

STUDI NUMERIK PENGARUH VARIASI PANJANG SIRIP *INSERTED WAVY TAPE* TERHADAP PHOTOVOLTAIC

Bachtiar Rahmanto¹, Nazaruddin Sinaga², Mohammad Tauviqirrahman²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: bachtiar.rahmanto33@gmail.com

Abstrak

Panel surya cenderung mengalami penurunan efisiensi pada suhu tinggi, sehingga diperlukan metode pendinginan yang efektif untuk menjaga performa konversi energi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas pendinginan panel surya menggunakan Material Berubah Fasa (Phase Change Material, PCM) yang dilengkapi dengan sirip dan inserted wavy tape sebagai metode pengatur aliran panas. Penggunaan PCM bertujuan menyerap panas berlebih dari panel surya melalui perubahan fase, sementara sirip dan inserted wavy tape meningkatkan konduktivitas termal dan memperluas area perpindahan panas di dalam PCM, memungkinkan distribusi suhu yang lebih merata. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kombinasi PCM dengan sirip dan inserted wavy tape mampu menurunkan suhu panel surya secara signifikan dibandingkan dengan sistem tanpa pendinginan. Efek sirip dan pola wavy tape pada PCM meningkatkan laju perpindahan panas melalui mekanisme konveksi paksa dan mempercepat distribusi panas pada PCM. Kesimpulan dari penelitian ini menyarankan bahwa desain sistem pendinginan yang mengkombinasikan PCM dan inserted wavy tape efektif dalam meningkatkan efisiensi termal panel surya dan dapat menjadi solusi pendinginan pasif yang efisien untuk aplikasi energi terbarukan.

Kata kunci: inserted wavy tape; material berubah fasa; panel surya; pendinginan; sirip; studi numerik

Abstract

Solar panels tend to experience efficiency drops at high temperatures, necessitating an effective cooling method to maintain energy conversion performance. This study aims to analyze the effectiveness of solar panel cooling using Phase Change Material (PCM) integrated with fins and inserted wavy tape as a heat flow regulation method. The PCM is used to absorb excess heat from the solar panel through phase transition, while the fins and inserted wavy tape enhance thermal conductivity and expand the heat transfer area within the PCM, allowing for a more even temperature distribution. Simulation results indicate that the combination of PCM with fins and inserted wavy tape significantly reduces the solar panel's temperature compared to systems without cooling. The effects of the fins and wavy tape pattern in the PCM improve the heat transfer rate through forced convection mechanisms and accelerate heat distribution within the PCM. This study concludes that a cooling system design combining PCM and inserted wavy tape effectively enhances the thermal efficiency of solar panels and can serve as an efficient passive cooling solution for renewable energy applications.

Keywords: cooling; fins; inserted wavy tape; numerical study; phase change material; solar panel

1. Pendahuluan

Energi matahari merupakan salah satu sumber daya yang aman dan sumber daya energi terbarukan yang murah yang dapat memenuhi permintaan yang terus meningkat [1]. Sebagai sumber energi terbarukan yang bersih, energi surya memiliki prospek yang baik untuk memecahkan masalah energi dan lingkungan di masa depan. Teknologi fotovoltaik (PV) saat ini adalah yang paling umum cara mengubah energi matahari menjadi listrik secara langsung dengan menggunakan sel surya. Pada prakteknya, keluaran panel surya ditentukan oleh faktor iradiasi dan temperatur lingkungan sekitar. Permasalahan yang muncul adalah ketika temperatur panel meningkat maka efisiensi panel surya akan menurun, sehingga diperlukan pendingin untuk menjaga temperatur panel [2]. Untuk setiap kenaikan suhu sel surya sebesar 1°C, efisiensi listrik turun sekitar 0,45% [3].

