVOLTAICS*

Ilham Dwi Arirohman^{1*}, Khoirun Naimah¹, Muhammad Syaukani¹, Sabar¹, Akbar Dwi Yosri¹, Ira Hannum S.¹, M. Ridho Hilman¹

¹ Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan, Indonesia 35365

* Correspondence: ilham.arirohman@tse.itera.ac.id

Abstrak

Concentrated Photovoltaics (CPV) adalah teknologi yang dapat meningkatkan konversi energi surya dengan memanfaatkan fenomena pemfokusan cahaya sehingga fluks iradiasi matahari yang diterima oleh sel fotovoltaik meningkat berkali lipat. Namun, seiring dengan meningkatnya densitas energi yang difokuskan pada sel PV, suhu permukaan sel PV juga akan meningkat, yang mengakibatkan penurunan efisiensi serta kemungkinan terjadinya *thermal fatigue*. Oleh karena itu, diperlukan sistem pendingin yang andal untuk CPV. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja heat sink berbasis aliran dua fase dengan etil asetat ($C_4H_8O_2$) sebagai fluida kerjanya. Etil asetat memiliki titik didih cukup rendah dan nilai kalor laten penguapan tinggi, sehingga cukup efektif dalam memindahkan kalor. Metode yang digunakan adalah simulasi numerik dengan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Hasil penelitian menunjukkan bahwa efektivitas perpindahan panas heat sink mencapai 86,03%, dengan nilai resistansi termal sebesar $0,0073 \text{ m}^2\text{C/W}$. Suhu tertinggi pada bagian logam heatsink mencapai 105°C , menunjukkan tren peningkatan tetapi tidak signifikan, sedangkan suhu fluida kerja pendingin cenderung konstan pada 55°C . Hal ini menunjukkan bahwa proses evaporasi berhasil menjaga suhu heatsink tetap stabil.

Kata Kunci: CPV; Efektivitas; Etil asetat; Heat sink; Aliran dua fase

Abstract

Concentrated Photovoltaic (CPV) technology offers the potential to enhance solar energy conversion by utilizing light focusing technology to increase the solar irradiation flux received by photovoltaic cells. On the other hand, as the solar energy density increases on a PV cell, the surface temperature of the PV also rises, which results in decreased energy conversion efficiency and the possibility of thermal fatigue. Therefore, a reliable cooling system is required for CPV. This study aims to evaluate the performance of a two-phase flow heat sink with ethyl acetate ($C_4H_8O_2$) as the working fluid, which has a low boiling point and high heat of vaporization, making it quite effective for heat transfer. The method used is numerical simulation using *Computational Fluid Dynamics* (CFD) software. The simulation results show that the heat sink heat transfer effectiveness is 86.03%, with a thermal resistance value of $0.0073 \text{ m}^2\text{C/W}$. The highest temperature on the solid part is 105°C , showing an increasing trend but not significantly, while the average fluid temperature tends to remain constant at 55°C . This indicates that the evaporation process is able to maintain the heatsink temperature at stable level.

Keywords: CPV; Effectiveness; Ethyl acetate; Heat sink; Two phase flow

Received: 06 Maret 2025
Revised: 01 May 2025
Accepted: 15 May 2025
Published: 02 July 2025

DOI: 10.31884/jtt.v11i2.814



Copyright: © 2025 by JTT

1. PENDAHULUAN

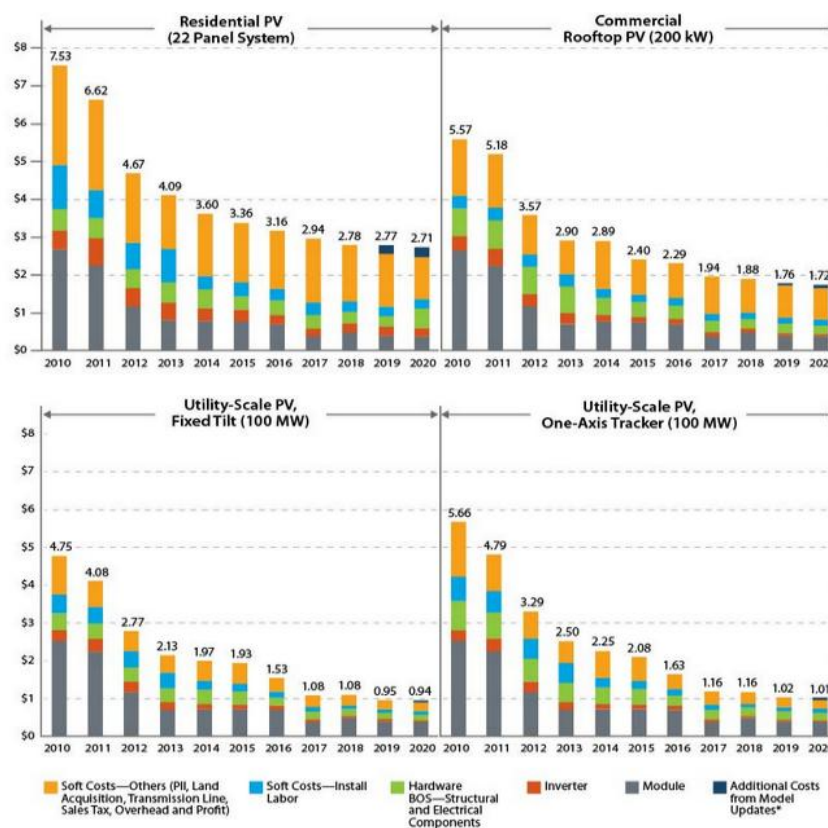
Pemanfaatan teknologi pembangkit listrik ramah lingkungan dengan menggunakan sel *photovoltaics* (PV) mengalami perkembangan yang signifikan sejak satu dekade terakhir. Hal ini dikarenakan sifatnya yang modular (dapat dipasang dengan kapasitas skala kecil hingga skala pembangkit/utilitas), instalasinya fleksibel, dan tentu harga produksinya semakin murah. Berdasarkan data historis dari Gambar 1, terjadi penurunan harga yang signifikan pada biaya instalasi pembangkit listrik tenaga surya baik untuk skala rumah tangga, komersial *rooftop* PV, maupun skala utilitas. Masing-masing mengalami penurunan biaya sebesar 64%, 69%, dan 82 % pada PLTS skala rumah tangga, komersial *rooftop* PV, dan skala utilitas pada periode waktu 2010 hingga 2020 (Feldman dkk., 2020). Namun demikian, teknologi PV konvensional memiliki batasan terutama dalam hal efisiensi konversi energinya. *Concentrated Photovoltaics* (CPV) menawarkan potensi untuk meningkatkan efisiensi konversi energi surya dengan memanfaatkan teknologi pemfokusan cahaya untuk meningkatkan fluks radiasi matahari yang diterima oleh sel surya (Ceballos dkk., 2023). Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan nilai efisiensi beberapa jenis CPV dapat mencapai efisiensi di atas 40% (Gambar 2) (National Renewable Energy Laboratory, 2024). Selain itu CPV juga memiliki biaya instalasi yang lebih rendah jika dibandingkan dengan PV biasa karena lebih sedikit memerlukan area aktif untuk menghasilkan output listrik yang sama (Ejaz dkk., 2021).

