

## EFEKTIVITAS DAN EFISIENSI PANEL SURYA BERBASIS PENDINGINAN PHOTOVOLTAIC DENGAN MATERIAL PCM

Muhamad Lufi Azizi<sup>1</sup>, Sunaryo<sup>2</sup>, Akhmad Irfan<sup>3</sup>

Universitas Sains Al-Qur'an, Indonesia

Email: lufiazz@mhs.unisq.ac.id<sup>1</sup>, sunaryo@unsiq.ac.id<sup>2</sup>, irfan.akhmad@unsiq.ac.id<sup>3</sup>

---

### ABSTRAK

---

Pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi alternatif dalam sektor kelistrikan terus mengalami perkembangan pesat seiring meningkatnya kesadaran masyarakat. Namun demikian, panel surya Photovoltaic masih menghadapi tantangan signifikan dalam hal efektivitas, efisiensi konversi energi, dan performa pendinginan yang kurang optimal. Kondisi ini berdampak langsung pada penurunan daya keluaran dan efisiensi kerja panel, sehingga membatasi potensi maksimal teknologi Photovoltaic. Salah satu aspek krusial dalam menjaga kinerja panel adalah sistem pendinginan yang mampu menstabilkan suhu kerja panel saat beroperasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh metode pendinginan terhadap efektivitas, efisiensi, serta karakteristik termal dan hidrolis panel surya fotovoltaik melalui pendekatan eksperimental dan numerik. Objek penelitian menggunakan panel surya berbasis material polikristalin silikon berukuran 76 cm × 67 cm dengan kapasitas daya maksimum 100 Watt. Kegiatan eksperimen dilakukan dengan dua skema pendinginan pasif yaitu konveksi bebas dan penggunaan material pengubah fasa (PCM) berupa minyak kelapa dan lemak hewan. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi pendinginan konveksi bebas sebesar 23,68%, sedangkan pendinginan PCM minyak kelapa 22,08% dan lemak hewan 29,44%. Panel surya dengan menggunakan PCM lemak hewan didapatkan nilai *output power* sebesar 92,17 Watt, dengan penurunan temperatur permukaan sebesar 5-9°C. Aplikasi PCM ini terbukti meningkatkan efisiensi dan efektivitas kinerja photovoltaik dalam menghasilkan energi listrik.

**Kata Kunci** : Pendinginan, *Photovoltaic*, *Phase Change Material*, Efisiensi, Kinerja termal

---

### ABSTRACT

---

*The use of solar energy as an alternative energy source in the electricity sector continues to grow rapidly as public awareness increases. However, photovoltaic solar panels still face significant challenges in terms of effectiveness, energy conversion efficiency, and suboptimal cooling performance. These conditions directly impact the reduction in power output and operational efficiency of the panels, thereby limiting the full potential of photovoltaic technology. One crucial aspect in maintaining panel performance is a cooling system capable of stabilizing the panel's operating temperature during operation. This study aims to evaluate the influence of cooling methods on the effectiveness, efficiency, as well as the thermal and hydraulic characteristics of photovoltaic solar panels through experimental and numerical approaches. The research object used a solar panel based on polycrystalline silicon material measuring 76 cm × 67 cm with a maximum power capacity of 100 Watts. The experiments were conducted using two passive cooling schemes: natural convection and the use of phase-change materials (PCM) in the form of coconut oil and animal fat. The results showed that the cooling efficiency of free convection was 23.68%, while that of coconut oil PCM cooling was 22.08% and animal fat PCM cooling was 29.44%. The solar panel using animal fat PCM achieved an output power of 92.17 watts, with a surface temperature reduction of 5–9°C. The application of PCM has been proven to enhance the efficiency and effectiveness of photovoltaic performance in generating electrical energy.*

**Keywords** : Cooling, *Photovoltaics*, *Phase Change Materials*, Efficiency, Thermal Performance

---

## 1. PENDAHULUAN

Transisi menuju energi terbarukan menjadi fokus global sebagai respons terhadap perubahan iklim dan keterbatasan cadangan bahan bakar fosil. Salah satu sumber energi terbarukan yang paling potensial dan terus berkembang adalah energi surya (Tian and Ooka, 2025). Indonesia sebagai negara tropis dengan intensitas radiasi matahari yang tinggi sepanjang tahun memiliki potensi energi surya yang sangat besar, mencapai sekitar 200.000 MW. Namun, pemanfaatannya masih sangat rendah, yakni sekitar 150 MW atau hanya 0,08% dari total potensi yang tersedia. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan signifikan antara potensi dan realisasi, sehingga diperlukan inovasi teknologi untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem pembangkit listrik tenaga surya berbasis Photovoltaic (PV) (Meriani, 2017).

Teknologi PV berbasis *crystalline silicon* (c-Si) saat ini mendominasi pasar karena efisiensi dan keandalannya. Namun demikian, salah satu kendala utama dalam implementasinya adalah peningkatan suhu operasi (*overheating*) pada permukaan panel, yang secara langsung menurunkan efisiensi konversi energi. Peningkatan suhu sebesar 1°C dapat menurunkan daya keluaran sebesar 0,65–0,85% (Lepiksaar et al., 2025). Pada kondisi tertentu, suhu panel dapat mencapai 40–70°C dan menyebabkan penurunan efisiensi hingga 22,5% (Huang et al., 2021). Selain itu, temperatur tinggi juga mempercepat degradasi material dan memperpendek umur pakai modul PV (Bhatnagar et al., 2024).

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, berbagai metode pendinginan telah dikembangkan, baik secara aktif maupun pasif. Pendinginan aktif seperti penggunaan kipas dan sistem aliran fluida terbukti efektif, namun membutuhkan energi tambahan dan biaya operasional yang lebih tinggi (Islam et al., 2024). Sebaliknya, metode pendinginan pasif lebih menarik karena tidak memerlukan energi eksternal, dengan pendekatan seperti penggunaan *heat sink*, media berpori, pipa panas, serta *Phase Change Material* (PCM) (Dwivedi et al., 2020; Hamed et al., 2024).

PCM menjadi salah satu solusi yang menjanjikan karena kemampuannya menyerap

dan melepaskan panas laten selama proses perubahan fasa, sehingga mampu menjaga kestabilan suhu panel PV (Ma, Li and Zhao, 2019). Berbagai penelitian telah menunjukkan efektivitas PCM dalam menurunkan temperatur panel dan meningkatkan efisiensi. Sebagai contoh, PCM jenis RT28HC mampu menurunkan suhu hingga 35,6°C (Stropanik and Stritih, 2016), sedangkan sodium acetate trihydrate dapat meningkatkan efisiensi hingga 24,95% (Sen and Celiktas, 2024). Selain itu, penggunaan *white petroleum jelly* sebagai PCM juga dilaporkan meningkatkan efisiensi sistem sebesar 4,24% (Chavan and Devaprakasam, 2021).