Upaya untuk melakukan pendinginan panel surya terus selalu dikembangkan secara berkelanjutan melalui banyak inovasi dalam riset, salah satunya yaitu menggunakan photovoltaic thermal (PV/T). Photovoltaic thermal (PV/T) merupakan teknologi yang menggabungkan dua sistem dalam satu frame, sehingga paparan panas yang disebabkan oleh radiasi cahaya matahari dapat diminimalisir. Rekayasa sistem energi surya melalui penelitian terus dilakukan dalam upaya untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja panel surya. Pendinginan dengan sistem Photovoltaic Thermal terkadang dikombinasikan dengan metode pasif dan aktif. Ada dua teknik utama yang digunakan untuk meningkatkan perpindahan

panas [4];[5];[6]. Yang pertama adalah metode aktif. Dalam teknik aktif, masukan daya eksternal diperlukan untuk meningkatkan perpindahan panas. Teknik aktif mencakup aditif kimia atau cairan, rotasi mekanis, pengikisan dan pengelapan permukaan yang dipanaskan, injeksi gas, dll. Pendinginan dengan metode pasif juga telah banyak dilakukan melalui pendekatan eksperimen dan numerik menggunakan material berubah fasa / Phase Change Material (PCM). Metode penggabungan PV/T-PCM yaitu sistem heat exchanger yang dapat memindahkan panas dari PCM menjadi bisa dimanfaatkan. Studi eksperimental ini pernah dilakukan dengan membandingkan PV dan PV/T – PCM, suhu belakang panel mengalami penurunan sebesar 15°C [7].

Dalam penelitian ini penulis menggunakan metode pendinginan PV/T – PCM menggunakan PCM Palm Wax dengan dikombinasikan dengan sistem perpindahan panas berupa pipa yang dialiri air dengan menambahkan perlakuan geometri yaitu pemberian sirip berupa wave/gelombang dengan variasi panjang sirip yang bertujuan meningkatkan laju perpindahan panas, serta penulis menggantikan aliran air yang konstan menjadi berulang-ulang yang bertujuan agar suhu fluida menjadi lebih tinggi dan dapat dimanfaatkan dengan baik.

2. Metode Penelitian

2.1 Desain Penelitian

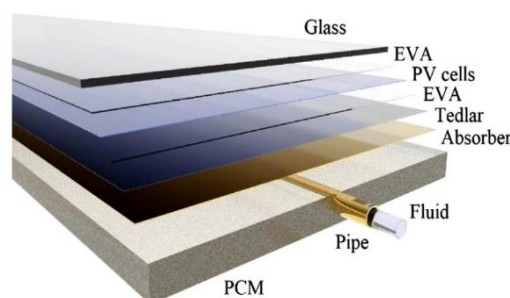
Penelitian ini menggunakan metode simulasi komputasi dengan pendekatan Computational Fluid Dynamics (CFD) untuk menganalisis performa termal sistem Photovoltaic Thermal (PVT) yang dilengkapi dengan Phase Change Material (PCM) Desain penelitian ini berfokus pada evaluasi perpindahan panas dan kehilangan tekanan yang dihasilkan oleh penggunaan *inserted wavy tape*. Simulasi ini bertujuan untuk memodelkan perilaku perpindahan panas di dalam sistem PVT, terutama ketika panel surya menghasilkan panas yang kemudian dikelola oleh PCM dan air yang mengalir melalui pipa yang dilengkapi dengan wavy tape. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Ansys Fluent, di mana kondisi aliran dan termal dalam sistem dapat dianalisis secara mendetail, termasuk distribusi suhu, profil aliran fluida, dan perpindahan panas di sekitar wavy tape serta interaksi antara PCM dan panel surya.

2.2 Alur Studi Numerik

Studi numerik dilakukan menjadi 4 tahap utama yaitu; *modeling geometry*, *meshing*, *setup*, dan *running simulation*. Selain tahapan tersebut pada studi numerik diperlukan adanya uji grid independen dan validasi. Penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk memahami konsep dan teori terkait sistem PV-T panel yang menggunakan PCM serta pendekatan numerik yang relevan. Langkah ini mencakup pengumpulan informasi dari penelitian-penelitian sebelumnya, serta pemahaman tentang penggunaan Computational Fluid Dynamics (CFD) dalam analisis performa termal dan aliran fluida.