Permasalahan utama yang ada pada CPV adalah meningkatnya suhu seiring dengan meningkatnya fluks radiasi matahari yang difokuskan pada sel PV. Suhu tinggi pada sel PV memengaruhi kondisi operasi dari PV yaitu menyebabkan kerugian dalam hal absorpsi radiasi matahari, degradasi efisiensi sel, *current mismatching*, *hotspot*, dan *thermal fatigue* (Alzahrani dkk., 2021; Hong dkk., 2020). Oleh karena itu, sistem pendinginan yang efektif menjadi salah satu faktor krusial dalam pengembangan CPV untuk mempertahankan temperatur sel tetap berada dalam efisiensi yang paling optimal (Valera dkk., 2021).

Pendinginan berbasis aliran dua fase (*two phase flow*) menjadi alternatif yang menjanjikan dalam mengatasi tantangan manajemen kalor pada perangkat CPV. Aliran dua fase adalah suatu fenomena yang melibatkan dua fluida yang mengalir secara simultan dalam sebuah konduit atau pipa (Arirohman dkk., 2021; Arirohman & Hudaya, 2019). Mekanisme perpindahan panas pada aliran dua fase memanfaatkan fenomena perubahan fase cair-ke-gas dari fluida kerja, yang secara signifikan meningkatkan efisiensi perpindahan panas dibandingkan sistem pendingin konvensional berbasis satu fase. Hal ini dikarenakan nilai kalor laten pendidihan jauh lebih besar dibandingkan dengan kalor spesifik sensibel.

Penelitian – penelitian sebelumnya dengan berbagai sistem pendinginan CPV telah digunakan untuk mempertahankan suhu dari sel PV, seperti *water-based cooling*, *pulsating flow cooling system*, *two phase flow microchannel heat sink*, *PCM-based cooling*, *spray cooling*, *nanofluid based cooling*, dan *thermoelectric-based cooling* (Hong dkk., 2020; Huaxu dkk., 2020; Ibrahim dkk., 2023; Jowkar dkk., 2023; Nada dkk.,

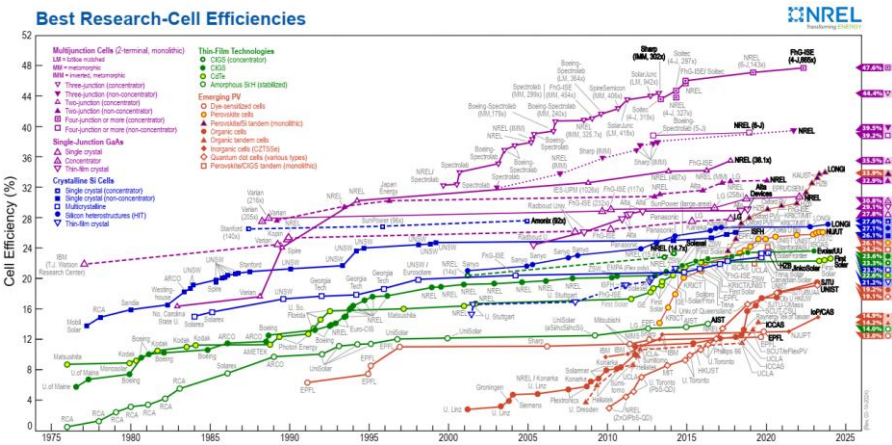
2018; Valera dkk., 2021; Wang dkk., 2023; Wu dkk., 2024; Yildirim dkk., 2022). Tantangan untuk sistem pendinginan adalah efektivitas heat transfERNYA, stabilitas, dan biaya. Oleh karena itu, penelitian terkini berfokus pada pengembangan sistem pendingin CPV yang lebih efektif dan ekonomis. Salah satu metode yang cukup efektif adalah pendinginan berbasis aliran dua fase. Etil asetat ($C_4H_8O_2$) merupakan salah satu senyawa kimia yang digunakan dalam beberapa aplikasi industri sebagai pendingin. Senyawa ini memiliki titik didih yang relatif rendah ($77,1^\circ C$) dibandingkan air ($100^\circ C$) (NIST, 2025). Namun demikian titik didih yang relatif rendah juga memiliki tantangan sendiri yaitu sifat toksik etil asetat, sehingga diperlukan langkah penanggulangan agar sistem pendingin tidak bocor. Sementara itu pendingin lain seperti PCM memiliki nilai konduktivitas termal yang rendah dan proses peleburan yang tidak merata dapat menaikkan nilai *pressure drop* (Prakash dkk., 2024). Nanofluida sebagai salah satu alternatif lain metode preparasi dan penggunaannya memiliki beberapa keterbatasan.