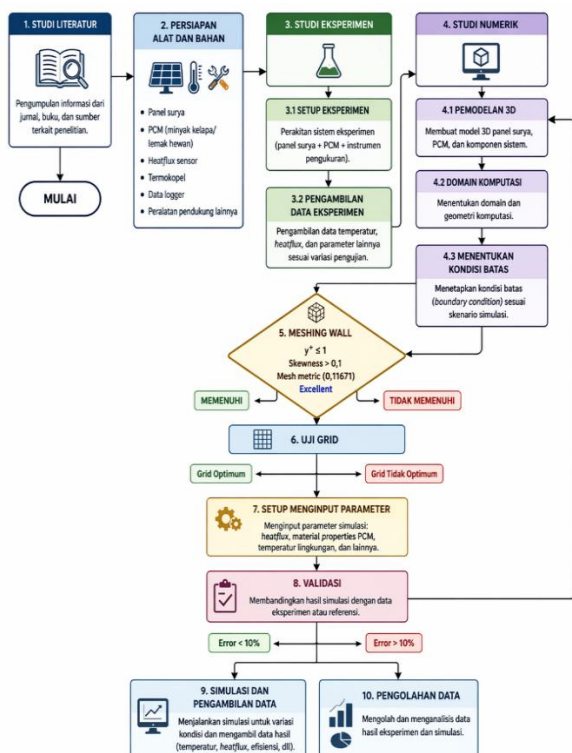
Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada PCM berbasis sintesis atau parafin yang memiliki keterbatasan dari sisi keberlanjutan, biaya, dan dampak lingkungan. Oleh karena itu, perhatian mulai bergeser ke PCM berbasis bahan alami yang lebih ramah lingkungan dan tersedia secara lokal, seperti minyak kelapa dan lemak hewan. Minyak kelapa memiliki karakteristik termal yang sesuai untuk aplikasi di daerah tropis dan telah terbukti mampu menurunkan suhu sistem serta meningkatkan efisiensi energi (Ariwibowo, Irsyad and Amrul, 2022). Di sisi lain, lemak hewan yang telah dimodifikasi melalui proses esterifikasi menunjukkan kapasitas panas laten yang tinggi hingga 234,22 kJ/kg dengan rentang suhu leleh yang sesuai untuk aplikasi termal (Gallart-Sirvent et al., 2018).

Namun demikian, kajian yang mengintegrasikan pemanfaatan PCM berbasis minyak kelapa dan lemak hewan secara komparatif maupun dalam bentuk formulasi campuran (*hybrid PCM*) untuk sistem pendinginan panel surya masih sangat terbatas, khususnya pada kondisi iklim tropis seperti Indonesia. Selain itu, belum banyak penelitian yang mengevaluasi kinerja termal dan peningkatan efisiensi PV secara eksperimental dengan pendekatan material lokal yang berkelanjutan. Oleh karena itu, penelitian ini menawarkan kebaruan melalui pengembangan dan pengujian PCM berbasis bahan alami (minyak kelapa dan/atau lemak hewan) sebagai sistem pendingin pasif pada panel surya, dengan fokus pada analisis penurunan suhu, peningkatan efisiensi, serta potensi

aplikasinya dalam mendukung transisi energi berkelanjutan di Indonesia.

## 2. METODE

Metode analisis data dalam penelitian ini dilakukan dengan dua metode yaitu eksperimen dan studi numerik. Sedangkan metode pendinginan yang diajukan untuk mengetahui efektivitas, efisiensi, performa termal dan hidrolis panel surya PV adalah metode pendinginan konveksi bebas dan penggunaan *Phase Change Material* (PCM) organik berbahan minyak kelapa dan lemak hewan.



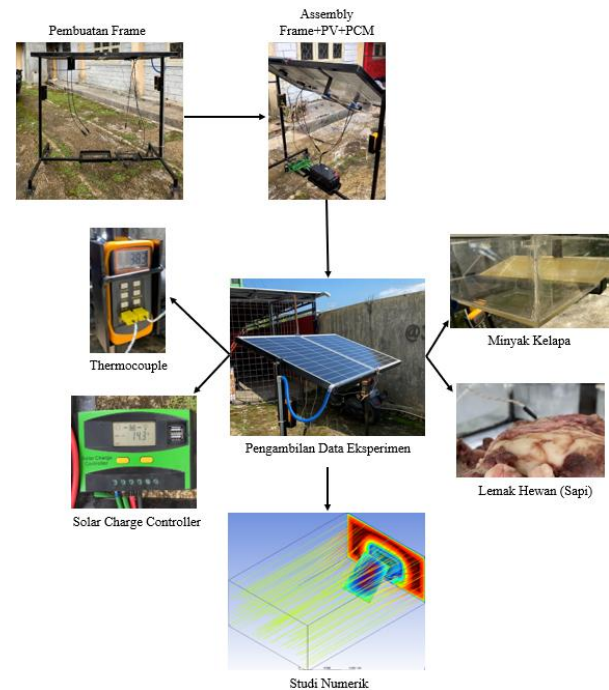
Gambar 1. Diagram alir penelitian

### 2.1 Eksperimen

Dalam penelitian ini digunakan dua panel surya PV dengan tipe *polycrystalline silicon* berkapasitas daya maksimal 100 Watt dengan dimensi 76 cm x 67 cm. Pada salah satu panel digunakan PCM sebagai metode pendingin, sedangkan satu panel lain tanpa pendingin guna pembandingan hasil akhir. PCM yang digunakan diletakkan dalam sebuah *box* akrilik dengan ukuran 38 cm x 38 cm x 10 cm dan dilengkapi perekat silikon untuk mencegah kebocoran saat PCM meleleh sepenuhnya.

#### 2.1.1 Setup Eksperimen

Eksperimen dimulai dengan *setup* eksperimen yang mencakup pembuatan dudukan untuk panel surya, baterai, SCC, *inverter*, *thermocouple* dan penampang PCM seperti yang divisualisasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Setup Eksperimen

Keterangan:

1. Pembuatan *Frame* yang berfungsi sebagai struktur penyangga sistem panel surya PV dan perangkat pendukung lainnya. Desain *frame* memungkinkan kemiringan panel yang dapat disesuaikan, agar sudut insidensi terhadap matahari lebih optimal.
2. *Assembly* mencakup pemasangan panel surya PV, penampang PCM, serta komponen pendukung lainnya seperti SCC, *thermocouple*, baterai, dan *inverter* ke dalam struktur *frame*.
3. *Setup* alat ukur dilakukan untuk memeriksa ulang apakah komponen kelistrikan pada panel surya PV dapat bekerja dengan baik. Indikator utamanya adalah ketika SCC sudah menampilkan ikon matahari maka panel surya sudah mulai mengisi daya.
4. Pengambilan data eksperimen dilakukan secara *real-time* dengan menggunakan *thermocouple*, SCC dan *smartphone*.
5. Setelah pengambilan data eksperimen selesai, dilanjutkan dengan metode analisis data yang kedua yaitu studi numerik.