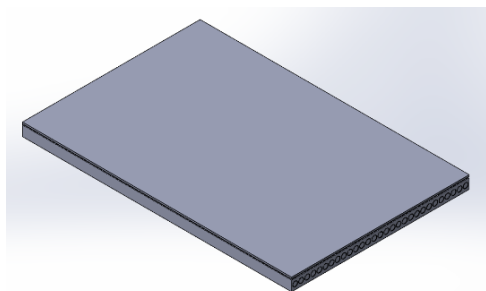
2.3 Pemodelan Geometri

Berikut merupakan model geometri referensi yang dipakai, ditunjukkan pada Gambar 1. PCM diberikan dibawah panel surya sebagai penyimpan panas dan penukar panas.



Gambar 1. Pemodelan Geometri Referensi [8]

Lalu untuk model geometri yang dipakai, ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pemodelan Geometri Panel Surya

Berikut merupakan model geometri penelitian digunakan model geometri panel surya referensi dan spesifikasi PCM yang diberikan PCM dan pipa sebanyak 29 buah dibawah panel surya sebagai pendingin.



Gambar 3. Spesifikasi Model Geometri

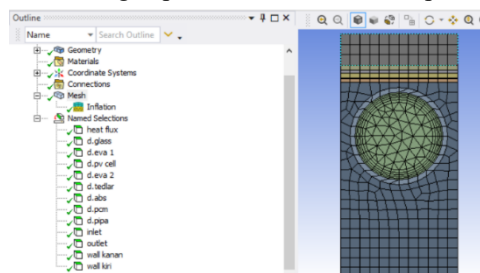
Sedangkan untuk model variasi sirip ditampilkan pada Gambar 4 dibawah.



Gambar 4. Pemodelan Variasi

2.4 Simulasi Ansys

Simulasi modal *analysis* pada model PV bertujuan untuk mengidentifikasi temperature PV dan suhu outlet. Dalam melakukan simulasi modal *analysis* diawali dengan pendefinisian mesh, setup dan solusi.



Gambar 5. Pemodelan Mesh

Berikut merupakan material properties panel surya dan spesifikasi PCM yang dimasukkan kedalam material properties Ansys Fluent terdapat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Material Properties Panel Surya [8]

Component	Density (kg.m^{-3})	Thermal Conductivity ($\text{W.m}^{-1}.k^{-1}$)	Spesific Heat Capacity ($\text{J.kg}^{-1}.k^{-1}$)
Glass Cover	2200	0.76	830
Eva Layer	960	0.35	2090
PV cell	2330	148	700
Tedlar Film	1200	0.20	1250
Copper	8960	401	385

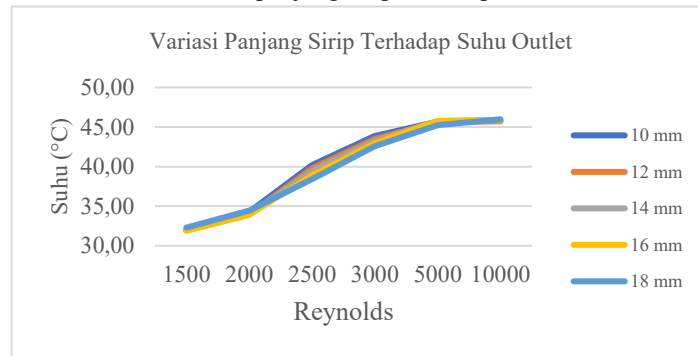
Tabel 1. Material Properties PCM

Density (kg.m^{-3})	1145
Cp (Specific Heat Capacity) ($\text{W.m}^{-1}.k^{-1}$)	at 15 C, 2802 at 46 C, 2892
Thermal Conductivity ($\text{W.m}^{-1}.k^{-1}$)	at 15 C, 0.28 at 46 C, 0.25
Viscosity ($\text{kg.m}^{-1}.s^{-1}$)	0.0045
Pure Solvent Melting Heat (J.kg^{-1})	122180
Solidus Temperature (C)	46
Liquidus Temperature (C)	46