Gambar 1. Penurunan biaya instalasi solar PV selama periode 2010-2020 (Feldman dkk., 2020).

Misalnya, sedimentasi dan agregasi nanopartikel sulit dikendalikan dan dapat meningkatkan viskositas nanofluida, yang pada gilirannya membutuhkan daya pompa tambahan pada perangkat yang digunakan. Selain itu, proses sintesis nanofluida tergolong kompleks dan hingga kini belum menjadi proses yang hemat biaya, bahkan tergolong mahal dalam beberapa kasus tertentu (Moita dkk., 2021). Oleh sebab itu pada

penelitian ini dilakukan analisis awal pengembangan model heat sink berbasis aliran dua fase dengan fluida kerja etil asetat untuk pendingin CPV dengan simulasi numerik.



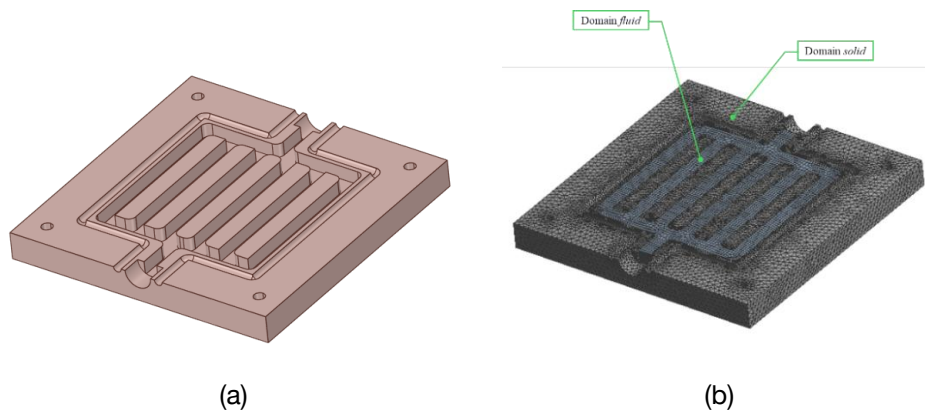
Gambar 2. Efisiensi sel PV berdasarkan jenisnya (National Renewable Energy Laboratory, 2024).

2. METODE

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah simulasi numerik menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Tahapan pertama yang dilakukan adalah membuat model *Computer Aided Design* (CAD) dari *heat sink* (Gambar 3a). Model *heat sink* berbentuk persegi dengan panjang sisi 100 mm dan ketebalan 10 mm. *Heat sink* memiliki fitur multikanal pada area perpindahan panasnya, hal ini dilakukan untuk memperluas area perpindahan panas yang terjadi sehingga proses perpindahan panas dari CPV ke fluida kerja dapat optimal. Selanjutnya adalah membuat domain fluida berdasarkan alur pada model *heat sink* tadi, sehingga terdapat dua domain yaitu *solid* dan *fluid*. Hal ini diperlukan untuk memodelkan *conjugate heat transfer* yang terjadi. Selanjutnya adalah proses *meshing*, pada domain *solid* diterapkan *unstructured mesh* karena bentuk geometrinya yang cukup kompleks dengan beberapa *hole* dan alur, sementara pada domain *fluid* diterapkan *structured mesh* (Gambar 3b). Parameter dari proses *meshing* ditunjukkan pada Tabel 1. Mesh dari model memiliki jumlah node 66500 dan elemen 283017, dengan rerata *skewness*, *orthogonality*, dan *element quality* masing-masing adalah 0,24; 0,76; dan 0,83. Hasil proses *meshing* ini sudah memenuhi standar kriteria untuk simulasi CFD, dimana untuk untuk *skewness* kurang dari 0,80; *orthogonality* lebih besar 0,20; dan *element quality* lebih besar dari 0,2 dikategorikan kualitas *mesh* yang baik (Fatchurrohman & Chia, 2017).

Tabel 1. Parameter mesh.

No.	Mesh metric	Statistics	Skewness	Orthogonality	Element Quality
1.	Nodes	66500	-	-	-
2.	Element	283017	-	-	-
3.	Min	-	3,30×10 ⁻⁴	0,13	0,18
4.	Max	-	0,86	1,00	1,00
5.	Average	-	0,24	0,76	0,83
6.	Standard deviation	-	0,14	0,14	0,11



Gambar 3. (a) Geometri model heat sink (b) Mesh model heat sink.

Tahapan ketiga adalah mendefinisikan *boundary condition* dan *initial condition*. Pada geometri model terdapat 5 *boundary condition* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4 dan Tabel 2. Bagian *heat wall* adalah area tempat CPV akan diletakkan, pada area ini menerima paparan radiasi sinar matahari yang terkonsentrasikan dengan bantuan lensa atau cermin. Kemudian terdapat *inlet* dan *outlet* untuk aliran fluida kerja yang melalui alur di dalam *heat sink*. Area yang merupakan perbatasan antara domain *solid* dan *fluid* didefinisikan sebagai *interface wall* dengan jenis *boundary coupled wall*. Selain itu sisanya didefinisikan sebagai *isolated wall*. Nilai temperatur awal diatur sesuai dengan temperatur rerata lingkungan yaitu 30°C.