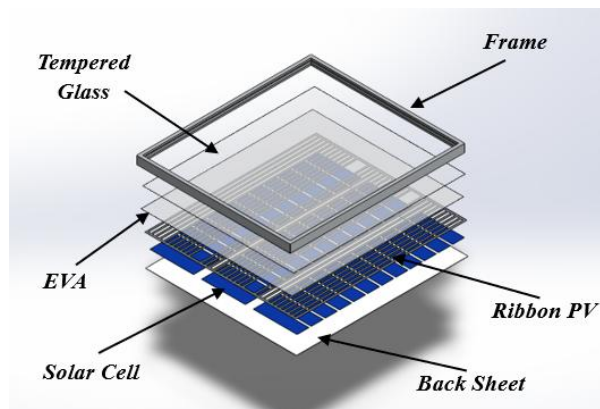
### 2.1.2 Prosedur Pengukuran

Eksperimen dilakukan selama dua hari untuk setiap metode pendinginan yang diajukan. Panel surya dioperasikan sebagaimana pada kondisi normal di lingkungan terbuka untuk menangkap radiasi matahari secara langsung. Pengoperasian sistem PV dimulai dari jam 08.00, namun pengambilan data eksperimen dilakukan dari pukul 09.00 hingga 13.00 dengan interval setiap satu jam. Parameter yang diamati berupa temperatur panel tanpa tambahan PCM ( $T_{PV}$ ), temperatur panel yang terintegrasi dengan PCM ( $T_{PV-PCM}$ ), temperatur PCM ( $T_{PCM}$ ), tegangan panel ( $V$ ), arus ( $I$ ), kecepatan udara ( $v$ ), kelembapan udara ( $RH$ ) dan intensitas radiasi ( $I_r$ ).

### 2.2 Studi Numerik

Studi numerik dilakukan dengan menggunakan program komputer *Computational Fluid Dynamic* (CFD), sebagai validasi dari hasil eksperimen yang telah dilakukan.

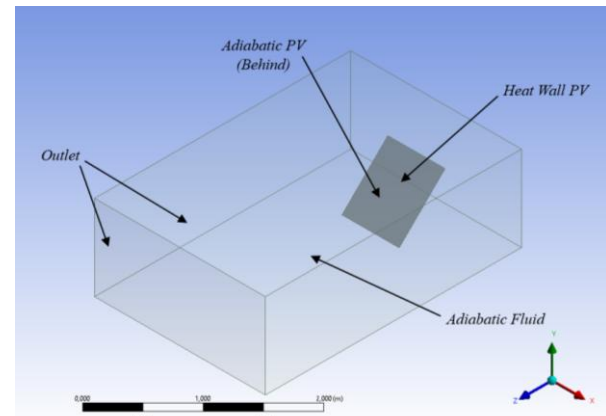
#### 2.2.1 Pemodelan Geometri



Gambar 2. Pemodelan Panel Surya

Pemodelan geometri panel surya dilakukan menggunakan perangkat lunak *software* gambar CAD (Murtadha, 2023), sesuai dengan ilustrasi yang ditunjukkan pada Gambar 2. Desain panel mencakup komponen utama seperti *Frame*, *Tempered Glass*, *Encapsulant Material* (EVA), *Ribbon*, *Solar Cell* dan *Back Sheet*. Seluruh dimensi dibuat konstan dan disesuaikan dengan spesifikasi panel yang digunakan dalam studi eksperimen.

#### 2.2.2 Domain Komputasi

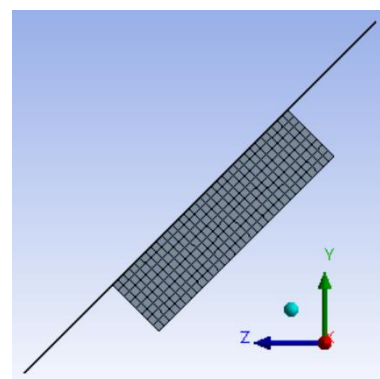


Gambar 3. Domain Komputasi

Domain komputasi dilakukan dengan membagi membagi ruang domain menjadi sejumlah *control volumes*, sehingga memungkinkan evaluasi fluks massa, momentum, dan energi pada setiap batas volume secara konservatif. Dalam domain tersebut, panel PV dimodelkan dengan permukaan miring sebesar  $45^\circ$  terhadap sumbu YZ sesuai pada Gambar 3, dan satu sisi bertindak sebagai *heat wall*, yang merepresentasikan penyerapan energi matahari. *Inlet* dan *outlet* menunjukkan jalur masuk dan keluarnya udara, memungkinkan replikasi kondisi udara alami yang memengaruhi panel selama pengujian eksperimen.

#### 2.2.3 Meshing

Proses *meshing* dilakukan secara teliti untuk menangkap pengaruh lapisan batas termal dan hidrolis, sehingga dapat menjamin akurasi serta kestabilan hasil numerik. Topologi *mesh* yang digunakan adalah *Hex Dominant*, yang disesuaikan dengan geometri panel surya. Bentuk *mesh* ini disajikan dalam Gambar 4.

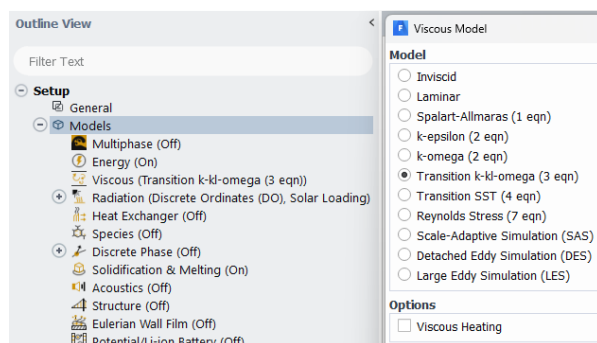


Gambar 4. Type Mesh Hex Dominant

Evaluasi kualitas *mesh* dilakukan melalui parameter *skewness* dan *orthogonal quality*. Nilai rata-rata yang didapat dari parameter *skewness* adalah 0,5 sedangkan pada *orthogonal quality* didapat nilai 0,95. Dari kedua nilai tersebut masing masing parameter termasuk kategori "Excellent", yang berarti menjamin akurasi dan stabilitas solusi numerik pada tahap simulasi.

