

## ANALISIS PENGARUH DESAIN HEATSINK TERHADAP EFISIENSI PANEL SURYA MENGGUNAKAN METODE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD)

1,2,3) Program Studi Teknik Mesin, Universitas Tidar, Kota Magelang, Indonesia

Ari Irawan<sup>1\*</sup>, Sigit Iswahyudi<sup>2</sup>, Nur Hayati<sup>3</sup>

Corresponding email <sup>1\*</sup>:  
[ari3irawan7@gmail.com](mailto:ari3irawan7@gmail.com)

Received: 17-01-2025  
Accepted: 16-08-2025  
Published: 28-12-2025

©2025 Politala Press.  
All Rights Reserved.

**Abstrak.** Kebutuhan energi terus meningkat, sementara energi fosil yang tidak terbarukan semakin habis. Energi matahari menjadi alternatif potensial, namun efisiensi panel surya menurun seiring kenaikan suhu. Setiap kenaikan suhu  $\pm 1^\circ\text{C}$  menyebabkan penurunan efisiensi sebesar 0,5%. Oleh karena itu, diperlukan sistem pendinginan untuk menurunkan suhu panel surya, salah satunya dengan heatsink pasif. Penelitian ini menganalisis variasi desain heatsink (gelombang, persegi, segitiga) dan material (aluminium, tembaga, campuran keduanya) terhadap suhu dan efisiensi panel surya. Metode yang digunakan adalah Computational Fluid Dynamics (CFD) dengan panel surya kapasitas 50 WP, 100 WP, dan 120 WP. Hasil penelitian menunjukkan bahwa heatsink berbentuk gelombang berbahan tembaga pada panel 50 WP menghasilkan suhu terendah  $45,85^\circ\text{C}$  dan penurunan efisiensi terkecil sebesar 13,44%. Desain ini efektif dalam meningkatkan kinerja panel surya dengan menjaga suhu tetap rendah, sehingga efisiensinya tetap optimal.

**Kata Kunci:** Panel surya, Heatsink, CFD.

**Abstract.** The increasing demand for energy coincides with the growing intensity of human activities, and most of the current energy relies on non-renewable fossil fuels like oil, coal, and natural gas, which are finite. Renewable energy, particularly solar energy, offers a promising alternative. Solar panels currently operate at 14-20% efficiency at  $25^\circ\text{C}$ , but a  $1^\circ\text{C}$  temperature rise reduces efficiency by 0.5%. To address this, cooling systems are necessary, with passive cooling through heatsinks being one method. This study explores various heatsink designs to identify those that most effectively reduce the temperature of solar panels and their impact on efficiency. The research uses Computational Fluid Dynamics (CFD) to examine heatsink designs, including wave-shaped, square, and triangular forms, with materials such as aluminum, copper, and an aluminum-copper alloy. Solar panels with capacities of 50 WP, 100 WP, and 120 WP were tested. The results show that a 50 WP panel with a wave-shaped copper heatsink achieved the lowest temperature of  $45.85^\circ\text{C}$ , with a minimal efficiency loss of 13.44%.

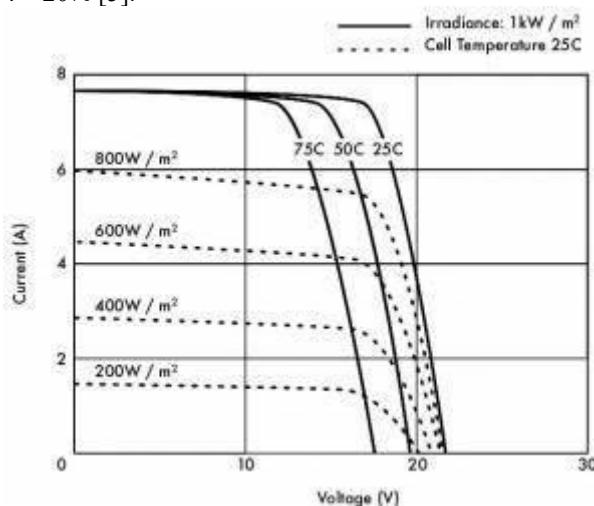
**Keyword:** Solar Panel, Heatsink, CFD.