Tabel 2. *Boundary condition*, nilai, dan jenisnya.

No.	<i>Boundary</i>	Jenis <i>boundary</i>	Nilai
1.	<i>Inlet</i>	<i>massflow inlet</i>	0,00225 kg/s
2.	<i>Outlet</i>	<i>Outflow</i>	-
3.	<i>Heat wall</i>	<i>Heat flux wall</i>	8000 W/m ²
4.	<i>Isolated wall</i>	<i>Adiabatic wall</i>	0 W/m ²
5.	<i>Interface wall</i>	<i>Coupled wall</i>	-

Tahapan keempat adalah memodelkan fenomena aliran dua fase yang terjadi saat proses perpindahan panas dari *solid* ke *fluid*. Model VoF (*Volume of Fluid*) digunakan untuk memodelkan aliran dua fase ini dengan mekanisme evaporasi-kondensasi untuk jenis interaksi massa-energi antar fase. Untuk model turbulensinya digunakan model *k-ε realizable*, model turbulensi ini memiliki kestabilan yang baik ketika dikopel dengan model VoF. Selanjutnya untuk skema *pressure-velocity coupling*-nya menggunakan SIMPLEC dengan *skewness correction 2*. Sementara itu diskretisasi spasialnya, untuk gradien menggunakan *least square cell based*, *pressure* menggunakan PRESTO, *volume fraction* menggunakan Geo-reconstruct, lalu untuk *momentum*, *turbulent kinetic energi*, *turbulent dissipation rate*, dan *energy* masing-masing menggunakan *second order upwind*. Diskretisasi waktu untuk simulasi transien menggunakan *first order implicit*.

Tahapan kelima adalah proses kalkulasi. Proses kalkulasi menggunakan *time step* awal 10^{-5} s dengan jenis *increment adaptive*. Penentuan *time step* sangat krusial dalam simulasi transien untuk memastikan nilai *Courant number* berada di bawah dua, yang merupakan kriteria untuk simulasi transien yang stabil dan akurat. Simulasi dilakukan hingga mencapai total waktu aliran 800 s. Tahapan terakhir adalah proses *post processing* untuk mengekstrak data hasil simulasi dalam bentuk visual (kontur dan vektor) maupun numerik.

Penelitian ini menggunakan material tembaga (domain *solid*) dan etil asetat (domain *fluid*). Tembaga dipilih sebagai material *heat sink* karena sifat konduksi panasnya yang sangat baik, sementara etil asetat dipilih karena memiliki nilai titik didih yang relatif rendah ($77,1^{\circ}\text{C}$), biaya relatif rendah, dan lebih ramah lingkungan. Tabel 3 menunjukkan *thermophysical properties* dari material penelitian. Persamaan 1 berikut ini adalah fungsi *piecewise* untuk nilai kalor jenis etil asetat (*vapor*).

$$C_p(T) = 0,79313T + 9,34958 \times 10^{-4}T^2 + 4,21945 \times 10^6T^3 - 4,67025 \times 10^9T^4 + 1,40451 \times 10^{-12}T^5 \quad (1)$$

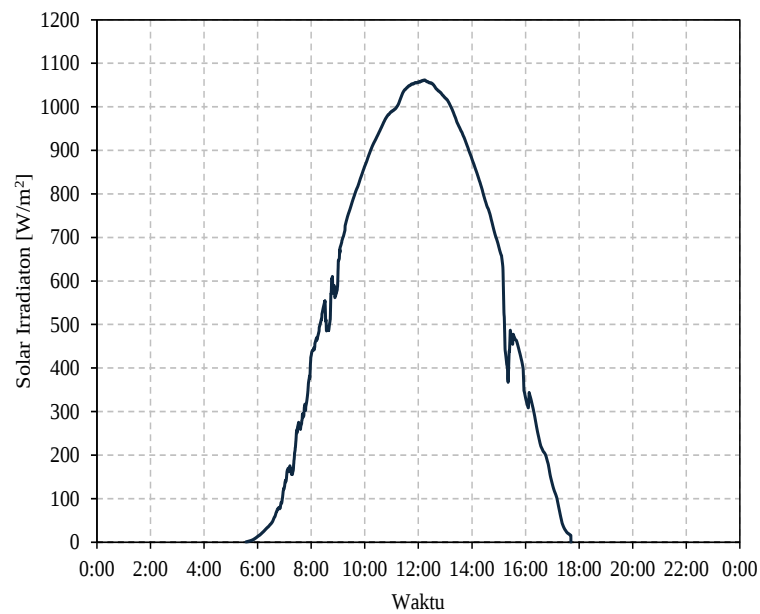
Tabel 3. *Thermophysical properties* dari material.

No.	<i>Thermophysical Properties</i>	Etil asetat	Etil asetat	Tembaga
		<i>liquid</i>	<i>vapor</i>	<i>solid</i>
1.	Density (kg/m^3)	900	3,04	8978
2.	Kalor jenis (J/kg-K)	2010	<i>Pers. (1)</i>	381
3.	Konduktivitas termal (W/m-K)	0,137	0,0142	387,6
4.	Viskositas (kg/m-s)	$4,49 \times 10^{-4}$	$2,57 \times 10^{-4}$	-
5.	Berat molekul (kg/kmol)	88,066	88,066	63,55
6.	Standard State Enthalpy (J/kgmol)	$-4,806 \times 10^8$	$-4,454 \times 10^8$	-