### 2.2.4 Setup

Proses *setup* pada studi numerik ini dilakukan menggunakan *Fluent* untuk menganalisis perpindahan panas dan aliran fluida dalam domain tiga dimensi. Simulasi dilakukan dalam *regime steady-state* karena fokusnya adalah mencari distribusi temperatur akhir yang stabil dalam sistem pendingin pasif panel surya menggunakan PCM. Pemilihan model fisis dalam studi numerik ini dimaksudkan untuk merepresentasikan fenomena perpindahan panas dan aliran fluida secara akurat dalam sistem panel surya berlapis dengan media pendingin berbasis PCM. Setiap model diaktifkan berdasarkan justifikasi ilmiah dan kondisi aktual yang terjadi dalam sistem eksperimental.

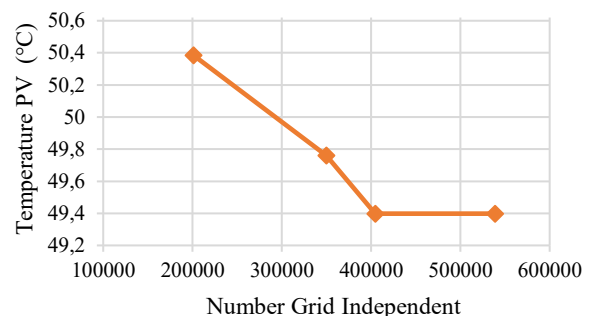


Gambar 5. Setup Studi Numerik

Pada tahap ini juga dilakukan pendefinisian material untuk mengakomodasi sifat termofisik yang mempengaruhi proses perpindahan panas dan interaksi fasa antara panel surya dan PCM. Material yang digunakan terbagi menjadi dua kategori utama, yaitu material *fluid* dan material *solid*. Untuk material *fluid* yang digunakan adalah udara, minyak kelapa, dan lemak hewan. Sedangkan yang termasuk material *solid* adalah *aluminium*, *glass*, *eva*, *solar cell* dan *back sheet*.

### 2.2.5 Grid Independent

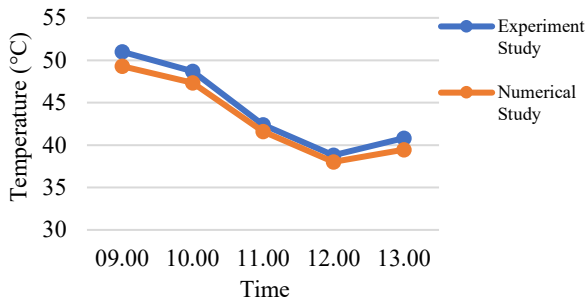
Uji *grid* dilakukan untuk menentukan konfigurasi jumlah *mesh* yang paling optimal dalam studi numerik pendinginan panel surya dengan metode konveksi bebas. Variasi jumlah *cell mesh* yang digunakan meliputi 201.059, 349.635, 404.678, dan 538.771, dengan hasil yang disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara jumlah *grid* dan temperatur panel. Berdasarkan hasil perhitungan, kesalahan relatif antara *grid* 201.059 dan 349.635 sebesar  $\pm 1,253\%$ , antara 349.635 dan 404.678 sebesar  $\pm 0,734\%$ , sedangkan antara 404.678 dan 538.771 nilai yang didapatkan sudah tidak ada perbedaan. Nilai temperatur panel surya pada *grid* 404.678 adalah  $49,398^{\circ}\text{C}$ , begitupula pada *grid* 538.771 adalah  $49,398^{\circ}\text{C}$ , menunjukkan bahwa penambahan jumlah *grid* tidak lagi memberikan perubahan terhadap hasil. Oleh karena itu, *grid* berjumlah 404.678 dipilih sebagai konfigurasi optimum karena selain telah mencapai kondisi konvergen, konfigurasi ini juga mempertimbangkan efisiensi waktu komputasi.



Gambar 6. Grid Independent Test

### 2.2.5 Validasi

Validasi dilakukan untuk menguji kesesuaian antara hasil studi numerik dan data eksperimen pada panel surya dengan sistem pendinginan berbasis konveksi bebas. Proses validasi ini dilakukan berdasarkan lima titik waktu pengamatan, yaitu pukul 09.00 hingga 13.00 WIB dihari pertama, dengan memperhatikan parameter lingkungan berupa kecepatan udara, intensitas radiasi matahari, serta temperatur panel sebagai variabel utama. Data temperatur hasil eksperimen dan numerik disajikan dalam grafik pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik Hubungan Temperatur Terhadap Waktu

Hasil menunjukkan bahwa tren penurunan suhu panel dari pukul 09.00 hingga 13.00 berhasil direpresentasikan dengan baik. Selisih antara temperatur hasil studi numerik dan eksperimen secara umum tergolong kecil, yakni rata-rata berada dalam kisaran ±2 °C. Hal ini menunjukkan bahwa model numerik yang digunakan memiliki tingkat akurasi yang cukup tinggi, dengan deviasi hasil yang masih berada dalam batas wajar untuk studi berbasis CFD.

**2.3 Reduksi Data**

1. *Input Power*

$$P_{in} = I_r \cdot A \dots\dots\dots(1)$$

2. *Output Power*

$$P_{out} = V \cdot I \dots\dots\dots(2)$$

3. Efisiensi PV

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(3)$$

4. Persamaan Kontinuitas

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots(4)$$

5. Persamaan Momentum

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right] \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right] \dots\dots\dots(6)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] \dots\dots\dots(7)$$

6. Persamaan Energi

$$\frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} = -\frac{\partial(u\rho)}{\partial x} - \frac{\partial(v\rho)}{\partial y} - \frac{\partial(w\rho)}{\partial z} - \frac{1}{Re_r Pr_r} \left[ \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] + \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + w\tau_{zz}) \right] \dots\dots\dots(8)$$

**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

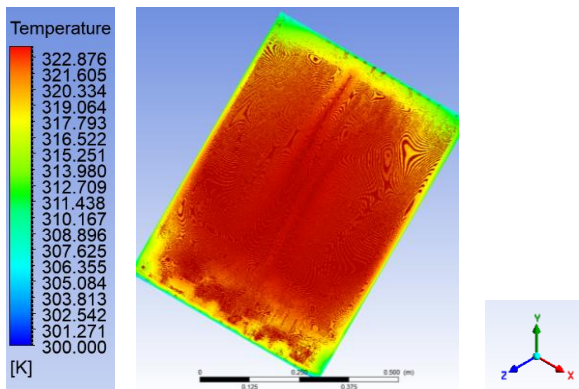
**3.1 Metode Konveksi Bebas**

Panel surya diuji dalam kondisi lingkungan terbuka tanpa bantuan sistem pendinginan, sehingga proses pelepasan panas sepenuhnya mengandalkan aliran udara alami (konveksi bebas) di sekitar panel seperti yang ditampilkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Pengambilan Data Eksperimen Metode Pendinginan Konveksi Bebas