To cite this article: <https://doi.org/10.34128/je.v12i2.338>

### 1. Pendahuluan

Kebutuhan energi terus bertambah seiring dengan meningkatnya aktivitas manusia. Sebagian besar energi berasal dari energi fosil dalam bentuk batu bara, minyak, dan gas alam yang pada akhirnya akan habis jika terus digunakan [1]. Energi terbarukan adalah solusi alternatif untuk mengatasi masalah ini. Energi terbarukan dihasilkan dari sumber-sumber energi alam dan berkelanjutan, sumber-sumber energi tersebut meliputi air, angin, biomassa, energi surya, dan panas bumi. Salah satu energi terbarukan dengan potensi pengembangan adalah energi surya yang digunakan sebagai bentuk pembangkit energi dalam modul surya.

Modul surya atau modul fotovoltaik adalah sekumpulan sel fotovoltaik yang bisa mengkonversi energi dari matahari ke energi listrik melalui efek fotovoltaik [2]. Sel surya berfungsi sebagai elemen aktif yang memanfaatkan efek fotovoltaik untuk mengkonversi energi sinar matahari menjadi arus listrik DC yang tidak menggunakan tenaga mekanik ataupun bahan bakar [3]. Beberapa sel surya yang tergabung membentuk modul, dan sebuah *array* dibentuk oleh beberapa modul. Sel surya secara umum terdapat tiga jenis, yaitu: sel surya silikon (Si) yang terdiri dari monokristal dan polikristal, sel surya film tipis dan sel surya sensitif warna [4]. Sel surya silikon (Si) adalah jenis sel surya yang sering digunakan, karena memiliki efisiensi tertinggi. Efisiensi sel surya silikon (Si) berkisar antara 14 – 20% [5].



Gambar 1. Kurva A-V terhadap temperatur

Radiasi dari matahari yang ditangkap oleh sel surya menyebabkan peningkatan temperatur pada sel tersebut, sementara sisa energi lainnya dibuang dalam bentuk panas [6]. Hal tersebut dapat mengakibatkan kinerja sel surya, khususnya pada sel surya berbahan dasar silikon (Si), yang efisiensinya cenderung menurun seiring dengan kenaikan suhu. Suhu operasional normal sel surya biasanya berkisar pada  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  [7]. Setiap kenaikan  $1^\circ\text{C}$  diatas suhu kerja sel surya menyebabkan penurunan efisiensi sel surya 0,4% [8].

Sistem pendingin dapat meningkatkan efisiensi sel surya [9]. Terdapat dua jenis metode pendinginan sel surya, yaitu pendinginan aktif dan pasif. Penurunan suhu kerja sel surya menggunakan pendinginan aktif adalah  $7,5^\circ\text{C}$  lebih besar daripada menggunakan pendinginan pasif. Namun, pendinginan aktif kurang efektif karena membutuhkan daya input eksternal, yang mengurangi efisiensi keseluruhan sistem sel surya. Beberapa metode pendinginan pasif yang umum digunakan adalah penambahan *heatsink*, penambahan material perubahan fase dan pendinginan sel surya dengan sistem apung di atas air [10].

Pemasangan *heatsink* pada panel surya dapat menurunkan temperatur panel surya sebesar  $10.2^\circ\text{C}$  dan meningkatkan efisiensi sebesar 12.24% [11], akan tetapi *heatsink* yang dipasang pada panel surya tersebut memiliki jarak yang terlalu lebar sehingga aliran udara yang melewati sirip tidak terlalu optimal untuk memindahkan panas dari *heatsink* ke lingkungan sekitar. Pada penelitian yang lain penggunaan *heatsink* pada panel surya dengan bentuk gelombang menghasilkan efisiensi elektrik sebesar 15% dan temperatur sebesar  $38^\circ\text{C}$  [12], hal ini karena aliran udara yang melewati *heatsink* bentuk gelombang adalah aliran turbulen sehingga meningkatkan koefisien konveksi. *Heatsink* dengan bentuk sirip segitiga memiliki efisiensi yang paling tinggi dibanding *heatsink* bentuk lingkaran dan persegi [13].