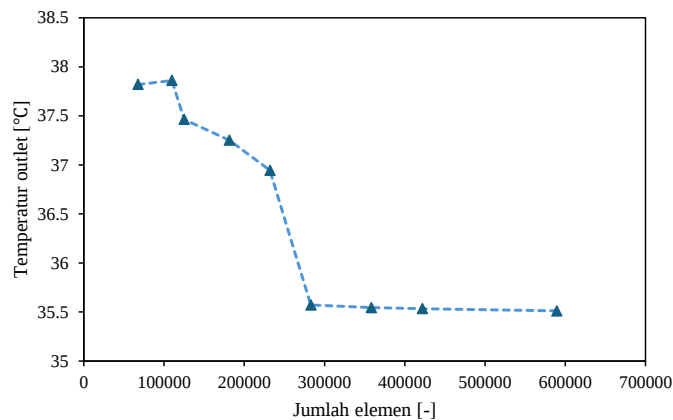
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran iradiasi sinar matahari dilakukan di lokasi penelitian, laboratorium teknik OZT Itera (-5.361947375734979, 105.31082605293794). Pengukuran iradiasi menggunakan *solar power meter* Lutron SPM-1116SD. Data pengukuran iradiasi sinar matahari diberikan pada Gambar 4a.

Sebelum dilakukan simulasi, uji independensi grid (grid independency test) dilakukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi numerik tidak bergantung pada kerapatan grid (*mesh density*) yang digunakan. Tujuannya adalah menentukan ukuran grid optimal yang memberikan hasil akurat tanpa memakan sumber daya komputasi berlebihan. Untuk sebagian besar aplikasi teknik, deviasi sebesar 2-5% pada medan suhu atau kecepatan dianggap dapat diterima (Sadrehaghghi, 2021). Jumlah elemen mesh optimal pada penelitian ini adalah 283017 elemen dengan deviasi parameter temperatur outlet 0,17% terhadap ukuran mesh terhalus (589446 elemen) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4b.

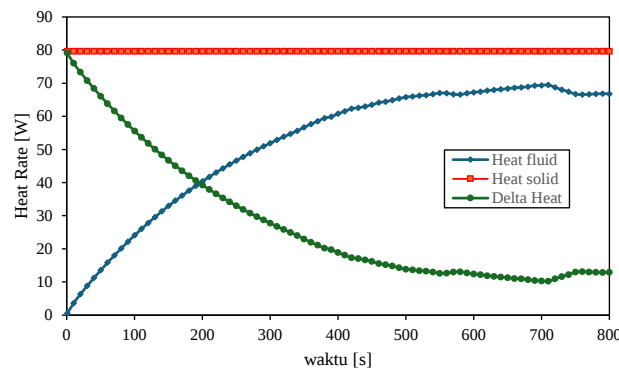


Gambar 4a. Iradiasi sinar matahari dalam satu hari.



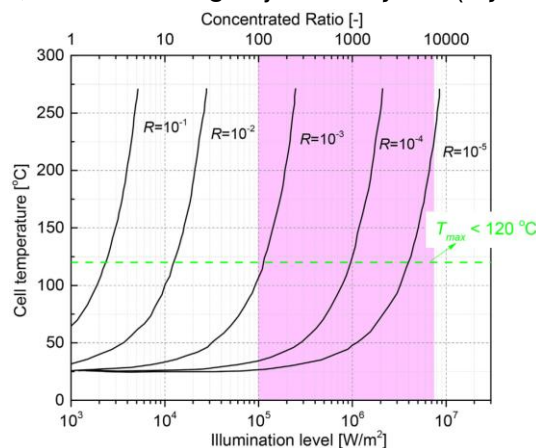
Gambar 4b. Hasil uji independensi grid.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai laju kalor yang ditransfer pada domain *solid heat sink* adalah sebesar 79,62 W. Sementara itu, kalor yang ditransfer pada domain *fluid* berubah terhadap waktu kemudian cenderung konstan pada nilai 68,5 W setelah waktu 630 s (Gambar 5). Selisih nilai transfer kalor *solid-fluid* berkisar 11,12 W, dengan demikian efektivitas transfer kalor *heat sink* ini adalah 86,03%, lebih besar dibandingkan dengan hasil penelitian serupa misalnya dengan menggunakan sistem pendingin kombinasi *phase change material* (PCM) dan *single-phase water cooling* yaitu sebesar 63,33% (Yuan dkk., 2025). Hasil ini menunjukkan *heat sink* memiliki kinerja yang cukup baik dalam mentransfer kalor dari CPV.

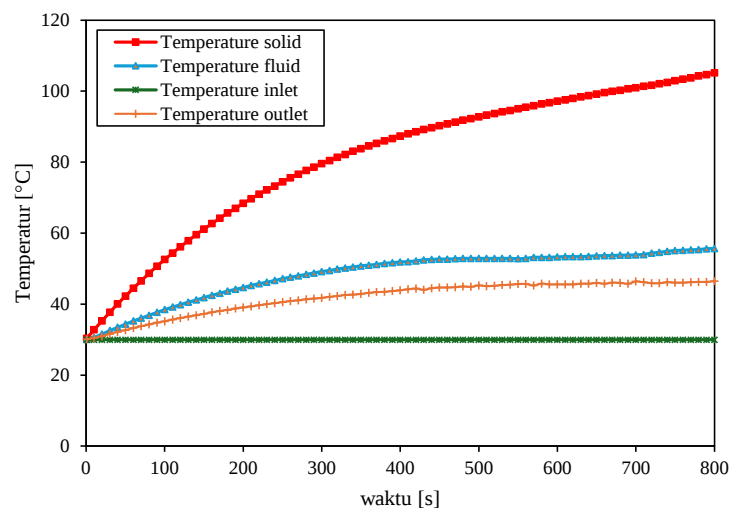


Gambar 5. Laju transfer kalor pada *heat sink*.

