

## STUDI NUMERIK PENGARUH VARIASI JUMLAH PITCH TWISTED TAPE PADA PHOTOVOLTAIC-THERMAL

Afrio Yandra Arvabugi<sup>1</sup>, Nazaruddin Sinaga<sup>2</sup>, Mohammad Tauviqirrahman<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

\*E-mail: [yandraafrio2904@gmail.com](mailto:yandraafrio2904@gmail.com)

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja panel *Photovoltaic-Thermal (PV-T)* dengan mengintegrasikan lapisan *Phase Change Material (PCM)* dan pengaturan aliran fluida menggunakan *twisted tape*. Sistem yang dimodelkan adalah panel *PV-T* dengan dimensi 530 mm x 350 mm, dilengkapi lapisan *PCM* di bawah panel serta pipa-pipa yang mengalirkan fluida untuk menangkap panas sisa dari panel. Di dalam pipa, digunakan *twisted tape* dengan variasi jumlah rotasi untuk meningkatkan perpindahan panas melalui peningkatan turbulensi aliran fluida.

Jumlah *pitch* divariasikan pada 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 dan 40,. Sistem *twisted tape* dan aliran fluida dalam pipa menunjukkan pola yang berulang secara periodik, sehingga digunakan kondisi batas periodik dalam simulasi untuk memodelkan aliran hanya pada satu segmen pipa. Dengan pendekatan ini, pola aliran di sepanjang pipa diasumsikan berulang, memungkinkan penghematan sumber daya komputasi sambil mempertahankan keakuratan hasil perpindahan panas dan distribusi temperatur.

Simulasi dilakukan menggunakan *Ansys Fluent* dengan model turbulensi RNG k- $\epsilon$ , pengaturan *solidification & melting* untuk memodelkan perubahan fasa pada *PCM*, serta iradiasi matahari sebesar 1000 W/m<sup>2</sup>. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penggunaan *PCM* dan *twisted tape* mampu meningkatkan efisiensi termal sistem *PV-T* secara signifikan.

**Kata kunci:** Ketebalan *PCM*, *PV-T* panel, *PCM*, *palm wax*, *Reynolds number*, *twisted tape*.

### Abstract

This research aims to enhance the performance of Photovoltaic-Thermal (PV-T) panels by integrating a Phase Change Material (PCM) layer and optimizing fluid flow using twisted tape. The modeled system is a PV-T panel with dimensions of 530 mm x 350 mm, equipped with a PCM layer below the panel and pipes carrying fluid to capture residual heat from the panel. Inside the pipes, twisted tape with varying numbers of rotations is used to improve heat transfer by increasing fluid flow turbulence.

The thickness of the PCM layer is varied at 10, 15, 20, 25, 30, 35, and 40 mm. The twisted tape and fluid flow in the pipes exhibit a periodically repeating pattern, allowing for the use of periodic boundary conditions in the simulation to model flow in only one pipe segment. With this approach, the flow pattern along the pipe is assumed to repeat, allowing computational resource savings while maintaining the accuracy of heat transfer and temperature distribution results.

The simulation is conducted using Ansys Fluent with the RNG k- $\epsilon$  turbulence model, solidification and melting settings to model the phase change in the PCM, and solar irradiation of 1000 W/m<sup>2</sup>. The simulation results show that the use of PCM and twisted tape can significantly enhance the thermal efficiency of the PV-T system.

**Keywords:** PV-T panel, PCM, palm wax, PCM thickness, Reynolds number, twisted tape .

### 1. Pendahuluan

Dalam beberapa tahun terakhir, kebutuhan energi di seluruh dunia telah meningkat karena industrialisasi dan urbanisasi yang cepat. Energi matahari adalah salah satu sumber energi terbarukan yang aman dan ekonomis yang dapat memenuhi kebutuhan energi yang terus berkembang ini [1]. Energi surya menawarkan solusi yang fleksibel, berkelanjutan, dan ramah lingkungan untuk berbagai kebutuhan energi di berbagai sektor. Karena sifatnya yang bersih dan terbarukan, kemampuannya untuk mengurangi emisi gas rumah kaca, mendukung kemandirian energi, kemajuan teknologi, dan penurunan biaya, energi surya menjadi pilihan yang menarik [2]. Sistem fotovoltaik (PV) menawarkan berbagai kelebihan, seperti tidak adanya komponen bergerak, bebas polusi, masa operasi yang panjang, dan proses konversi langsung, menjadikannya pilihan utama untuk menghasilkan listrik dari energi surya [3].

Sebagai sumber energi terbarukan yang bersih, energi matahari memiliki potensi yang baik untuk mengatasi masalah energi dan lingkungan di masa depan. Saat ini, teknologi fotovoltaik (PV) merupakan cara paling umum untuk mengonversi energi matahari menjadi listrik secara langsung melalui penggunaan sel surya. Namun, setiap kenaikan suhu sebesar 1°C pada sel surya dapat mengurangi efisiensi listriknya sekitar 0,45% [4]. Umumnya, sel surya berbasis teknologi silikon mengubah sekitar 15%–25% radiasi matahari menjadi listrik, sementara sisa energi matahari yang masuk diubah menjadi panas. Untuk meningkatkan efisiensi sel surya dan produksi energi, diperlukan perangkat yang dapat menghilangkan panas yang tidak terpakai ini [5]. Cara praktis untuk mencegah panas berlebih pada modul PV adalah dengan menggunakan penyerap panas untuk menghilangkan panas yang dikeluarkan. Sistem gabungan ini disebut kolektor fotovoltaik termal (PVT), yang dapat memproduksi listrik dan panas secara bersamaan [6].