3. Hasil dan Pembahasan

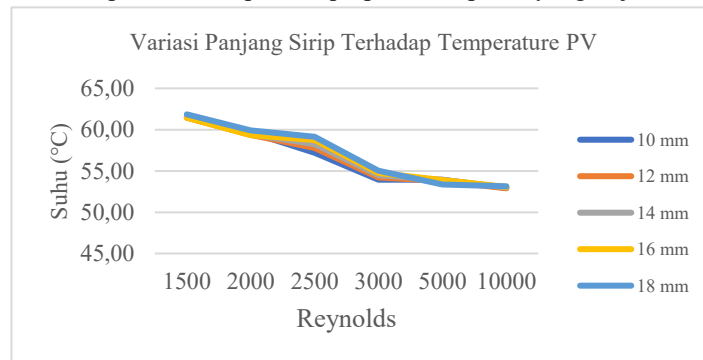
3.1 Hasil Simulasi

Berikut merupakan hasil simulasi variasi panjang sirip terhadap suhu outlet dan temperature PV



Gambar 6. Hasil Simulasi Suhu Outlet

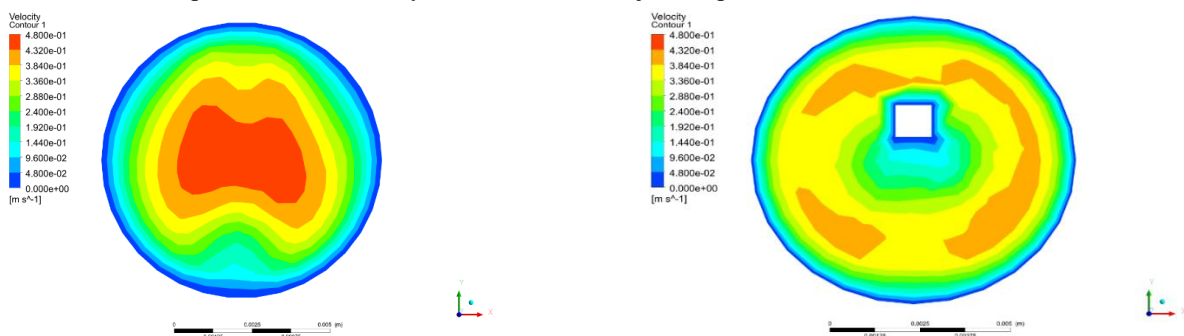
Dapat dilihat pada Gambar 6 bahwa semakin pendek sirip maka semakin tinggi suhu outlet yang dihasilkan, itu membuktikan bahwa semakin rapat suatu sirip maka perpindahan panas yang terjadi semakin tinggi.



Gambar 7. Hasil Simulasi Suhu PV

Dapat dilihat pada Gambar 7 bahwa semakin pendek sirip maka semakin rendah suhu PV, itu membuktikan bahwa semakin rapat suatu sirip maka perpindahan panas yang terjadi semakin tinggi.

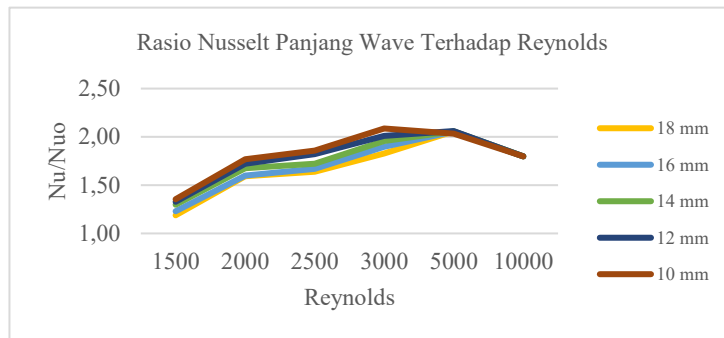
Berikut merupakan kontur velocity hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Kontur *Velocity*