Penelitian ini akan merancang desain *heatsink* yang dipasang pada panel surya dengan memvariasikan desain dan material *heatsink*. Tujuannya adalah untuk mengetahui desain *heatsink* yang bisa menurunkan temperatur panel surya ketika intensitas cahaya matahari sebesar  $1000 \text{ W/m}^2$ , serta untuk mengetahui desain *heatsink* yang dapat menghasilkan efisiensi yang tinggi dengan menentukan variasi desain dan material agar perpindahan panas dari sel surya ke lingkungan sekitar lebih optimal yang kemudian disimulasikan menggunakan software Ansys untuk mendapatkan data yang mendekati lapangan.

### Heatsink

*Heatsink* atau pendingin merupakan alat pendingin pasif yang berfungsi untuk memindahkan panas dari komponen elektronik atau mekanik ke media fluida seperti udara atau cairan pendingin [14]. Panas ini kemudian dibuang keluar dari perangkat ke lingkungan sekitar, sehingga membantu suhu perangkat agar tetap optimal. *Heatsink* biasanya terbuat dari material logam dengan konduktivitas termal yang tinggi, contohnya adalah Aluminium, Perak, dan Tembaga. Konduktivitas termal yang tinggi pada material *heatsink* yang digunakan berfungsi supaya perpindahan panas dari komponen elektronik ke lingkungan sekitar semakin cepat.

Bentuk sirip yang digunakan pada *heatsink* mempengaruhi efektifitas perpindahan panas dari komponen elektronik ke lingkungan sekitar. Adapun bentuk sirip *heatsink* yang sering digunakan, seperti *heatsink* dengan sirip berbentuk persegi, persegi panjang, pin dan segitiga.



**Gambar 2.** *Heatsink* dengan bentuk persegi

## 2. Metodologi

Metode yang digunakan adalah metode simulasi menggunakan *software Ansys Workbench 2024 R2* untuk mencari pengaruh variasi desain *heatsink* terhadap temperatur panel surya. Nantinya bagian bawah panel surya akan dipasang *heatsink* sampai menutupi seluruh bagian bawah panel surya kecuali junction box. Hasil simulasi digunakan untuk menghitung penurunan efisiensi panel surya berdasarkan temperatur panel surya yang telah disimulasikan.

### Variabel Penelitian

Dalam pelaksanaan penelitian penulis menetapkan beberapa variabel penelitian yang digunakan adalah variabel terikat, variabel bebas, dan variabel kontrol, sebagai berikut.

#### 1) Variabel Bebas

- Desain panel surya yang digunakan adalah panel surya jenis Polycrystalline.
- Material yang digunakan pada *heatsink* adalah tembaga (Cu), aluminium (Al), paduan aluminium dengan tembaga (Al -Cu).
- Bentuk sirip yang digunakan pada *heatsink* adalah bentuk sirip persegi panjang, segitiga dan gelombang.
- Luas panel surya yang digunakan adalah  $0,408 \text{ m}^2$ ,  $0,673 \text{ m}^2$ , dan  $0,810 \text{ m}^2$ .

#### 2) Variabel Terikat

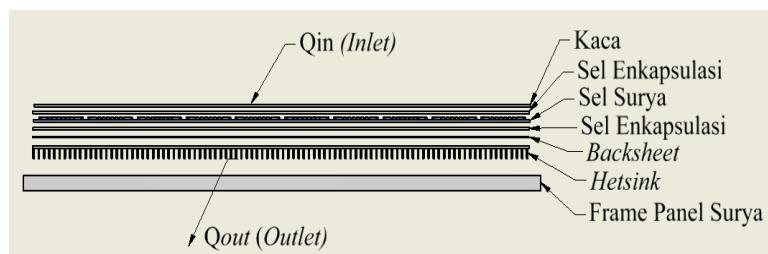
- Intensitas cahaya yang digunakan  $1000 \text{ W/m}^2$ .
- Jarak antar sirip yang digunakan adalah 12 mm.