Sistem fotovoltaik termal (PVT) merupakan perangkat yang mampu mengonversi radiasi matahari menjadi energi listrik dan panas secara bersamaan. Pada sistem PVT, sebuah kolektor dipasang pada sistem PV untuk menyerap panas. Dibandingkan dengan sistem PV biasa, sistem PVT tidak hanya menghasilkan lebih banyak energi listrik, tetapi juga mampu menghasilkan energi panas. Beberapa faktor seperti penutup kaca, desain kolektor termal, penurunan tekanan, laju aliran massa, dan jenis fluida kerja dapat mempengaruhi kinerja sistem ini [7].

Metode efektif lainnya untuk mendinginkan suhu panel adalah dengan meningkatkan kapasitas termal kolektor [8]. Material berubah fase (PCM) yang diterapkan pada modul PV dapat membantu mengendalikan suhu sel PV dengan menyerap panas saat proses peleahan, berkat kapasitas panas laten yang tinggi [9]. Selain itu, lapisan PCM tidak hanya menjaga suhu sel PV pada tingkat yang sesuai, tetapi juga berfungsi sebagai penyimpanan panas yang bisa digunakan di kemudian hari [10]. Karena energi matahari bersifat tidak konsisten, penyimpanan energi termal dalam kolektor PVT dapat mengatasi masalah ini dengan menyimpan panas selama siang hari dan melepaskannya di malam hari.

## 2. Metodologi 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 twisted 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 twisted tape. Metode CFD dipilih karena memungkinkan simulasi aliran fluida dan perpindahan panas yang akurat dalam sistem yang kompleks, seperti sistem PVT-PCM, yang melibatkan perpaduan antara konduksi, konveksi, dan radiasi. 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 twisted tape serta interaksi antara PCM dan panel surya.

### 2.2 Alur Studi Numerik

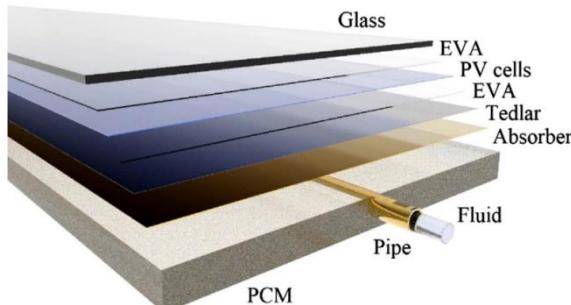
Studi numerik dilakukan menjadi 4 tahap utama yaitu; Modeling geometry, meshing, setup, dan Running simulation. Selain tahapan tersebut pada studi numerik diperlukan adanya uji grid independen dan validasi. Penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk memahami konsep dan teori terkait sistem PVT-panel 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.

Selanjutnya, dilakukan uji grid dan validasi simulasi untuk memastikan bahwa mesh atau grid yang digunakan dalam simulasi mampu merepresentasikan sistem dengan akurat. Validasi ini penting untuk memastikan bahwa hasil simulasi sejalan dengan data eksperimen atau hasil penelitian terdahulu. Setelah validasi, dilakukan pengujian perbedaan suhu outlet di mana grid dianggap memadai jika perbedaan suhu outlet antar grid kurang dari 5%. Jika perbedaan lebih dari 5%, maka mesh perlu diperbaiki atau diuji kembali. Setelah grid dianggap independen, atau tidak memengaruhi hasil simulasi secara signifikan, penelitian dilanjutkan dengan pembuatan variasi geometri yang akan diuji. Variasi geometri ini adalah jumlah *pitch twisted tape*.

Setelah parameter dan kondisi batas ditetapkan, simulasi variasi geometri dijalankan untuk mempelajari pengaruh setiap variasi terhadap performa sistem. Hasil simulasi dianalisis dalam tahap analisis hasil simulasi untuk memahami bagaimana perubahan geometris mempengaruhi distribusi suhu, efisiensi termal, dan karakteristik aliran fluida pada sistem PVT. Tahapan akhir dari penelitian ini adalah penyusunan kesimpulan dan saran berdasarkan hasil analisis. Kesimpulan ini mencerminkan pengaruh penggunaan variasi geometri terhadap kinerja sistem, dan saran diberikan untuk pengembangan lebih lanjut atau aplikasi praktis dari hasil penelitian ini. Dengan mengikuti alur ini, simulasi yang dilakukan diharapkan dapat memberikan hasil yang akurat dan valid, serta memberikan kontribusi yang berarti dalam pengembangan teknologi PVT-panel yang lebih efisien.

### 2.3 Permodelan Geometri

Model geometri dibuat dengan design modeler pada software ANSYS. Model dibuat merujuk pada studi terdahulu (Salari et al., 2020) untuk melakukan validasi terlebih dahulu. Model panel surya referensi memiliki daya 120 WP dengan efisiensi 12 % pada pengujian Standard Test Condition (STC) seperti pada Gambar 1.



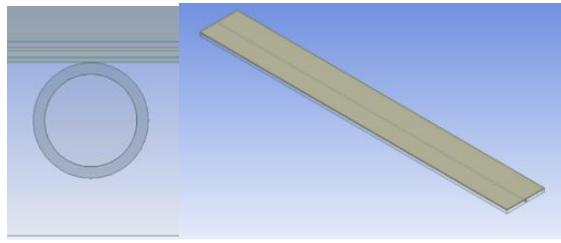
Gambar 1. Model Lapisan Panel Surya Referensi

Sedangkan untuk panel surya yang akan di teliti mengambil model panel surya merek Inscom memiliki daya 20 WP dengan efisiensi 11 % pada pengujian Standard Test Condition (STC). Panel surya dari produsen secara umum memiliki model dan dimensi seperti pada Gambar 2 berikut.