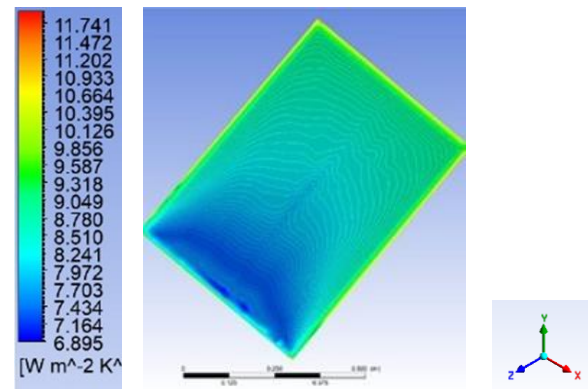
Dari hasil eksperimen didapati suhu panel tertinggi terjadi pada jam 09.00, baik dihari pertama maupun hari kedua yaitu 51°C dan 51,5°C. Kondisi ini disebabkan oleh tingginya radiasi matahari yang tidak diimbangi dengan aliran udara yang cukup. Akibatnya, panas terakumulasi di permukaan panel. Saat siang hari, kecepatan angin meningkat hingga 1,94 m/s, sehingga suhu panel mulai menurun karena aliran udara alami yang lebih kuat. Penurunan suhu ini berdampak positif terhadap efisiensi sistem, yang meningkat hingga 29,96%. Sebaliknya, saat suhu panel tinggi, efisiensi justru turun, seperti terlihat pada efisiensi 23,68% dengan *output power* hanya 88,08 W. Secara keseluruhan, metode ini dapat menurunkan suhu panel, meskipun efektivitasnya terbatas pada kondisi cuaca dengan radiasi matahari rendah hingga sedang. Hasil ini menegaskan pentingnya pengelolaan suhu pada sistem PV untuk menjaga kinerja panel tetap optimal dan mencegah penurunan efisiensi akibat panas berlebih.



Gambar 9. Kontur Distribusi *Temperature* Konveksi Bebas

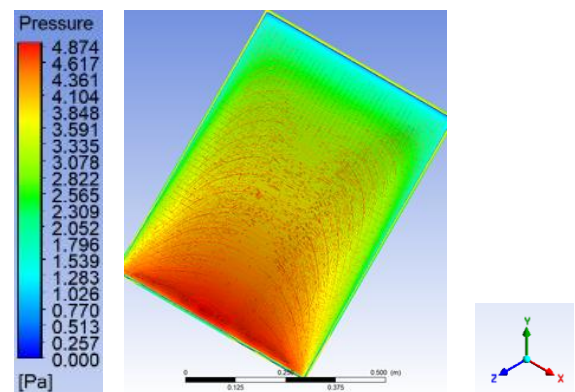
Berdasarkan hasil studi numerik pada gambar 9, area tengah panel didominasi warna merah yang menunjukkan akumulasi panas tinggi akibat radiasi matahari. Sementara bagian tepi yang berwarna hijau dan kuning menunjukkan suhu lebih rendah karena lebih dekat dengan udara terbuka, sehingga pelepasan panas secara alami lebih efektif. Pola ini menggambarkan perpindahan panas dari pusat panel ke tepi secara konduktif, serta pelepasan panas ke udara melalui konveksi bebas.

Hubungan antara distribusi suhu dan laju pelepasan panas dapat dijelaskan melalui analisis *heat transfer coefficient* (HTC). Semakin tinggi nilai HTC, semakin cepat panas dilepaskan dari permukaan panel, yang membantu menurunkan suhu dan meningkatkan efisiensi sistem PV. Nilai HTC meningkat dari pagi ke siang hari, mencerminkan berkembangnya mekanisme konveksi bebas. Nilai tertinggi tercatat sebesar  $11,74 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  dan nilai terendah  $6,89 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . Seperti terlihat pada Gambar 10, distribusi HTC menunjukkan konsentrasi nilai tertinggi di bagian atas dan sisi panel, yaitu area yang lebih terbuka dan terkena aliran udara secara langsung.



Gambar 10. Kontur Distribusi HTC Konveksi Bebas

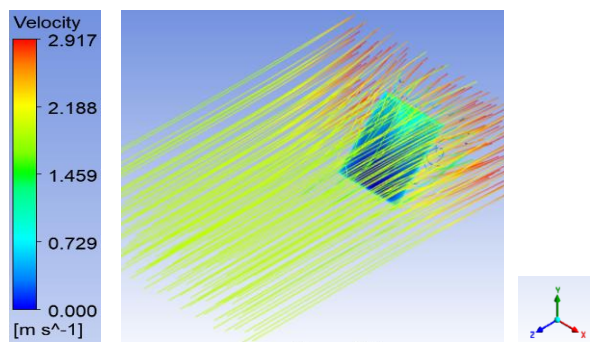
Setelah menganalisis aspek termal melalui distribusi suhu dan HTC, evaluasi dilanjutkan pada aspek hidrolis melalui distribusi tekanan. Tekanan di sekitar panel tidak hanya dipengaruhi oleh pola aliran, tetapi juga oleh interaksi langsung antara udara dan permukaan panel.



Gambar 11. Kontur Distribusi *Pressure* Konveksi Bebas

Dari Gambar 11, tekanan tertinggi terjadi pada bagian bawah panel, akibat benturan awal fluida terhadap permukaan yang menyebabkan perlambatan aliran dan peningkatan tekanan lokal. Kecepatan fluida sangat memengaruhi besar tekanan yang diterima, semakin tinggi kecepatannya, maka tekanan di area benturan awal juga meningkat. Setelah udara mengenai panel, terjadi perpindahan panas dari panel ke udara, menyebabkan suhu udara naik dan densitasnya menurun. Akibat efek *buoyancy*, udara panas tersebut terdorong ke atas. Saat aliran udara naik di sepanjang permukaan panel, kecepatannya meningkat dan tekanan menurun, sesuai prinsip *Bernoulli* yaitu kecepatan fluida yang lebih tinggi akan menghasilkan tekanan yang lebih rendah.

Visualisasi aliran udara ditunjukkan melalui pola *streamline* pada Gambar 12. Hasil numerik menunjukkan pola aliran dominan dari bawah ke atas panel, yang menunjukkan bahwa udara panas terdorong secara efektif menjauh dari permukaan. Pola ini memperluas area kontak antara udara dan panel, sehingga memperbesar laju perpindahan panas secara konvektif dan membantu menurunkan suhu panel secara alami.



Gambar 12. Pola *Streamline* Konveksi Bebas

### 3.2 Metode PCM Minyak Kelapa

Minyak kelapa dipilih karena memiliki titik leleh yang rendah, konduktivitas termal yang cukup baik, serta bersifat ramah lingkungan dan mudah diperoleh.