#### 3) Variabel Kontrol

- Kecepatan angin yang digunakan adalah  $1.5 \text{ m/s}$ .
- Temperatur lingkungan yang digunakan  $33^\circ\text{C}$ .
- Simulasi dilakukan pada kondisi *steady state*.

### Tahapan Penelitian

#### 1) Membuat desain panel surya di aplikasi Autodesk Inventor 2022.



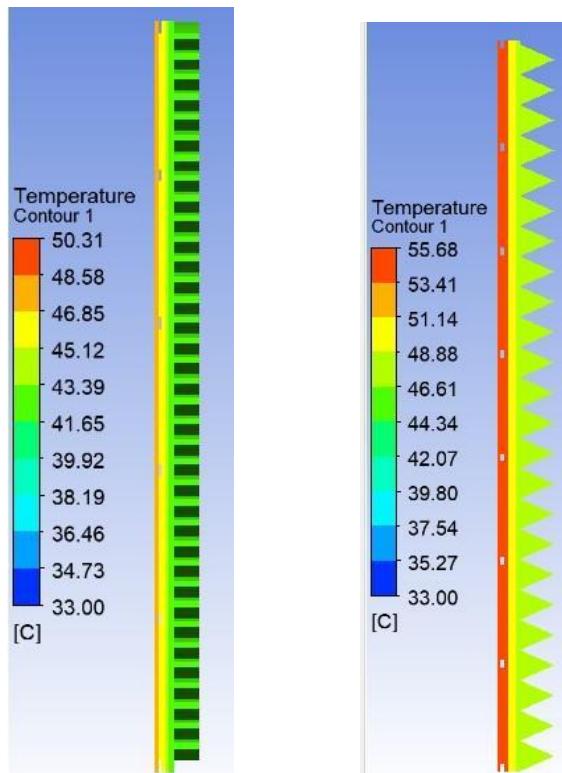
**Gambar 3.** Desain panel surya

- 2) Membuka Ansys Workbench dan memilih simulasi adalah fluid flow fluent.
- 3) Mengimpor desain yang telah dibuat ke menu geometri dengan format .stp yang ada pada *Ansys Design Modeler*.
- 4) Membuat domain fluida pada panel surya dalam *Ansys Design Modeler*.

- 5) Mengatur ukuran elemen *meshing*, metode *meshing*, dan pemberian nama bagian panel surya. Setelah di update langkah selanjutnya adalah *digenerate*.
- 6) Mengatur *set-up* data dengan memasukan persamaan energi, gravitasi, jenis pemodelan radiasi Discrete ordinate, intensitas cahaya matahari sebesar  $1000\text{W/m}^2$ , temperatur lingkungan sebesar  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kecepatan udara sebesar  $1,5\text{ m/s}$ , nilai densitas, koefisien panas spesifik, konduktivitas termal dari masing material-material setelah data dimasukkan semua langkah selanjutnya adalah *run calculation*.
- 7) Mengolah data dari hasil simulasi yang telah dilakukan, dimana bentuk hasil yang bisa disajikan berupa *vector*, *contour temperatur* dan *turbulens* dari simulasi yang dilakukan.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Setelah proses simulasi selesai dilakukan, maka tahap berikutnya adalah *result* pada tahap ini kita dapat melihat hasil *contour temperatur* dari masing masing bagian panel surya yang kemudian hasilnya digunakan untuk menghitung efisiensi panel surya. Gambar 4 merupakan *contour temperatur* dari bagian panel surya.



**Gambar 4.** Kontur temperatur pada bagian panel surya

Pada Gambar 4 menunjukkan adanya perbedaan temperatur dari bagian panel surya yang dipasang *heatsink* bentuk segitiga dengan *heatsink* bentuk gelombang. Panel surya dengan bentuk *heatsink* bentuk gelombang memiliki temperatur yang lebih rendah hal ini dikarenakan luas permukaan *heatsink* yang kontak langsung dengan udara lebih banyak.