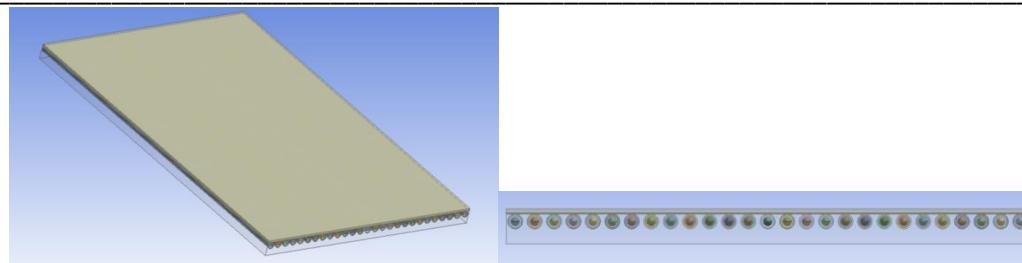
Gambar 2. Panel Surya

Hasil permodelan dari panel surya referensi dapat dilihat pada Gambar 3 dibawah, dimana susunan seperti terlihat pada Gambar 1 di atas.



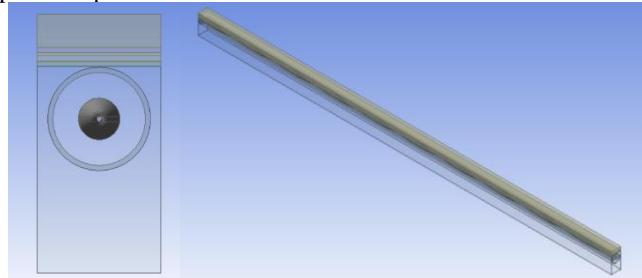
Gambar 3. Hasil Permodelan Panel Surya Referensi Depan (a) atas (b)

Model simulasi diuji menggunakan satu pipa untuk mempermudah perbandingan dengan hasil dari literatur atau jurnal yang memiliki konfigurasi serupa. Validasi dengan 1 pipa ini dilakukan untuk memverifikasi akurasi dari model numerik yang digunakan, khususnya dalam hal mekanisme perpindahan panas dan aliran fluida. Setelah tervalidasi, model tersebut dikembangkan ke dalam sistem yang lebih kompleks dengan 29 pipa dan penambahan sirip. Meskipun jumlah pipa bertambah dan ada penambahan sirip, mekanisme dasar yang mengatur perpindahan panas dalam pipa polos tetap berlaku, sehingga hasil validasi tetap relevan. Penambahan pipa dan sirip bertujuan untuk meningkatkan efisiensi termal panel PV-T dengan memperbesar area perpindahan panas dan meningkatkan kapasitas pendinginan sistem. Berikut merupakan hasil permodelan panel PV-T dengan menggunakan PCM dan 29 pipa pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil Pemodelan Panel Surya 29 pipa

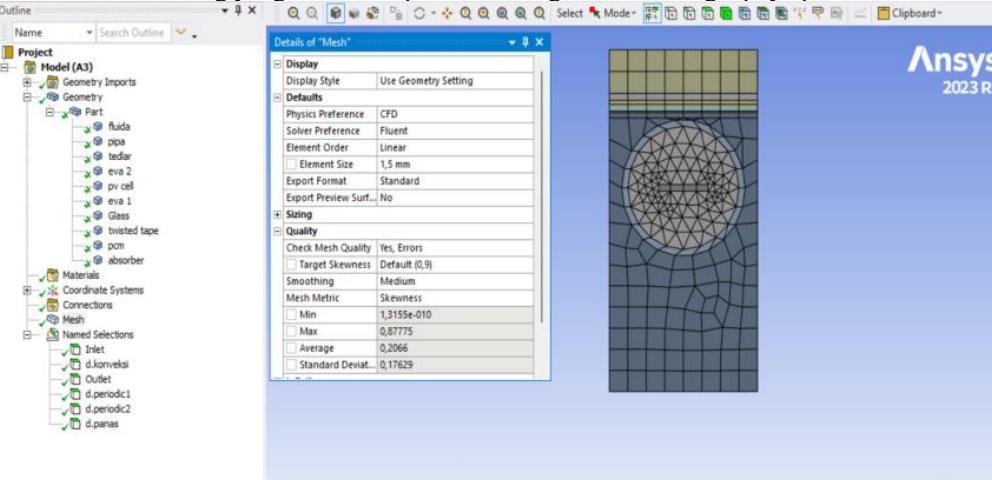
Untuk mengurangi kompleksitas komputasi, simulasi pada penelitian ini dilakukan dengan mengambil 1/29 bagian dari panel PV-T dan menerapkan kondisi batas periodic. Sistem ini memungkinkan hanya satu bagian panel yang disimulasikan, sementara hasil dari simulasinya dapat dianggap mewakili seluruh sistem yang memiliki 29 pipa. Dengan menggunakan kondisi batas periodic, mekanisme perpindahan panas dan aliran fluida yang terjadi pada 1/29 bagian panel tetap sejalan dengan apa yang akan terjadi jika seluruh panel disimulasikan. Berikut hasil permodelan dari penerapan kondisi batas periodic pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil Pemodelan Panel Surya 29 pipa dengan kondisi batas periodik

#### 2.4 Proses Meshing

Mesing dilakukan untuk membagi masing-masing bagian geometri menjadi lebih kecil dengan ukuran sel tertentu agar dapat disimulasikan. Mesing yang dilakukan pada domain geometri selengkapnya pada Gambar 6. berikut.