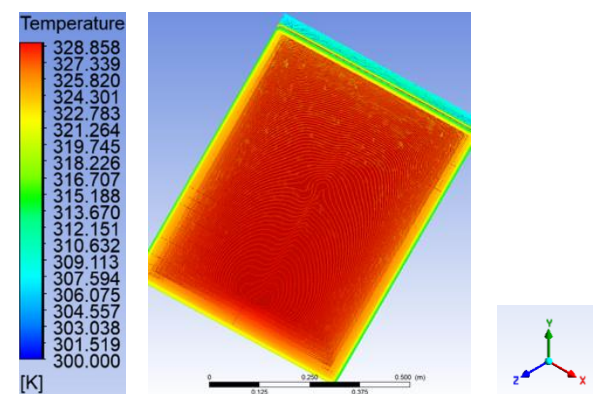
Gambar 13. PCM Minyak Kelapa Ketika Padat dan Cair

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa panel surya dengan sistem pendingin PCM minyak kelapa memiliki suhu maksimum antara 48–54°C, lebih rendah dibandingkan metode konveksi bebas yang mencapai 53–61°C pada saat radiasi matahari tertinggi. Penurunan suhu ini berdampak langsung pada peningkatan efisiensi, dimana efisiensi tertinggi sistem PV-PCM tercatat sebesar 23,29%.

Efektivitas pendinginan ini berasal dari kemampuan PCM menyerap panas laten saat melebur, terutama pada suhu transisi minyak kelapa. Saat suhu mulai meningkat di pagi hari, PCM menyerap energi tanpa menaikkan

suhu secara drastis, sehingga mencegah lonjakan panas pada panel. Mekanisme ini menjadikan PCM sebagai sistem penyeimbang termal pasif yang bekerja secara optimal, terutama pada kondisi radiasi tinggi yang sulit diatasi dengan konveksi bebas.

Secara keseluruhan, penggunaan minyak kelapa sebagai PCM terbukti lebih unggul dalam menjaga suhu kerja panel tetap rendah dan efisiensi konversi tetap tinggi. Kemampuannya menyerap panas secara langsung menjadikan metode ini sangat sesuai untuk diterapkan di wilayah tropis dengan intensitas radiasi tinggi, dimana stabilisasi suhu sangat penting untuk menjaga performa dan umur pakai panel surya.



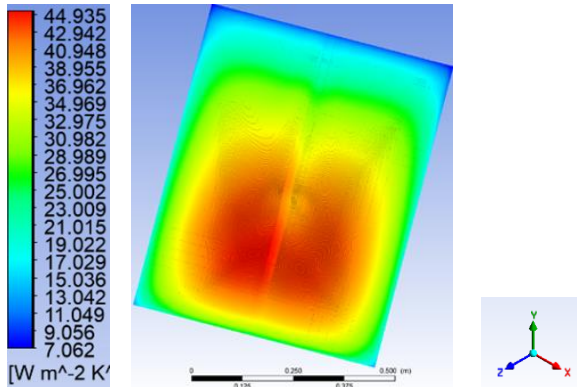
Gambar 14. Kontur Distribusi *Temperature* PCM Minyak Kelapa

Berdasarkan Gambar 14, kontur distribusi suhu menunjukkan bahwa panas terkonsentrasi di bagian tengah panel. Dominasi warna merah dan oranye menunjukkan adanya akumulasi panas, namun tetap terkontrol karena proses penyerapan panas laten oleh PCM. Saat panel mulai menerima radiasi, minyak kelapa dalam fase padat menyerap panas dan mulai mencair, sehingga suhu panel tetap stabil meskipun energi masuk terus bertambah.

Distribusi suhu yang merata dari tengah ke tepi menandakan terjadinya perpindahan panas konduktif dari permukaan panel menuju PCM di bagian belakang. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem PCM mampu menjaga gradien suhu tetap rendah, menghindari terbentuknya titik panas (*hot spot*), dan mendukung kestabilan termal sepanjang waktu operasi.

Selain distribusi suhu, studi numerik juga menunjukkan variasi nilai HTC yang mencerminkan seberapa efektif panas berpindah dari panel ke PCM. Perubahan nilai

HTC ini dipengaruhi oleh interaksi antara permukaan panel, material PCM, dan kecepatan aliran udara yang melintasi permukaan panel, menandakan bahwa mekanisme pendinginan bekerja aktif secara pasif dan bertahap.

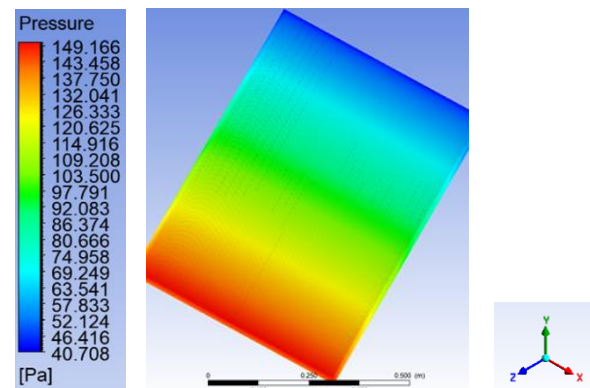


Gambar 15. Kontur Distribusi HTC PCM Minyak Kelapa

Gambar 15 menunjukkan distribusi HTC pada permukaan panel surya dengan sistem pendinginan PCM minyak kelapa. Nilai HTC tertinggi, sebesar  $44,9 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , terdeteksi di bagian tengah bawah panel, yang ditandai oleh warna merah terang. Sebaliknya, nilai terendah tercatat  $7,1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . Pola ini dipengaruhi oleh konfigurasi sistem, di mana PCM ditempatkan di belakang panel yang dimiringkan  $45^\circ$ . Saat PCM meleleh karena panas, cairannya mengalir ke bawah akibat gravitasi. Hal ini membuat interaksi termal paling kuat terjadi di bagian bawah panel, menjadikannya area utama perpindahan panas.

Selain itu, Gambar 16 memperlihatkan distribusi tekanan pada sistem. Tekanan tertinggi terdeteksi di bagian bawah penampang dan bawah panel, dengan nilai berkisar antara  $149,166$  hingga  $40,708 \text{ Pa}$ . Warna merah di bagian bawah menunjukkan akumulasi tekanan yang disebabkan oleh aliran cairan PCM ke bawah saat meleleh, sehingga meningkatkan tekanan internal pada area tersebut. Tekanan tinggi juga muncul di bawah permukaan luar panel akibat konveksi bebas alami, yaitu aliran udara naik yang terbentuk karena perbedaan suhu antara panel dan udara sekitar. Fenomena ini serupa dengan pola tekanan yang diamati pada sistem konveksi bebas, menegaskan bahwa perpindahan panas dan distribusi tekanan

dalam sistem PV-PCM dipengaruhi oleh kombinasi efek termal dan gaya gravitasi.