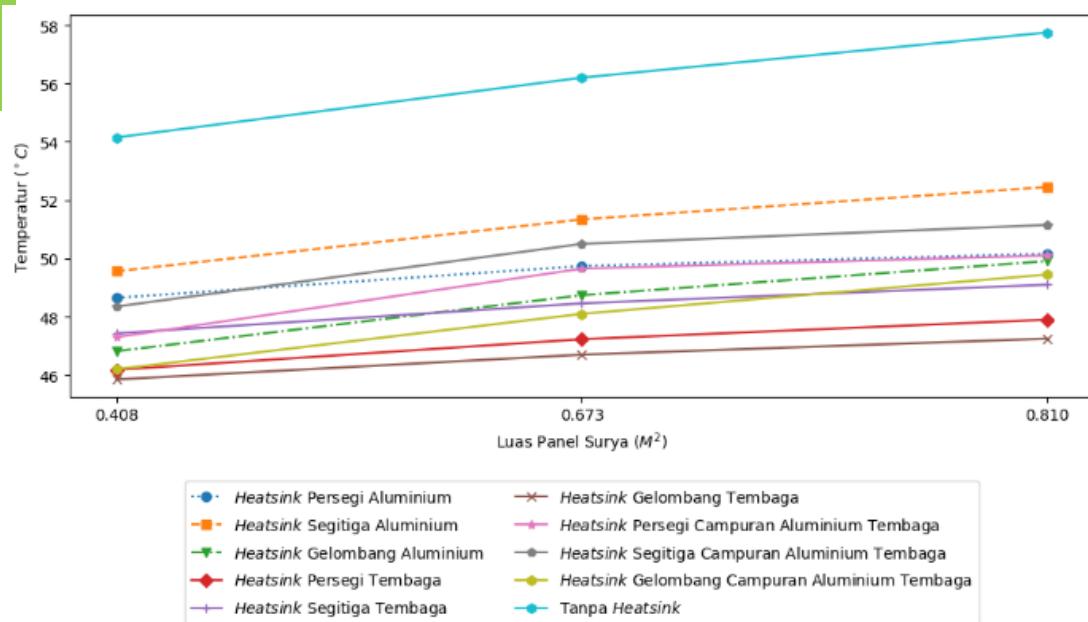
**Tabel 1.** Temperatur panel surya yang dipasang *heatsink*

No.	Bentuk <i>heatsink</i>	Luas panel surya (m <sup>2</sup> )	Temperatur panel surya (°C)	Material <i>heatsink</i>
1	Persegi	0,408	48,65	Al
2	Persegi	0,673	49,74	Al
3	Persegi	0,810	50,16	Al
4	Segitiga	0,408	49,56	Al
5	Segitiga	0,673	51,34	Al
6	Segitiga	0,810	52,45	Al
7	Gelombang	0,408	46,82	Al
8	Gelombang	0,673	48,74	Al
9	Gelombang	0,810	49,91	Al
10	Persegi	0,408	46,18	Cu
11	Persegi	0,673	47,23	Cu
12	Persegi	0,810	47,90	Cu
13	Segitiga	0,408	47,43	Cu
14	Segitiga	0,673	48,46	Cu
15	Segitiga	0,810	49,10	Cu
16	Gelombang	0,408	45,85	Cu
17	Gelombang	0,673	46,70	Cu
18	Gelombang	0,810	47,25	Cu
19	Persegi	0,408	47,30	Al - Cu
20	Persegi	0,673	49,65	Al - Cu
21	Persegi	0,810	50,10	Al - Cu
22	Segitiga	0,408	48,35	Al - Cu
23	Segitiga	0,673	50,50	Al - Cu
24	Segitiga	0,810	51,15	Al - Cu
25	Gelombang	0,408	46,20	Al - Cu
26	Gelombang	0,673	48,10	Al - Cu
27	Gelombang	0,810	49,45	Al - Cu

**Tabel 2.** Temperatur panel surya tanpa *heatsink*

No.	Luas panel surya (m <sup>2</sup> )	Temperatur panel surya (°C)
1	0,408	54,15
2	0,673	56,20
3	0,810	57,75