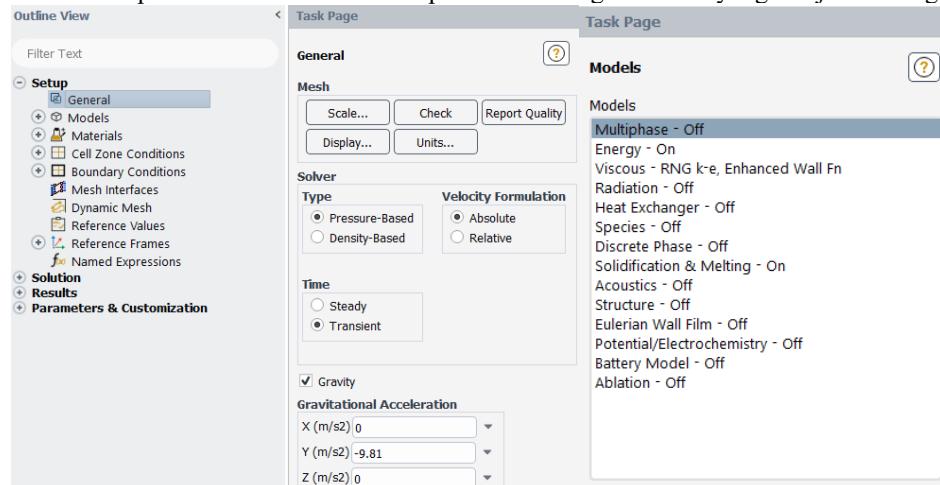


Gambar 6. Proses Meshing Model Geometri

Berdasarkan Gambar 6 proses mesing dilakukan terhadap masing masing part geometri dari model yang dibuat. Terdapat 10 part dari model geometri panel surya referensi. Part tersebut meliputi; Glass, Eva 1, PV Cell, Eva 2, Tedlar, Absorber, PCM, Pipa, Twisted Tape dan Fluida. Pada model Panel surya referensi hanya terdapat 9 part tanpa adanya inserted twisted tape. Part geometri tersebut selanjutnya dibuat mesing dengan dengan metode body sizing. Setiap part body diberikan ukuran sesuai dengan jumlah grid cell element yang dikehendaki. Pada tahap pembuatan mesing dibuat dengan berbagai jumlah cell element untuk kepentingan uji grid independen. Jumlah Cell element yang digunakan dengan ukuran antara lain; 180.000, 200.000, 250.000, 450.000, dan 600.000. Cell element dengan error terkecil dan jumlah yang sedikit akan dipilih menjadi grid yang disimulasikan untuk seluruh variasi pendinginan. . Pemberian nama pada surface face yang berhubungan langsung dengan lingkungan dilakukan dengan create named selections. Tujuan pemberian nama pada surface face untuk memudahkan memasukkan nilai kondisi batas.

## 2.5 Setup dan Solusi

Setup merupakan proses penyetelan sebelum proses simulasi dijalankan. Pada tampilan overview fluent penyetelan dimulai dengan setelan umum, models, materials, cell zone conditions, dan boundary conditions. Proses setup dilakukan dengan memilih opsi atau memasukkan nilai parameters dengan rincian yang disajikan sebagai berikut.



Gambar 7. Setup – General & Model

Berdasarkan Gambar 7 Setup general meliputi ; Type solver – pressure based, Time solver - transient, dan Gravitational Acceleration bernilai (-9,81) pada arah vektor Y. Setup model meliputi; Energy – On, Viscous – RNG k-e, Solidification & Melting – On. Energy equation harus diaktifkan karena model yang sedang dianalisis melibatkan perpindahan panas, baik di dalam fluida, panel PV-T, maupun di lapisan PCM (Phase Change Material), Model RNG k-e (Renormalization Group k- $\epsilon$ ) dipilih untuk memodelkan aliran turbulen karena memberikan hasil yang paling diterima menurut studi literatur yang dilakukan karena Model ini cocok untuk aliran yang memiliki shear tinggi, seperti aliran fluida di dalam pipa dengan kehadiran tape berputar yang menghasilkan turbulensi, Fitur Solidification & Melting diaktifkan untuk menangani perubahan fasa pada PCM. Ketika PCM menyerap panas, ia akan mencair (melting), dan ketika melepaskan panas, ia akan membeku kembali (solidification).

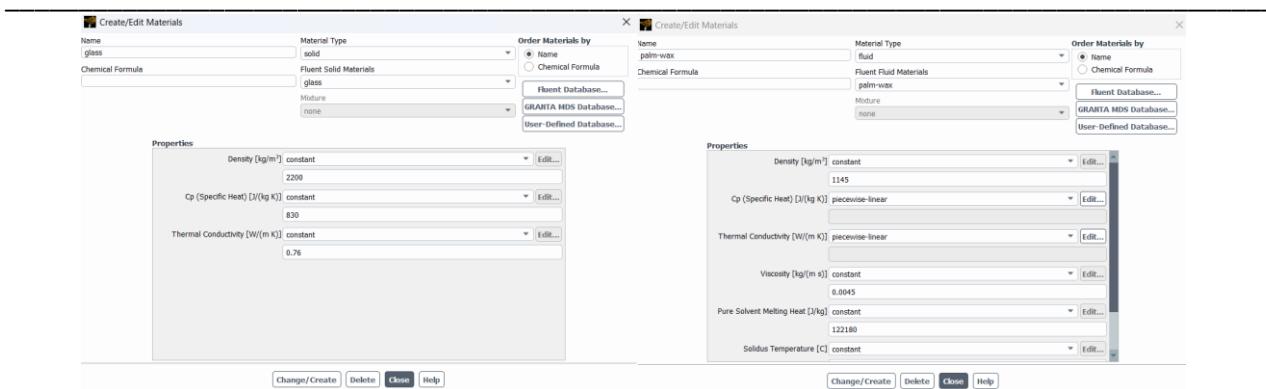
Tabel 1. Material Properties Setiap Layer.