Gambar 16. Kontur Distribusi *Pressure* PCM Minyak Kelapa

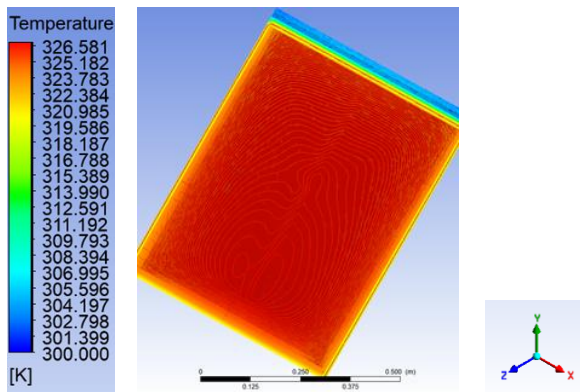
### 3.3 Metode PCM Lemak Hewan



Gambar 17. PCM Lemak Hewan Ketika Padat dan Cair

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa lemak hewan sebagai PCM mampu secara efektif menurunkan dan menstabilkan suhu panel surya. Pada hari pertama, suhu panel berlapis PCM meningkat dari  $42,4^\circ\text{C}$  (pukul 09.00) hingga puncaknya  $49,6^\circ\text{C}$  (pukul 11.00), lalu menurun menjadi  $45,8^\circ\text{C}$  pada pukul 13.00. Ini menunjukkan bahwa PCM mulai aktif menyerap panas sejak pagi dan menjaga kestabilan suhu hingga siang hari. Di hari kedua, suhu sempat naik lebih tinggi hingga  $54,2^\circ\text{C}$  karena radiasi matahari yang lebih kuat dan kecepatan angin yang lebih rendah.

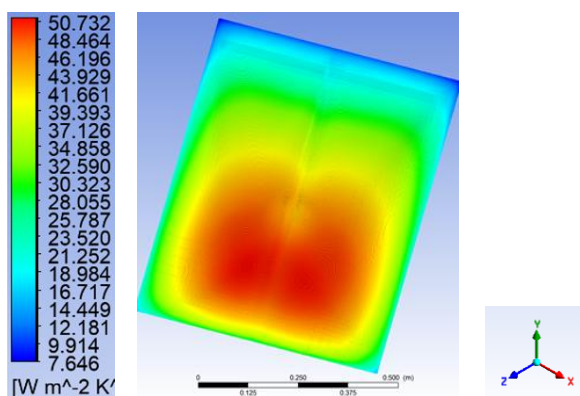
Rata-rata selisih suhu antara panel dengan PCM dan tanpa PCM mencapai  $5-9^\circ\text{C}$ , menandakan bahwa material PCM mampu mencegah lonjakan suhu melalui mekanisme serapan panas laten. Penurunan suhu ini berpengaruh langsung pada *output power*, yaitu antara  $88,93 \text{ W}$  hingga  $92,17 \text{ W}$  di hari pertama dan  $86,86 \text{ W}$  hingga  $91,54 \text{ W}$  di hari kedua. Efisiensi panel pun meningkat, dengan nilai bervariasi antara  $17,39\%$  hingga  $29,44\%$ .



Gambar 18. Kontur Distribusi *Temperature* PCM Lemak Hewan

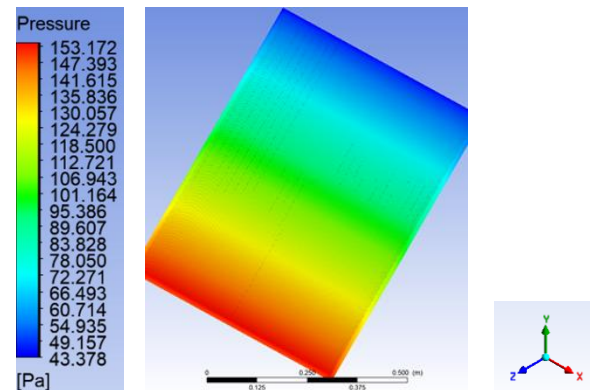
Visualisasi kontur suhu pada Gambar 18 menunjukkan bahwa akumulasi panas tidak merata di seluruh permukaan panel, melainkan terkonsentrasi di bagian tengah. Sementara itu, bagian tepi panel memiliki suhu yang lebih rendah. Zona panas ini tidak menyebar secara luas karena panas tertahan di area tertentu, menandakan bahwa PCM bekerja efektif menyerap panas dan mencegah penyebaran suhu tinggi. Pola ini menunjukkan adanya keseimbangan antara energi yang diterima dari radiasi matahari dan pelepasan panas melalui proses perubahan fase PCM, sehingga suhu kerja panel menjadi lebih terkendali dan merata dibandingkan tanpa pendingin.

Perbedaan suhu ini menyebabkan variasi HTC pada permukaan panel. Berdasarkan *legend* yang ada pada Gambar 19, nilai HTC tertinggi mencapai  $50,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  dan terdapat di bagian bawah tengah panel area yang paling banyak mengandung PCM. Sebaliknya, nilai HTC terendah tercatat di tepi atas panel, yaitu  $7,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ .



Gambar 19. Kontur Distribusi HTC PCM Lemak Hewan

Pola distribusi ini menegaskan bahwa efektivitas pendinginan pasif dengan PCM sangat dipengaruhi oleh distribusi fluida selama fase perubahan, hal tersebut juga membuktikan bagaimana distribusi *pressure* tertinggi berada dibagian yang sama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 20.



Gambar 20. Kontur Distribusi *Pressure* PCM Lemak Hewan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode pendinginan sangat memengaruhi temperatur dan efisiensi panel surya. Pada konveksi bebas, suhu panel masih tinggi ( $51\text{--}61^\circ\text{C}$ ), sejalan dengan Huang et al. (2021) yang menyatakan bahwa pendinginan alami memiliki keterbatasan dalam mengatasi overheating, terutama pada radiasi tinggi. Nilai *heat transfer coefficient* (HTC) yang diperoleh ( $6,89\text{--}11,74 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ) juga menunjukkan karakteristik konveksi bebas yang sangat bergantung pada kondisi lingkungan. Penggunaan PCM minyak kelapa mampu menurunkan suhu menjadi  $48\text{--}54^\circ\text{C}$ , konsisten dengan temuan Ariwibowo et al. (2022), namun peningkatan efisiensi ( $23,29\%$ ) masih lebih rendah dibandingkan PCM sintesis seperti RT-series yang dapat melebihi  $24\%$  (Stropanik and Stritih, 2016), mengindikasikan keterbatasan sifat termal material alami.