Pada Tabel 1 dan Tabel 2 menampilkan temperatur panel surya dengan *heatsink* dan tanpa *heatsink* setelah proses simulasi dilakukan. Data dari tabel tersebut akan dibuat grafik temperatur panel surya untuk memudahkan dalam pembacaan grafik



Gambar 5. Grafik temperatur hasil simulasi panel surya

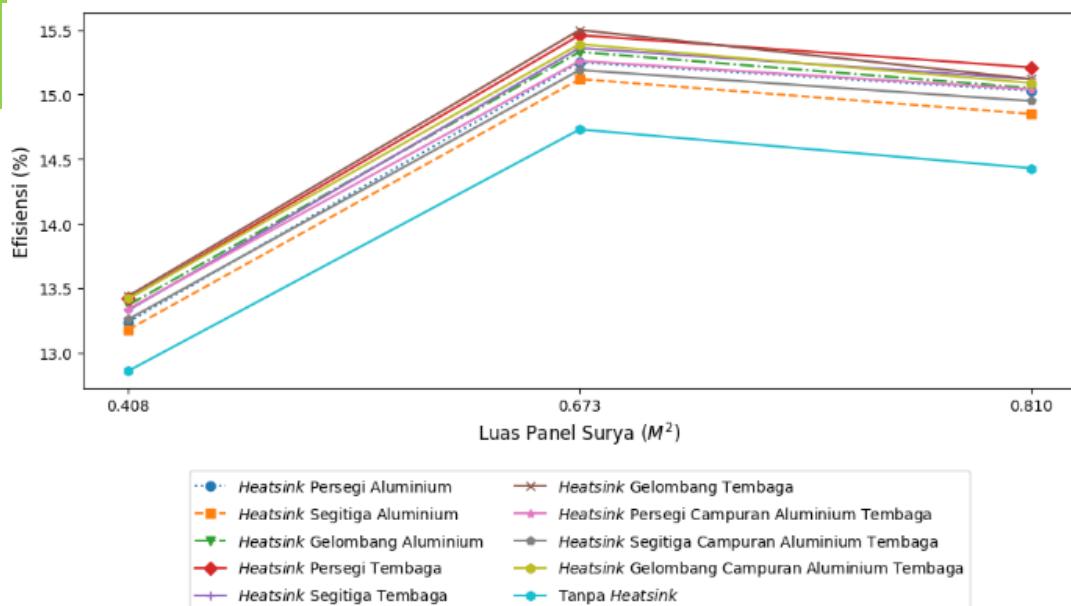
Pada Gambar 5 dan Tabel 1, temperatur terendah terdapat pada panel surya dengan luas  $0,408\ m^2$  yang dipasang *heatsink* dari material tembaga dengan nilai temperatur  $45,85^\circ\text{C}$ , sedangkan untuk temperatur tertinggi pada panel surya yang dipasang *heatsink* dari material aluminium dengan bentuk segitiga pada panel surya dengan luas  $0,810\ m^2$  dengan nilai temperatur panel surya sebesar  $52,45^\circ\text{C}$ . Sedangkan untuk panel surya yang tidak dipasang *heatsink* memiliki temperatur terendah  $54,15^\circ\text{C}$  dengan luas panel surya  $0,408\ m^2$  sedangkan untuk temperatur tertinggi pada panel surya dengan luas  $0,810\ m^2$  dengan temperatur se besar  $57,75^\circ\text{C}$ . Hasil ini menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai konduktivitas termal maka perpindahan panas ke lingkungan sekitar juga semakin besar, sehingga penurunan temperatur panel surya lebih cepat [15]. Dan juga bahwa semakin luas permukaan *heatsink* maka kontak antara panas dari *heatsink* ke lingkungan sekitar semakin banyak sehingga penurunan temperatur panel surya semakin cepat, dari penelitian sebelumnya didapatkan temperatur panel surya yang dipasang *heatsink* bentuk gelombang memiliki temperatur sebesar  $40,85^\circ\text{C}$  [12]. Hasil dari pengukuran temperatur nantinya akan dihitung untuk mendapatkan efisiensi panel surya.