Component	Density (kg.m <sup>-3</sup> )	Thermal Conductivity (W.m <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup> )	Spesific Heat Capacity (J.kg <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup> )
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 2. PCM Properties.

PCM Properties		-
Density (kg.m <sup>-3</sup> )		1145
Cp (SPECific Heat Capasity) (W.m <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup> )		at 15 C, 2802 at 46 C, 2892
Thermal Conductivity (W.m <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup> )		at 15 C, 0.28 at 46 C, 0.25
Viscosity (kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )		0.0045
Pure Solvent Melting Heat (J.kg <sup>-1</sup> )		122180
Solidus Temperature ( C )		46
Liquidus Temperature ( C )		46

Pada Tabel 1 dan 2 di jelaskan tentang sifat-sifat dari setiap lapisan material pada panel surya dan PCM, yang mana nantinya nilai tersebut akan di input pada setup – material seperti pada Gambar 8 dibawah:

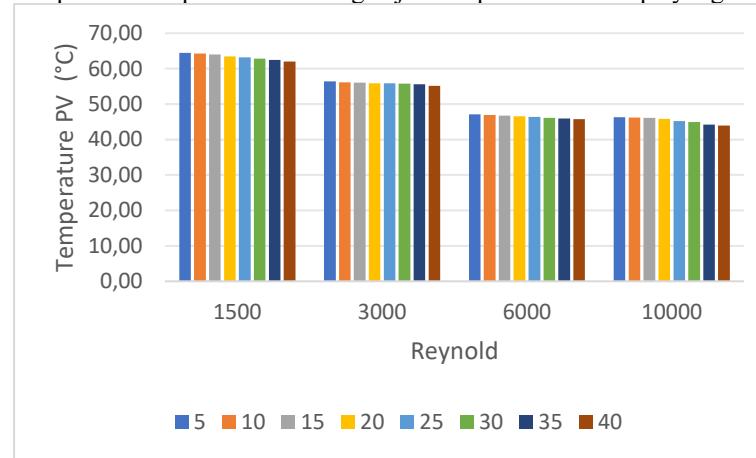


Gambar 8. Setup – Material

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Hasil Simulasi Pengaruh Jumlah Pitch terhadap Suhu Panel PV

Pengaturan jarak atau pitch antara pipa dan permukaan panel PV-T merupakan faktor penting yang dapat memengaruhi distribusi suhu dan efisiensi perpindahan panas dalam sistem. Pitch yang tepat dapat meningkatkan kontak antara pipa dan panel, sehingga memungkinkan transfer panas yang lebih baik. Sub-bab ini akan mengeksplorasi bagaimana variasi jumlah pitch berpengaruh terhadap distribusi suhu pada panel PV-T. Berikut pada Gambar 12 di bawah merupakan perbandingan suhu permukaan panel PV-T dengan jumlah pitch twisted tape yang bervariasi.

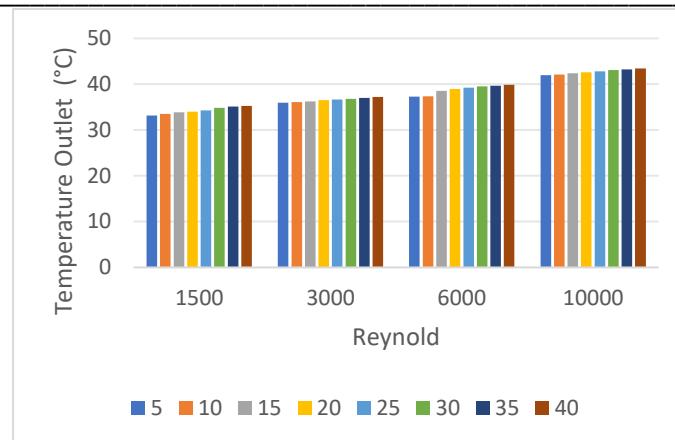


Gambar 9. Pengaruh Jumlah Pitch terhadap Suhu Panel Surya

Pada Gambar 4.12 semakin banyak jumlah *pitch* pada pipa PV-T menghasilkan suhu panel surya yang lebih rendah dan semakin sedikit jumlah *pitch* pada pipa PV-T maka suhu panel akan lebih tinggi. Suhu tertinggi pada panel ada pada variasi jumlah *pitch* 5 pada reynold 1500 sekitar 64,44 °C dan suhu terendah ada pada variasi jumlah *pitch* 40 pada reynold 10.000 sekitar 42,00 °C. Dengan meningkatnya jumlah *pitch* pada twisted tape, aliran fluida di sekitar permukaan pipa mengalami peningkatan turbulensi yang lebih signifikan. Peningkatan turbulensi ini membantu meningkatkan perpindahan panas antara fluida dan permukaan pipa. Saat aliran menjadi lebih turbulen, distribusi suhu di sepanjang permukaan pipa dan panel menjadi lebih merata, yang pada akhirnya dapat menurunkan suhu permukaan panel secara keseluruhan. Sebaliknya Hal ini menyebabkan fluida menyerap lebih banyak panas saat melewati pipa, sehingga suhu fluida pada *outlet* cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan jumlah *pitch* yang lebih sedikit.