Sebaliknya, PCM lemak hewan menunjukkan performa paling optimal dengan penurunan suhu  $5\text{--}9^\circ\text{C}$  dan efisiensi hingga  $29,44\%$ . Hasil ini mendukung Gallart-Sirvent et al. (2018) terkait tingginya kapasitas panas laten material tersebut. Nilai HTC yang lebih tinggi (hingga  $50,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ) mengindikasikan perpindahan panas yang lebih intensif dibandingkan metode lain. Dengan demikian, dibandingkan penelitian sejenis, PCM lemak

hewan dalam studi ini menunjukkan potensi yang lebih kompetitif sebagai alternatif pendingin pasif yang efektif dan berkelanjutan untuk panel surya di iklim tropis.

## 4. PENUTUP

### 4.1. Kesimpulan

Metode pendinginan panel surya dengan konveksi bebas menghasilkan output power sebesar 88,08 W dengan efisiensi 23,68% dan nilai koefisien perpindahan panas 11,74 W/m<sup>2</sup>·°C. Namun, efektivitas metode ini sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, sehingga kurang stabil dalam mengendalikan temperatur panel. Penggunaan PCM minyak kelapa meningkatkan kinerja termal dengan output power 89,52 W dan koefisien perpindahan panas 44,93 W/m<sup>2</sup>·°C, serta mampu menurunkan suhu permukaan sebesar 3–7°C. Meskipun demikian, efisiensi yang diperoleh relatif lebih rendah (22,08%) akibat tingginya intensitas radiasi saat pengujian.

Di sisi lain, PCM berbasis lemak hewan menunjukkan performa terbaik dengan output power mencapai 92,17 W, efisiensi 29,44%, serta koefisien perpindahan panas tertinggi sebesar 50,73 W/m<sup>2</sup>·°C. Material ini mampu menurunkan suhu permukaan hingga 5–9°C, sehingga lebih efektif dalam menjaga kestabilan termal panel. Dengan demikian, dibandingkan metode lainnya, PCM lemak hewan terbukti paling optimal sebagai sistem pendingin pasif untuk meningkatkan kinerja panel surya.

### 4.2. Saran

1. Penggunaan *Data Acquisition System* (DAQ) yang terintegrasi langsung dengan komputer agar data tercatat secara otomatis dan *real time*.
2. Penggunaan PCM organik atau anorganik lainnya, seperti parafin, stearat, atau garam hidrat, guna memperoleh referensi performa yang lebih luas dan menemukan material yang lebih baik.
3. Studi numerik dalam kondisi *transient* untuk menangkap dinamika perubahan suhu dan aliran secara lebih realistis dengan mempertimbangkan perubahan waktu secara kontinu.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

- Ariwibowo, A., Irsyad, M. and Amrul, A., 2022. An Experimental Study of the Use of Coconut Oil-based PCM to Reduce the Thermal Load of Air Conditioners as an Effort to Save Energy. *MOTIVECTION: Journal of Mechanical, Electrical and Industrial Engineering*, 4(1), pp.35–44. <https://doi.org/10.46574/motivection.v4i1.107>.
- Bhatnagar, A., Hegde, A.K., H S, A., Karanth, K.V. and N, M., 2024. Innovative cooling for PV panels: Energy and exergy assessments of water-induced V-shaped channels. *Results in Engineering*, 24, p.103100. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103100>.
- Chavan, S. V. and Devaprakasam, D., 2021. Improving the performance of solar photovoltaic thermal system using phase change material. *Materials Today: Proceedings*, 46, pp.5036–5041. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.406>.
- Dwivedi, P., Sudhakar, K., Soni, A., Solomin, E. and Kirpichnikova, I., 2020. Advanced cooling techniques of P.V. modules: A state of art. *Case Studies in Thermal Engineering*, [online] 21, p.100674. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100674>.
- Gallart-Sirvent, P., Martín, M., Solé, A., Villorbina, G., Balcells, M., Cabeza, L.F. and Canela-Garayoa, R., 2018. Combining biocatalysts to achieve new phase change materials. Application to non-edible animal fat. *Molecular Catalysis*, 444, pp.76–83. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2017.10.037>.
- Hamed, M.H., Hassan, H., Ookawara, S. and Nada, S.A., 2024. Performance comparative study on passively cooled concentrated photovoltaic (PV) using adsorption/desorption and heat sink cooling methods: Experimental investigations. *Energy*, 307, p.132700. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132700>.

- Huang, P., Wei, G., Cui, L., Xu, C. and Du, X., 2021. Numerical investigation of a dual-PCM heat sink using low melting point alloy and paraffin. *Applied Thermal Engineering*, [online] 189, p.116702. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116702>.
- Islam, Md.I., Bin Jadin, M.S., Al Mansur, A. and Alharbi, T., 2024. Electrical Performance and Degradation Analysis of Field-Aged PV Modules in Tropical Climates: A Comparative Experimental Study. *Energy Conversion and Management: X*, [online] 24, p.100719. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100719>.
- Lepiksaar, K., Kajandi, G.-M., Sukumaran, S., Krupenski, I., Kirs, T. and Volkova, A., 2025. Optimizing solar energy integration in Tallinn's district heating and cooling systems. *Smart Energy*, [online] 17, p.100166. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2024.100166>.
- Ma, T., Li, Z. and Zhao, J., 2019. Photovoltaic panel integrated with phase change materials (PV-PCM): technology overview and materials selection. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [online] 116, p.109406. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109406>.
- Meriani, M., 2017. Kajian Potensi dan Efisiensi Energi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Wilayah Pekanbaru. *Jurnal Surya Teknik*, [online] 5(01), pp.19–25. <https://doi.org/10.37859/jst.v5i01.352>.
- Murtadha, T.K., 2023. Experimental and numerical investigation of integrated system between cooled photovoltaic and wall-inserted PCM/FOM thermal energy storage box. *Case Studies in Thermal Engineering*, 52, p.103746. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103746>.
- Nižetić, S., Arıcı, M., Bilgin, F. and Grubišić-Čabo, F., 2018. Investigation of pork fat as potential novel phase change material for passive cooling applications in photovoltaics. *Journal of Cleaner Production*, [online] 170, pp.1006–1016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.164>.
- Sen, E. and Celiktas, M.S., 2024. Performance evaluation and thermal stabilization of photovoltaic panels using phase-change materials. *Energy*, [online] 302, p.131840. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131840>.
- Stropnik, R. and Stritih, U., 2016. Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM. *Renewable Energy*, 97, pp.671–679. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2016.06.011>.
- Tian, J. and Ooka, R., 2025. Prediction of building-scale solar energy potential in urban environment based on parametric modelling and machine learning algorithms. *Sustainable Cities and Society*, 119, p.106057. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.106057>