**Tabel 3.** Efisiensi panel surya yang dipasang *heatsink*

No.	Bentuk <i>heatsink</i>	Luas panel surya (m <sup>2</sup> )	Efisiensi (%)	Material <i>heatsink</i>
1	Persegi	0,408	13,24%	Al
2	Persegi	0,673	15,25%	Al
3	Persegi	0,810	15,03%	Al
4	Segitiga	0,408	13,18%	Al
5	Segitiga	0,673	15,12%	Al
6	Segitiga	0,810	14,85%	Al
7	Gelombang	0,408	13,37%	Al
8	Gelombang	0,673	15,33%	Al
9	Gelombang	0,810	15,05%	Al
10	Persegi	0,408	13,42%	Cu
11	Persegi	0,673	15,46%	Cu
12	Persegi	0,810	15,21%	Cu
13	Segitiga	0,408	13,33%	Cu
14	Segitiga	0,673	15,36%	Cu
15	Segitiga	0,810	15,12%	Cu
16	Gelombang	0,408	13,44%	Cu
17	Gelombang	0,673	15,50%	Cu
18	Gelombang	0,810	15,27%	Cu
19	Persegi	0,408	13,34%	Al - Cu
20	Persegi	0,673	15,26%	Al - Cu
21	Persegi	0,810	15,04%	Al - Cu
22	Segitiga	0,408	13,26%	Al - Cu
23	Segitiga	0,673	15,19%	Al - Cu
24	Segitiga	0,810	14,95%	Al - Cu
25	Gelombang	0,408	13,42%	Al - Cu
26	Gelombang	0,673	15,39%	Al - Cu
27	Gelombang	0,810	15,09%	Al - Cu

**Tabel 4.** Efisiensi panel surya tanpa *heatsink*

No.	Luas panel surya (m <sup>2</sup> )	Efisiensi (%)
1	0,408	12,86%
2	0,673	14,73%
3	0,810	14,43%



Gambar 6. Grafik Efisiensi panel surya

Berdasarkan Gambar 6, Tabel 3 dan Tabel 4 didapatkan penurunan efisiensi terendah terdapat pada panel surya dengan luas  $0,408 \text{ m}^2$  yang dipasang *heatsink* bentuk gelombang dengan material tembaga dengan penurunan efisiensi sebesar 1,05% dari efisiensi awal 14,49% menjadi 13,44%. Sedangkan penurunan efisiensi tertinggi didapatkan dari panel surya dengan luas  $0,810 \text{ m}^2$  yang dipasang *heatsink* bentuk segitiga dari material aluminium dengan penurunan efisiensi sebesar 2,2% dari efisiensi awal 17,05% menjadi 14,85%. Hasil nilai efisiensi diatas menunjukan bahwa semakin tinggi temperatur panel surya semakin tinggi penurunan efisiensinya, tanpa menghitung daya *output* yang digunakan [11]. Hal ini dikarenakan efisiensi panel surya yang dihasilkan akan menurun sebesar 0,04% setiap temperatur bertambah  $1^\circ\text{C}$  dari kondisi standar yaitu  $\pm 25^\circ\text{C}$ .

#### 4. Kesimpulan

Variasi desain *heatsink* dengan bentuk dan material yang berbeda-beda mempengaruhi temperatur sel surya. Variasi desain *heatsink* dengan bentuk dan material yang berbeda-beda mempengaruhi penurunan efisiensi sel surya. Desain *heatsink* yang memiliki temperatur terendah dan penurunan efisiensi terendah adalah *heatsink* dengan bentuk gelombang dari material tembaga dengan temperatur  $45,85^\circ\text{C}$  dan efisiensi sebesar 13,44%.

#### 5. Saran

*Heatsink* dengan bentuk gelombang dari material paduan aluminium dan tembaga menjadi pilihan terbaik jika dipasang pada panel surya karena konduktivitas termalnya yang lebih tinggi dari *heatsink* material aluminium dan harganya yang lebih murah dibanding *heatsink* dari material tembaga.