#### 3.2 Hasil Simulasi Pengaruh Jumlah Pitch terhadap Suhu Outlet Pipa

Dalam sistem PV-T, perpindahan panas antara panel dan fluida pendingin merupakan aspek krusial yang menentukan efisiensi keseluruhan sistem. Jumlah *pitch* yang diterapkan pada jarak antara pipa dan permukaan panel dapat secara signifikan memengaruhi karakteristik aliran fluida, yang pada gilirannya berdampak pada kemampuan fluida dalam menyerap panas. Sub-bab ini akan membahas bagaimana variasi jumlah *pitch* berpengaruh terhadap efisiensi perpindahan panas ke fluida, dengan fokus pada analisis data simulasi yang menggambarkan hubungan antara jarak *pitch* dan suhu fluida yang dihasilkan. Berikut pada Gambar 13 di bawah merupakan perbandingan suhu outlet panel PV-T dengan jumlah *pitch* twisted tape yang bervariasi.



Gambar 10. Pengaruh Jumlah Pitch terhadap Suhu Outlet

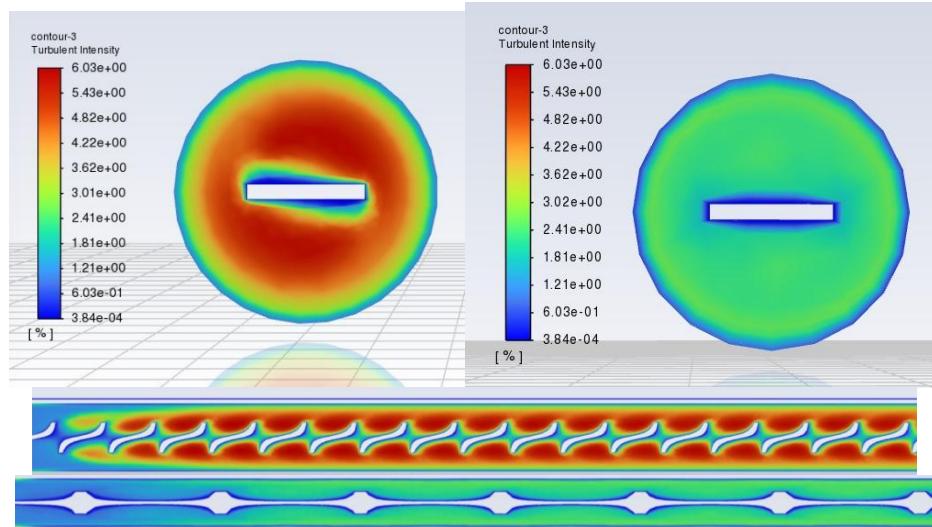
Berbanding terbalik dengan pengaruhnya terhadap permukaan panel, pada Gambar 4.13 semakin banyak jumlah *pitch* pada pipa *PV-T* menghasilkan suhu *outlet* yang lebih tinggi dan semakin sedikit jumlah *pitch* pada pipa *PV-T* maka suhu panel akan lebih rendah. Suhu terendah pada outlet ada pada variasi jumlah *pitch* 5 pada reynold 1500 sekitar 33.13 °C dan suhu terendah ada pada variasi jumlah *pitch* 40 pada reynold 10.000 sekitar 43.45 °C.

### 3.3 Analisa dan Pembahasan Pengaruh Jumlah Pitch terhadap Suhu Panel dan Outlet

Berdasarkan hasil analisis, variasi jumlah pitch twisted tape memiliki pengaruh signifikan terhadap suhu permukaan panel PV-T. Dengan meningkatnya jumlah pitch (putaran) twisted tape, terjadi peningkatan turbulensi aliran fluida di dalam pipa. Peningkatan turbulensi ini menyebabkan perpindahan panas yang lebih efektif dari permukaan panel ke fluida pendingin, sehingga suhu panel cenderung menurun. Hal ini disebabkan oleh efek peningkatan turbulensi dan pencampuran aliran yang dihasilkan oleh twisted tape, yang meningkatkan koefisien perpindahan panas konveksi.

Seiring dengan meningkatnya jumlah *pitch* (*Jarak Pitch* semakin dekat) juga meningkatkan turbulensi di dalam aliran fluida yang meningkatkan perpindahan panas konvektif dengan perusakan lapisan batas pada fluida secara terus menerus yang menyebabkan penurunan suhu permukaan panel dan kenaikan suhu *outlet* (Ghasemian dkk, 2023).

Pada pitch twisted tape yang lebih rapat (jumlah pitch lebih banyak), aliran fluida mengalami gangguan lebih kuat, sehingga panas yang terperangkap di permukaan panel lebih cepat dipindahkan ke fluida pendingin. Sebagai hasilnya, suhu panel dapat dikurangi secara lebih signifikan dibandingkan dengan twisted tape yang memiliki pitch lebih jarang. Seperti pada Gambar 14 di bawah.



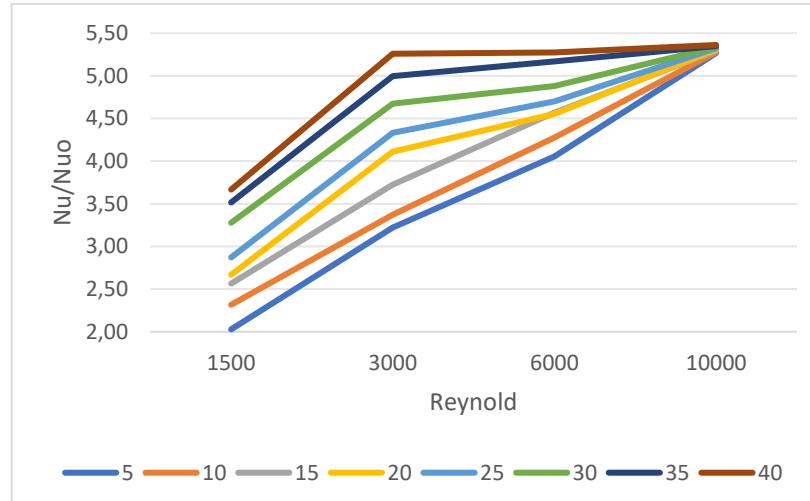
Gambar 11. Countour Turbulent Intensity jumlah pitch 40 (kiri) dan pitch 5 (kanan) dengan Reynold 1500