3.2 Hasil Perhitungan

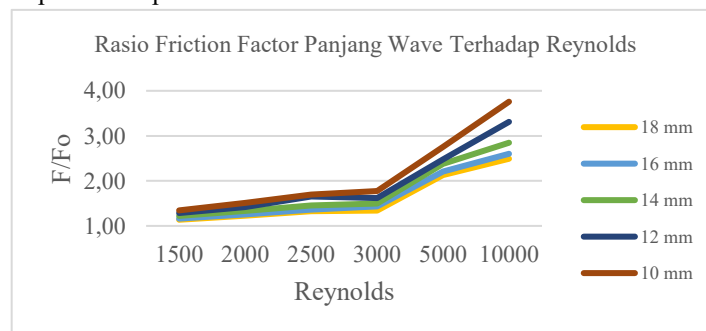
Rasio Nusselt Number dapat dilihat pada Gambar 9 dibawah.



Gambar 9. Rasio *Nusselt Number*

Pada Gambar terlihat bahwa pada bilangan Reynolds 1500 – 5000 rasio bilangan Nusselt antara bilangan Nusselt pipa bersirip dengan bilangan Nusselt tanpa sirip menunjukkan terdapat kenaikan yang signifikan, dengan nilai optimal di bilangan Reynolds 3000 dengan nilai 2.09 di variasi panjang sirip 10 mm, tetapi saat memasuki bilangan Reynolds 5000 dan 10000 terdapat penurunan yang signifikan hal ini disebabkan karena variasi sudah mencapai titik optimal di Reynolds 3000. Hal ini bisa terjadi disebabkan oleh suhu outlet pipa pada bilangan Reynolds 3000 yang sudah menunjukkan angka mendekati titik leleh PCM yang berarti walaupun Reynolds dinaikkan tidak akan menaikkan koefisien perpindahan panas yang signifikan dari pipa tanpa sirip, yang berakibat mengalami kerugian termal dari gesekan.

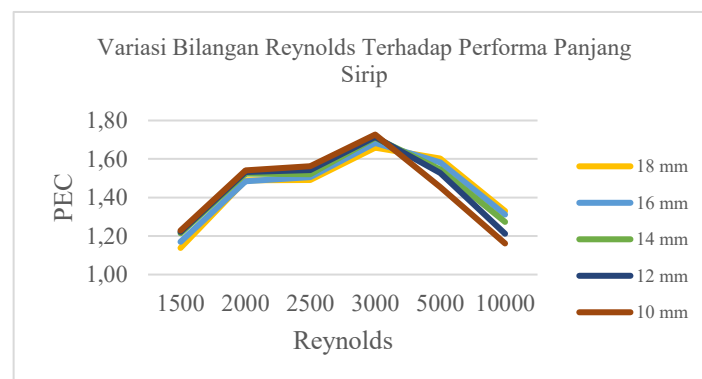
Rasio Friction Factor dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Rasio *Friction Factor*

Pada Gambar 3.5 terlihat bahwa kenaikan faktor friksi dipengaruhi oleh panjang sirip dan bilangan Reynolds, semakin pendek sirip semakin tinggi faktor friksinya dan semakin tinggi Reynolds semakin tinggi juga faktor friksinya, nilai tertinggi rasio faktor friksi terdapat pada variasi panjang sirip 10 mm dan bilangan Reynolds 10000.

Berdasarkan perbandingan rasio bilangan Nusselt dengan faktor friksi didapatkan nilai PEC untuk menghitung performa dari sistem tersebut. Berikut merupakan hasil simulasi pengaruh variasi bilangan Reynolds terhadap PEC, terdapat pada Gambar 11.



Gambar 11. *Performance Evaluation Criteria (PEC)*

3.3 Analisis Dan Pembahasan

3.3.1 Pengaruh Variasi Panjang Sirip Terhadap Suhu Panel Surya

Pada Gambar terlihat bahwa semakin rapat sirip semakin dingin panel surya, hal ini menunjukkan bahwa penambahan pitch berpengaruh terhadap suhu panel surya saat sedang dilakukan penyinaran, karena semakin rapat pitch maka aliran semakin turbulen. Hal ini juga didukung pernyataan [9] bahwa laju pendinginan dapat ditingkatkan dengan menyebabkan gangguan pada aliran fluida dan mengganggu lapisan batas termal dan hidrolik. Namun, peningkatan signifikan pada daya pompa diinduksi, yang akhirnya biaya pemompaan meningkat.