Menurut Hong dkk. (2020) untuk memastikan kestabilan dan efisiensi konversi energi yang optimal dari CPV, temperatur maksimum dari permukaan PV harus di bawah 120°C , baik untuk CR yang rendah ataupun tinggi (Gambar 6). Selain itu terlihat juga pada Gambar 6 bahwa untuk dapat menjaga temperatur di bawah 120°C dengan nilai CR 10, setidaknya memerlukan *heat sink* dengan nilai resistansi termal $10^{-2} \text{ m}^2\text{C/W}$. Nilai rata-rata temperatur pada model *heat sink* ditunjukkan pada Gambar 7. Terlihat pada grafik, temperatur *solid* berada pada kisaran nilai 105°C , meskipun memperlihatkan tren kenaikan, namun tidak signifikan dan memiliki kecenderungan menuju nilai konstan di bawah 120°C . Hal ini diharapkan karena pada suhu 120°C , sel PV silikon kristalin mengalami percepatan degradasi akibat stres termal, delaminasi, dan penurunan efisiensi charge carrier (Skoplaki & Palyvos, 2009). Sementara itu, temperatur rerata pada domain *fluid* menunjukkan nilai yang konstan 55°C setelah waktu 580 s, begitu juga dengan temperatur *outlet* menunjukkan nilai yang konstan pada temperatur 45°C . Berdasarkan data laju kalor yang ditransfer dan sebaran temperatur pada waktu 800 s, didapatkan nilai resistansi termal heat sink sebesar $0,0073 \text{ m}^2\text{C/W}$ nilai ini masih lebih kecil dibandingkan kriteria yang telah ditentukan sebelumnya (maksimal sebesar $10^{-2} \text{ m}^2\text{C/W}$) (Hong dkk., 2020). Penelitian serupa dengan menggunakan *multi-layer microchannel heatsink water-base cooling* menunjukkan nilai resistansi termal $0,9 - 1,0 \text{ m}^2\text{C/W}$ dengan jumlah layer 4 (Siyabi dkk., 2017).

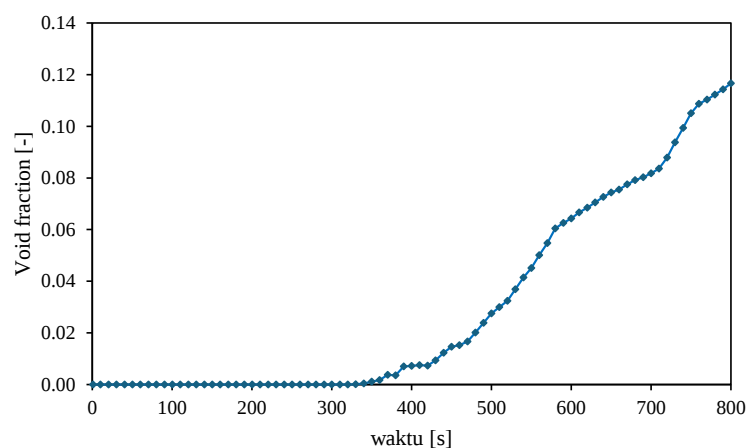


Gambar 6. Variasi temperatur PV vs level iluminasi dan nilai *concentration ratio* (CR) (Hong dkk., 2020).



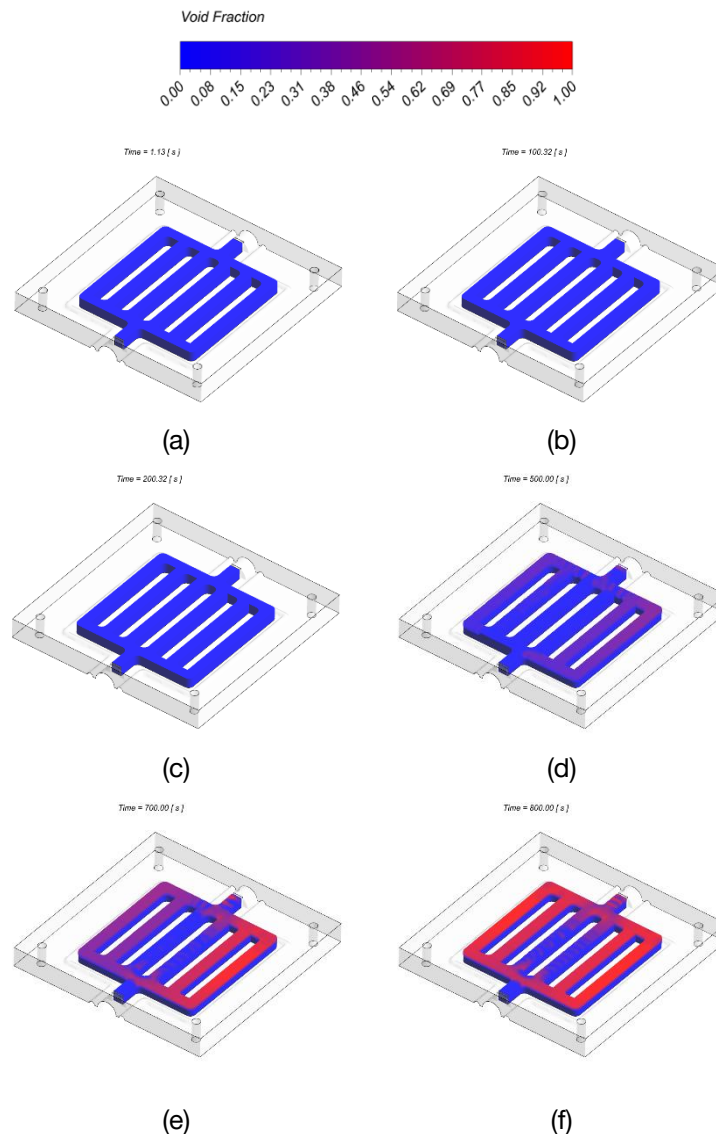
Gambar 7. Temperatur pada beberapa bagian *heat sink*.