Variasi jumlah pitch pada twisted tape memberikan pengaruh yang signifikan terhadap suhu outlet fluida dalam sistem PV-T. Semakin rapat jumlah pitch (lebih banyak putaran per satuan panjang), aliran fluida di dalam pipa menjadi lebih turbulen karena adanya efek vortex yang dihasilkan oleh twisted tape. Peningkatan turbulensi ini memperkuat perpindahan panas konvektif antara dinding pipa dan fluida, sehingga panas dari panel lebih cepat ditransfer ke fluida pendingin.

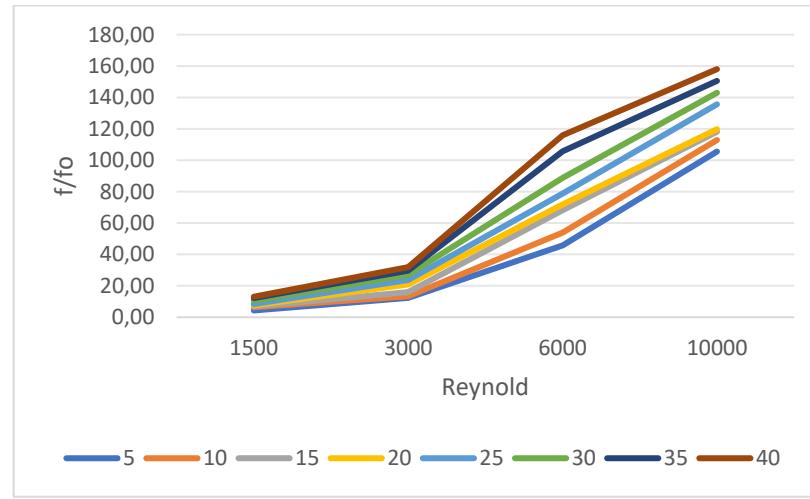
Dengan pitch yang lebih rapat, perpindahan panas konvektif menjadi lebih efektif, sehingga suhu fluida yang keluar (suhu outlet) menjadi lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh adanya peningkatan area kontak termal dan pencampuran aliran yang lebih baik, yang memungkinkan fluida menyerap lebih banyak energi panas dari panel PV-T. Oleh karena itu, peningkatan jumlah pitch pada twisted tape cenderung meningkatkan efisiensi pemanasan fluida, yang ditandai dengan kenaikan suhu outlet.

### 3.4 PEC Variasi Jarak Pitch

Dalam desain sistem perpindahan panas pada *PV-T* panel dengan penambahan elemen seperti twisted tape, pemahaman terhadap rasio *Nusselt* ( $Nu/Nu_0$ ) dan rasio friksi ( $f/f_0$ ) menjadi sangat penting. Rasio *Nusselt* mengukur peningkatan perpindahan panas dalam sistem dibandingkan dengan kondisi dasar tanpa modifikasi. Sementara itu, rasio friksi menunjukkan perubahan resistensi aliran akibat adanya modifikasi tersebut, yang mengindikasikan potensi kenaikan kebutuhan energi untuk mengalirkan fluida karena gesekan yang lebih besar.. Berikut pada Gambar 4.26 dan Gambar 15 dan Gambar 16 akan ada rasio *Nusselt* dan rasio friksi.

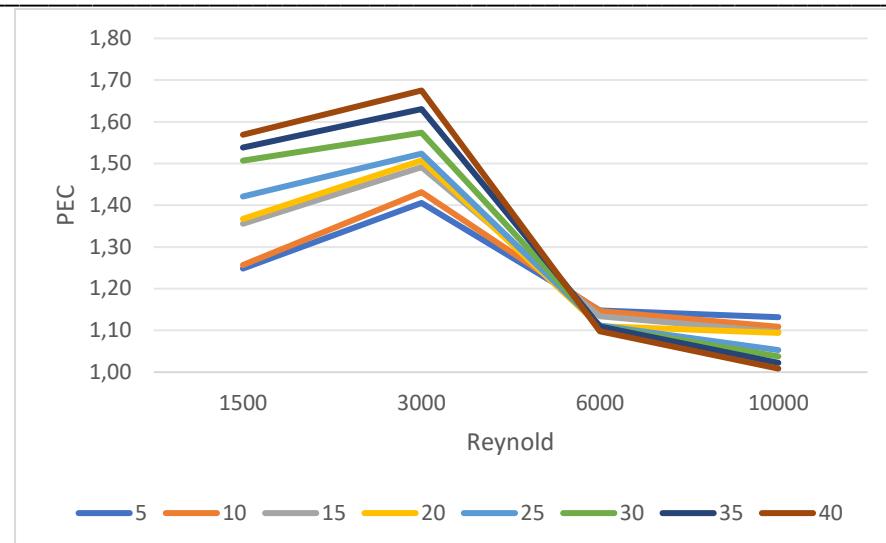


Gambar 12. Rasio Nusselt



Gambar 13. Rasio Friksi

Namun, peningkatan jumlah pitch ini juga diiringi dengan kenaikan rasio friksi, karena aliran fluida mengalami lebih banyak hambatan akibat kontak yang intensif dengan permukaan twisted tape. Berikut pada gambar di bawah merupakan perbandingan Kenaikan rasio friksi ini berarti sistem membutuhkan lebih banyak energi untuk mempertahankan laju aliran yang sama, yang bisa menjadi tantangan dalam mempertahankan efisiensi sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, dalam merancang *PV-T* panel dengan twisted tape, penting untuk mencari keseimbangan antara peningkatan perpindahan panas yang dicapai dan peningkatan resistensi aliran yang terjadi, menggunakan Performance Evaluation Criteria (PEC) sebagai parameter penilaian untuk mendapatkan konfigurasi pitch yang optimal. Berikut pada Gambar 17 akan ada PEC untuk setiap variasi jumlah pitch.