Analisis pengaruh variasi desain *heatsink* terhadap efisiensi panel surya menggunakan metode *Computational Fluid Dynamic* (CFD), sebaiknya menganalisa desain *heatsink* yang berbeda, sudut arah datangnya sinar matahari, serta menggunakan *Software Ansys Full Version* dengan tujuan mendapatkan temperatur yang lebih rendah dan efisiensi yang lebih tinggi.

#### Daftar Pustaka

- [1] I. Kholiq, "PEMANFAATAN ENERGI ALTERNATIF SEBAGAI ENERGI TERBARUKAN UNTUK MENDUKUNG SUBSTITUSI BBM," vol. 19, pp. 75–91, 2015.
- [2] D. Almanda and D. Bhaskara, "Studi Pemilihan Sistem Pendingin pada Panel Surya Menggunakan Water Cooler, Air Mineral dan Air Laut," *Resist. Elektron. KEndali Telekomun. Tenaga List. Komput.*, vol. 1, no. 2, p. 43, Nov. 2018, doi: 10.24853/resistor.1.2.43-52.
- [3] A. Syuhada, Z. Fuadi, and B. A. Satari, "Analisa Potensi Energi Surya untuk Energi Listrik Banda Aceh dan Sekitarnya," vol. 7, pp. 15–20, 2019.
- [4] X. Wang and A. Barnett, "The Evolving Value of Photovoltaic Module Efficiency," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 6, p. 1227, Mar. 2019, doi: 10.3390/app9061227.
- [5] H. G. Teo, P. S. Lee, and M. N. A. Hawlader, "An active cooling system for photovoltaic modules," *Appl. Energy*, vol. 90, no. 1, pp. 309–315, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.01.017.

- [6] A. Pawawoi and Z. Zulfahmi, “Penambahan Sistem Pendingin *Heatsink* Untuk Optimasi Penggunaan Reflektor Pada Panel Surya,” *J. Nas. Tek. ELEKTRO*, vol. 8, no. 1, p. 1, Mar. 2019, doi: 10.25077/jnte.v8n1.607.2019.
- [7] Afriandi Afriandi, “Implementasi Water Cooling System Untuk Menurunkan Temperatur Losses Pada Panel Surya,” *J. Tek. Elektro Univ. Tanjungpura*, vol. 2, no. 1, 2017.
- [8] I. Houssamo, F. Locment, and M. Sechilariu, “Maximum power tracking for photovoltaic power system: Development and experimental comparison of two algorithms,” *Renew. Energy*, vol. 35, no. 10, pp. 2381–2387, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.renene.2010.04.006.
- [9] S. R. Reddy, M. A. Ebadian, and C.-X. Lin, “A review of PV-T systems: Thermal management and efficiency with single phase cooling,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 91, pp. 861–871, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.134.
- [10] M. Hasanuzzaman, A. B. M. A. Malek, M. M. Islam, A. K. Pandey, and N. A. Rahim, “Global advancement of cooling technologies for PV systems: A review,” *Sol. Energy*, vol. 137, pp. 25–45, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.07.010.
- [11] Z. Arifin, S. Suyitno, D. D. P. Tjahjana, W. E. Juwana, M. R. A. Putra, and A. R. Prabowo, “The Effect of Heat Sink Properties on Solar Cell Cooling Systems,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 21, p. 7919, Nov. 2020, doi: 10.3390/app10217919.
- [12] A. Torbatinezhad, A. A. Ranjbar, M. Rahimi, and M. Gorzin, “A new hybrid *heatsink* design for enhancement of PV cells performance,” *Energy Rep.*, vol. 8, pp. 6764–6778, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.05.050.
- [13] Y. A. Çengel, A. J. Ghajar, and M. Kanoğlu, *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*, Fourth edition in SI units. New York: McGraw Hill Higher Education, 2011.
- [14] T. M. S. Denk, T. M. A. Pandria, and A. Firnanda, “Identifikasi Pengaruh Penggunaan *Heatsink* Terhadap Keluaran Modul Surya,” vol. 2, 2022.
- [15] L. D. Hung Anh and Z. Pásztory, “An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials,” *J. Build. Eng.*, vol. 44, p. 102604, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102604.