3.3.2 Pengaruh Variasi Panjang Sirip Terhadap Suhu Outlet Pipa

Pengaruh variasi panjang sirip terhadap suhu outlet pipa dapat dilihat pada Gambar 4 bahwa semakin rapat sirip dan semakin tinggi bilangan Reynoldnya semakin tinggi suhu fluida hal ini didasarkan hasil eksperimen [10] semakin pendek panjang sirip yang diberikan semakin bagus koefisien perpindahan panas dan performa yang dihasilkan, dikarenakan semakin pendek sirip maka semakin banyak lengkungan yang didapat, sehingga turbulensi yang terjadi semakin tinggi yang menyebabkan meningkatnya konvektivitas pipa. Tetapi kenaikan faktor friksi yang semakin tinggi juga meningkatkan daya pompa sehingga jika tidak dibarengi dengan kenaikan bilangan Nusselt akan menyebabkan dominasi faktor friksi yang akhirnya menjadikan performa sirip menjadi menurun.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengaruh variasi variasi panjang sirip terhadap temperature PV adalah semakin pendek panjang sirip semakin rendah temperatur, dapat menurunkan suhu sebesar 14.08 %.
2. Pengaruh variasi variasi panjang sirip terhadap suhu outlet adalah semakin pendek panjang sirip semakin tinggi temperatur outlet, dapat menaikkan suhu sebesar 42.40 %.
3. Pengaruh variasi variasi panjang sirip terhadap performa adalah semakin pendek panjang sirip semakin tinggi performanya, dengan titik optimal di Reynolds 3000.

5. Daftar Pustaka

- [1] Ma, T., Yang, H., & Lu, L. (2017). Long term performance analysis of a standalone photovoltaic system under real conditions. *Applied Energy*, 201, 320-331.
- [2] M. Benganem, A. A. Al-Mashraqi, and K. O. Daffallah, "Performance of solar cells using thermoelectric module in hot sites," *Renew. Energy*, vol. 89, pp. 51–59, 2016.
- [3] E. Skoplaki, J.A. Palyvos, Operating temperature of photovoltaic modules: a survey of pertinent correlations, *Renew. Energy* 34 (2009) 23–29.
- [4] Liu, P., Zheng, N., Shan, F., Liu, Z., & Liu, W. (2018). Heat transfer enhancement for laminar flow in a tube using bidirectional conical strip inserts. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 1064-1076.
- [5] Xu, Y., Islam, M. D., & Kharoua, N. (2017). Numerical study of winglets vortex generator effects on thermal performance in a circular pipe. *International Journal of Thermal Sciences*, 112, 304-317.
- [6] Zhai, C., Islam, M. D., Simmons, R., & Barsoum, I. (2019). Heat transfer augmentation in a circular tube with delta winglet vortex generator pairs. *International Journal of Thermal Sciences*, 140, 480-490.
- [7] Browne, M. C., Norton, B., & McCormack, S. J. (2016). Heat retention of a photovoltaic/thermal collector with PCM. *Solar Energy*, 133, 533-548.
- [8] A. Salari, A. Kazemian, T. Ma, A. Hakkaki-Farda, J. Peng. Nanofluid based photovoltaic thermal systems integrated with phase change materials: Numerical simulation and thermodynamic analysis. *Energy Conversion and Management* (2020), <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112384>.
- [9] Ghasemian, M., Sheikholeslami, M., & Dehghan, M. (2023). Performance improvement of photovoltaic/thermal systems by using twisted tapes in the coolant tubes with different cross-section patterns. *Energy*, 279, 128016.
- [10] Vishwakarma, D. K., Bhattacharyya, S., Soni, M. K., Goel, V., & Meyer, J. P. (2024). Evaluating the heat transfer and pressure drop in the transitional flow regime for a horizontal circular tube fitted with wavy-tape inserts. *International Journal of Thermal Sciences*, 196, 108677.