Fenomena aliran dua fase mulai terlihat ketika sebagian fase liquid etil asetat berubah mengalami evaporasi menjadi fase uap. Parameter yang menunjukkan rasio antara fase uap dengan fase liquid adalah *void fraction*. Nilai *void fraction* memiliki rentang 0 – 1. *Void fraction* fase cair keseluruhan bernilai 0, sebaliknya untuk fase uap keseluruhan bernilai 1. Semakin besar nilai *void fraction* maka jumlah etil asetat yang menguap juga semakin besar. Nilai *void fraction* ditunjukkan pada Gambar 8. Pada grafik tersebut terlihat bahwa proses evaporasi pertama kali terjadi pada waktu 350 s. Setelah itu jumlah etil asetat yang mengalami evaporasi terus bertambah yang ditunjukkan dari nilai *void fraction* yang meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa aliran dua fase telah terbentuk di dalam alur aliran fluida kerja. Terjadinya proses evaporasi ini yang menyebabkan temperatur rerata fluida menjadi konstan seperti yang telah ditunjukkan pada Gambar 7. Dengan nilai temperatur fluida kerja yang konstan, maka keseragaman temperatur pada domain *solid* juga dapat dicapai sehingga proses transfer kalor dari CPV ke *heat sink* dapat dipastikan berjalan dengan baik. Proses evaporasi etil asetat dapat dilihat dari kontur *void fraction* fluida kerja pada Gambar 9.



Gambar 8. Nilai *void fraction* pada fluida kerja selama proses transfer kalor.

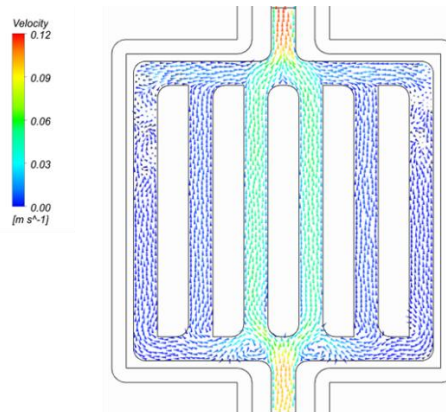
Gambar 9 menunjukkan bahwa fluida yang melalui 2 sisi alur kanal di sebelah kanan dan kiri *heat sink* mengalami proses evaporasi yang lebih dominan jika dibandingkan dengan alur kanal bagian tengah. Jika melihat distribusi vektor kecepatan dari aliran fluida, hal ini disebabkan karena laju aliran di kedua sisi kanal kanan dan kiri lebih lambat dibandingkan bagian tengah sehingga fluida pada sisi ini memiliki waktu kontak yang lebih lama dengan domain *solid* dibandingkan sisi kanal bagian tengah, selain itu terlihat juga adanya *vortex* yang ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 9. Kontur *void fraction* fluida kerja saat (a) 1,13 s (b) 100,32 s (c) 200,32 s (d) 500 s (e) 700 s, dan (f) 800 s.

Sistem pendingin berbasis *two-phase flow* yang dikembangkan dalam penelitian ini memiliki beberapa keunggulan dibandingkan metode pendinginan konvensional, baik dari segi efisiensi termal maupun stabilitas operasional. Pendinginan cairan *single-phase* (seperti *microchannel*) memerlukan laju alir yang lebih besar untuk mencapai efisiensi termal yang serupa dengan *two-phase flow*, sehingga memerlukan daya pompa yang relatif tinggi. Hal ini

dikarenakan kalor jenis sensibel pada pendingin *single-phase* lebih rendah dibandingkan dengan kalor laten untuk fluida kerja yang sama, misalnya kalor jenis sensibel etil asetat (C_p) pada fase cair $\sim 1,92 \text{ J/g}\cdot\text{K}$ sementara kalor laten pendidihannya adalah $\sim 387 \text{ kJ/kg}$ (NIST, 2025), menjadikan pendingin berbasis *two-phase flow* lebih efisien daripada pendinginan *single-phase*. Keunggulan lain terletak pada keseragaman temperatur, karena temperatur fluida kerja konstan pada temperatur saturasi, di mana sistem ini dapat menghilangkan *hotspot* lokal yaitu faktor kritis yang mempercepat degradasi sel CPV.



Gambar 10. Distribusi vektor kecepatan aliran fluida melalui alur kanal *heat sink*.

4. PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa *heat sink* berbasis aliran dua fase cukup efektif sebagai pendingin CPV. Hal ini ditunjukkan dari nilai efektivitas transfer kalor sebesar 86,03% dan nilai resistansi termal $0,0073 \text{ m}^2\text{°C/W}$. Nilai ini memenuhi kriteria untuk *low concentration ratio* (CR) sebesar 10. Nilai temperatur tertinggi pada bagian tembaga sebesar 105 °C dengan tren meningkat namun tidak signifikan dan cenderung asimtotik, sementara temperatur fluida cenderung konstan pada nilai 55 °C . Hal ini menunjukkan bahwa proses evaporasi mampu menjaga temperatur *heat sink* tetap stabil. Sistem pendingin berbasis *two-phase flow* tidak hanya meningkatkan efisiensi termal jangka pendek, tetapi juga memberikan manfaat signifikan dalam keandalan dan umur pakai sistem CPV. Kebutuhan akan daya pompa yang besar juga dapat dihilangkan karena pendinginan pada debit fluida kerja yang rendah.