Gambar 14. PEC Variasi Jumlah Pitch

Pada Gambar 4.28 semakin banyak jumlah *pitch* (jarak *pitch* semakin rapat) pada pipa *PV-T* menghasilkan nilai *PEC* semakin tinggi dan semakin sedikit jumlah *pitch* (jarak *pitch* semakin jauh) pada pipa *PV-T* maka nilai *PEC* akan lebih tinggi. *PEC* tertinggi ada pada jumlah *pitch* 40 pada *reynold* 3000 dengan nilai 1,68 dan *PEC* terendah ada pada jumlah *pitch* 40 pada *reynold* 10.000 dengan nilai 1,01. Penurunan nilai *PEC* ini terjadi karena rasio perpindahan panas konvektif tidak sebanding dengan kenaikan rasio friksi yang dihasilkan dengan kenaikan *reynold*.

#### 4. Kesimpulan

Sebuah investigasi numerik telah dilakukan untuk mengkaji pengaruh jarak pipa-ke-panel, tebal lapisan *PCM* dan jumlah *pitch* dalam sistem *PV/T* terhadap suhu panel surya, suhu outlet dan efisiensi elektrik. Pada penelitian ini, sistem yang dimodelkan adalah panel *PV-T* dengan dimensi 530 mm x 350 mm. Panel ini dilengkapi dengan lapisan *PCM* di bawahnya serta pipa-pipa yang mengalirkan fluida untuk menangkap panas sisa dari panel. Di dalam pipa, digunakan twisted tape dengan variasi jumlah rotasi untuk meningkatkan perpindahan panas melalui peningkatan turbulensi aliran fluida. Simulasi dilakukan menggunakan *Ansys Fluent* dengan model turbulensi RNG k- $\epsilon$ , pengaturan solidification & melting untuk memodelkan perubahan fasa pada *PCM*, iradiasi matahari 1000 W/m<sup>2</sup>, serta berbagai kondisi batas termasuk periodic boundary condition untuk menangani pola aliran yang berulang pada twisted tape.

1. Semakin banyak jumlah *pitch* (jarak *pitch* semakin rapat) pada pipa *PV-T* menghasilkan suhu panel surya yang lebih rendah. Terjadi penurunan suhu panel sebanyak 4 % pada jumlah *pitch* 40 bandingkan dengan jumlah *pitch* 5.
2. Semakin banyak jumlah *pitch* pada pipa *PV-T* menghasilkan suhu outlet yang lebih tinggi. Terjadi kenaikan suhu outlet sebanyak 6.5 % pada jumlah *pitch* 40 bandingkan dengan jumlah *pitch* 5.
3. Semakin tinggi *Reynold* menurunkan suhu panel dan menaikan suhu outlet pipa.

#### 5. Daftar Pustaka

- [1] Ma T, Yang H, Lu L. Long term performance analysis of a standalone photovoltaic system under real conditions. *Appl Energy* 2017; 201: 330: - 31.
- [2] E. Skoplaki, J.A. Palyvos, Operating temperature of photovoltaic modules: a survey of pertinent correlations, *Renew. Energy* 34 (2009) 23-29.
- [3] Zhang, T. and Yang, H., 2018. High-efficiency plants and building integrated renewable energy systems: Building-integrated photovoltaics (BIPV). *Handbook of Energy Efficiency in Buildings: A Life Cycle Approach*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, pp.441-595.
- [4] A. Smets, K. Jäger, O. Isabella, R. Van Swaaij, M. Zeman., 2016. *Solar Energy: The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems*, Bloomsbury Publishing.
- [5] Arash Kazemian, Mohammad Hosseinzadeh, Mohammad Sardarabadi, Mohammad Passandideh-Fard. Effect of glass cover and working fluid on the performance of *Photovoltaic Thermal (PVT)* system: An experimental study, *Solar Energy* 2018; 173: 100-10.
- [6] A.N. Al-Shamani, K. Sopian, S. Mat, H.A. Hasan, A.M. Abed, M.H. Ruslan, Experimental studies of rectangular tube absorber *Photovoltaic Thermal* collector with various types of nanofluids under the tropical climate conditions, *Energy Convers. Manage.* 124 (2016) 528–542.

- 
- [7] T.T. Chow, A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology, *Appl. Energy* 87 (2010) 365–379.
  - [8] M. Herrando, C.N. Markides, K.A. Hellgardt, UK-based assessment of hybrid PV and solar-thermal systems for domestic heating and power: system performance, *Appl. Energy* 122 (2014) 288–309.
  - [9] D. Su, Y.T. Jia, X. Huang, G. Alva, Y.J. Tang, G.Y. Fang, Dynamic performance analysis of photovoltaic–thermal solar collector with dual channels for different fluids, *Energy Convers. Manage.* 120 (2016) 13–24.
  - [10] V.I. Terekhov, S.V. Kalinina, V.V. Lemanov, The mechanism of heat transfer in nanofluids: state of the art (review). Part 2. Convective heat transfer, *Thermophys. Aeromech.* 17 (2010) 157–171.