Saran

Penelitian ini belum menyertakan hasil eksperimen untuk mengkonfirmasi hasil simulasi numerik yang telah diperoleh. Pembuatan prototipe untuk pengujian diperlukan untuk penelitian lanjutan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Direktorat Riset, Teknologi dan Pengabdian kepada Masyarakat Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi sebagai pemberi dana hibah kategori Penelitian Dosen Pemula (PDP) kepada penulis dengan nomor kontrak induk 039/E5/PG.02.00.PL/2024 dan nomor kontrak turunan 1570ax/IT9.2.1/PT.01.03/2024. Penulis juga menyampaikan kepada semua pihak yang telah membantu penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Alzahrani, M., Shanks, K., & Mallick, T. K. (2021). Advances and limitations of increasing solar irradiance for concentrating photovoltaics thermal system. Dalam *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 138). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110517>
- Arirohman, I. D., & Hudaya, A. Z. (2019). Perilaku Aliran Stratified Ditinjau dari Karakteristik Visual dan Tebal Film Cairan pada Pipa Horizontal. *Journal of Mechanical Design and Testing*, 1(2), 86–94. <https://doi.org/10.22146/jmdt.v1i2.52810>
- Arirohman, I. D., Paundra, F., & Yunesti, P. (2021). Studi Karakteristik Pola Aliran Stratified pada Pipa Horizontal 16 mm. *Journal of Science, Technology, and Visual Culture*, 1(1).
- Ceballos, M. A., Pérez-Higueras, P. J., Fernández, E. F., & Almonacid, F. (2023). Tracking-Integrated CPV Technology: State-of-the-Art and Classification. Dalam *Energies* (Vol. 16, Nomor 15). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/en16155605>
- Ejaz, A., Babar, H., Ali, H. M., Jamil, F., Janjua, M. M., Fattah, I. M. R., Said, Z., & Li, C. (2021). Concentrated photovoltaics as light harvesters: Outlook, recent progress, and challenges. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101199>
- Fatchurrohman, N., & Chia, S. T. (2017). Performance of hybrid nano-micro reinforced mg metal matrix composites brake calliper: Simulation approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 257(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/257/1/012060>
- Feldman, D., Ramasamy, V., Fu, R., Ramdas, A., Desai, J., & Margolis, R. (2020). *U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmark: Q1 2020*. www.nrel.gov/publications.
- Hong, S., Zhang, B., Dang, C., & Hihara, E. (2020). Development of two-phase flow microchannel heat sink applied to solar-tracking high-concentration photovoltaic thermal hybrid system. *Energy*, 212. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118739>
- Huaxu, L., Fuqiang, W., Dong, Z., Ziming, C., Chuanxin, Z., Bo, L., & Huijin, X. (2020). Experimental investigation of cost-effective ZnO nanofluid based spectral splitting CPV/T system. *Energy*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116913>
- Ibrahim, K. A., Luk, P., & Luo, Z. (2023). Cooling of Concentrated Photovoltaic Cells—A Review and the Perspective of Pulsating Flow Cooling. Dalam *Energies* (Vol. 16, Nomor 6). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en16062842>
- Jowkar, S., Shen, X., Morad, M. R., & Olyaei, G. (2023). A numerical modeling of thermal management of high CPV arrays using spray cooling. *Applied Thermal Engineering*, 230. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120823>
- Moita, A., Moreira, A., & Pereira, J. (2021). Nanofluids for the next generation thermal management of electronics: A review. *Symmetry*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/SYM13081362>
- Nada, S. A., El-Nagar, D. H., & Hussein, H. M. S. (2018). Improving the thermal regulation and efficiency enhancement of PCM-Integrated PV modules using nano particles. *Energy Conversion and Management*, 166, 735–743. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.035>

- National Renewable Energy Laboratory. (2024). *Best Research-Cell Efficiency Chart*.
<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- NIST. (2025). *Ethyl Acetate*. <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C141786&Mask=2#Thermo-Phase>
- Prakash, A., Kukreja, R., & Kumar, P. (2024). *Cooling of PV panel by using PCM and nanofluid-review*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.05.105>
- Sadrehaghighi, I. (2021). *Mesh Sensitivity & Mesh Independence Study CFD Open Series*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34847.51365/2>
- Siyabi, I. Al, Shanks, K., Mallick, T., & Sundaram, S. (2017). Thermal analysis of a multi-layer microchannel heat sink for cooling concentrator photovoltaic (CPV) cells. *AIP Conference Proceedings*, 1881(1). <https://doi.org/10.1063/1.5001434/793976>
- Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*, 83(5), 614–624. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>
- Valera, Á., Rodrigo, P. M., Almonacid, F., & Fernández, E. F. (2021). Efficiency improvement of passively cooled micro-scale hybrid CPV-TEG systems at ultra-high concentration levels. Dalam *Energy Conversion and Management* (Vol. 244). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114521>
- Wang, G., Zhang, Z., & Chen, Z. (2023). Design and performance evaluation of a novel CPV-T system using nano-fluid spectrum filter and with high solar concentrating uniformity. *Energy*, 267. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126616>
- Wu, Z., Xie, G., Gao, F., Chen, W., Zheng, Q., & Liu, Y. (2024). Experimental study of a self-cooling concentrated photovoltaic (CPV) system using thermoelectric modules. *Energy Conversion and Management*, 299. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117858>
- Yildirim, M. A., Cebula, A., & Sułowicz, M. (2022). A cooling design for photovoltaic panels – Water-based PV/T system. *Energy*, 256. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124654>
- Yuan, F., Yin, Z., Zhao, N., Hu, Y., & Wang, J. (2025). Experimental and numerical analysis of phase change material-based photovoltaic/thermal system with dual-parallel cooling channels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 286, 113563. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2025.113563>