



**ANALISIS TRANSIEN PADA *BOILER* BERBASIS *SOLAR THERMAL COLLECTOR* DAN BIOGAS UNTUK SISTEM *ORGANIC RANKINE CYCLE***

**SKRIPSI**

**OLEH**

**Shafara Yuni Nurlita  
221910101012**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS JEMBER  
FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK MESIN  
JEMBER  
2026**



**ANALISIS TRANSIEN PADA *BOILER* BERBASIS *SOLAR*  
*THERMAL COLLECTOR* DAN BIOGAS UNTUK SISTEM  
*ORGANIC RANKINE CYCLE***

*diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana pada  
program studi Teknik Mesin.*

**SKRIPSI**

**OLEH**

**Shafara Yuni Nurlita  
221910101012**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS JEMBER  
FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK MESIN  
JEMBER  
2026**

## PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur, diatas lembar yang menjadi saksi akhir perjalanan ini, penulis persembahkan karya ini untuk :

1. Tuhan yang maha esa, Allah SWT, Sang Maha Pemilik Arah. Terimakasih telah menjadi satu – satunya rumah tempatku pulang saat dunia terasa begitu kabur.
2. Cinta pertama penulis yang telah lama pergi, saat ini beristirahat dalam keabadian; Alm. Selamat Santoso, ayah yang tidak sempat menemani perjalanan penulis selama ini, hingga harapan terakhirmu telah kuhidupkan dalam perjuangan.
3. Kepada mamaku Sulastri, wanita yang menjadi alasanku untuk tetap hidup, nafas yang menghidupkan semangatku, terima kasih atas doa – doa yang selalu menjaga langkahku tetap tegak.
4. Wanita kuat dan hebat yang menjadi tangan tak terlihat dibalik perjuangan penulis; Mbakku Shafira Yuliasdin, S.Tr.RMIK terimakasih telah menjadi jembatan yang mengantarkanku melewati derasny arus kehidupan.
5. Keluarga besar, yang oleh karenanya penulis mampu bertahan sejauh ini. Terimakasih selalu memohon kepada tuhan untuk memastikan jalan hidupku baik.
6. Bapak Skriptyan Noor Hidayatullah Syuhri ST., MT., PhD dosen pembimbing saya, terima kasih yang tak terhingga saya sampaikan, yang dengan penuh kesabaran dan ketulusan hati telah membimbing saya, hingga akhirnya skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
7. Sabrina Annisabella Wulanyanuar, dalam tawa, air mata yang menguatkan dan perjuangan yang telah dilalui, terimakasih telah menemani dan menjadi bagian dari perjalanan pernulis salama ini.
8. Sahabatku yang tak pernah lekang oleh waktu; Selvina Apriyanti, terimakasih telah menjadi pendengar yang baik, tempat untuk pulang, dan menetap dalam riuh bahagia maupun sunyi yang menyimpan luka.

9. Tim riset lomba *Iron Wave* sekaligus rekan organisasi club MES yang telah berjuang bersama, Diyas Fadriyanto, Pramasta Fauzian F., M. Ilham Ayyasy dan Rahmat Daud terimakasih telah memberikan momen terbaik yang layak untuk dikenang selama perkuliahan.
10. Kolega yang terlibat dalam skripsi ini, Fatih Muhammad Izzulhaq, Azriel Ananda Z., dan Ricky Kurnia, terimakasih atas kehadirannya yang senantiasa memberikan dukungan, kebersamaan, dan semangat yang telah membantu penulis membuat beban ini terasa lebih ringan.
11. Teman – teman kos; Chintya Dwi A., Esya Kurnia, Betsy Febriana, Yosefin Mardianti, Nova Febriana dan lainnya yang tidak bisa disebutkan satu persatu, terimakasih atas kebersamaan yang telah diberikan selama ini.
12. Rekan sekaligus teman organisasi Badan Perwakilan Mahasiswa (BPM FT) Amanda Early, Meyda Dwi H., Silvi Dyah C., dan lainnya yang penulis tidak bisa sebutkan satu persatu, terimakasih telah menjadi bagian dari pendewasaan.
13. Mesinku M24, dan Ketua Proaksi 2022 Fernanda Savero, terimakasih telah menjadi bagian dari cerita penulis selama perkuliahan.

**MOTTO**

"Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya."

**(Al – Baqarah : 286)**

"Tiada kekayaan yang lebih utama daripada akal, tiada keadaan yang lebih menyedihkan daripada kebodohan, dan tiada warisan yang lebih baik daripada pendidikan."

**(Ali bin Abi Thalib)**

"Hidup bukan untuk saling mendahului, Bayangan yang diciptakan oleh mentari  
Ada kar'na matahari bermaksud terpuji, Untukmu, cintai diri sendiri hari ini."

**(Mata Air – Hindia)**

**PERNYATAAN ORISINALITAS**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Shafara Yuni Nurlita

NIM : 221910101012

Menyatakan dengan bersungguh – sungguh bahwa karya ilmiah yang berjudul “Analisis Transien Pada *Boiler* Berbasis *Solar Thermal Collector* Dan Biogas Untuk Sistem *Organic Rankine Cycle*” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum diajukan pada institusi mana pun, dan bukan karya plagiat. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 4 Maret 2026

Yang Menyatakan,

Shafara Yuni Nurlita

NIM. 221910101012

**HALAMAN PERSETUJUAN**

Skripsi Analisis Transien Pada *Boiler* Berbasis *Solar Thermal Collector* Dan Biogas Untuk Sistem *Organic Rankine Cycle* telah diuji dan disetujui oleh Fakultas Teknik Universitas Jember pada:

Hari : Rabu

Tanggal : 4 Maret 2026

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

**Pembimbing Utama**

Nama : Skriptyan Noor Hidayatullah Syuhri S.T., M.T., Ph.D. (.....)

NIP : 199101272024061002

**Penguji**

**1. Penguji Utama**

Nama : Muhammad Dimiyati Nashrullah, S.T., M.Eng. (.....)

NIP : 199705032022031010

**2. Penguji Anggota**

Nama : Ir. Danang Yudistiro S.T., M.T., Ph.D. (.....)

NIP : 197902072015041001

**ABSTRACT**

*The Organic Rankine Cycle (ORC) system is a potential technology for converting low grade heat sources into electrical energy. However, the use of Solar thermal as the main heat source is often hampered by fluctuations in Solar radiation intensity, so hybridization using biogas energy and heat transfer analysis under transient conditions are needed. This study aims to analyze the dynamic thermal characteristics of an ORC system boiler through a Computational Fluid Dynamics (CFD) numerical approach. Simulations were conducted by varying the heat input scenarios Solar Thermal and Biogas and the working fluid flow velocity (0 m/s, 0.5 m/s, and 1 m/s). The simulation results show a delay time phenomenon in the absolute temperature response curve caused by the high thermal inertia of the boiler's constituent materials. In terms of heating performance, the hybrid scenario Solar Thermal On and Biogas On consistently produces the most stable and highest output temperature distribution. In addition, the fluid flow velocity is identified as the most significant parameter in increasing the heat transfer rate. Increasing the fluid velocity to 1 m/s has been shown to increase the Reynolds number and induce turbulence, effectively disrupting the thermal boundary layer. This increases the convective heat transfer coefficient, thereby compensating for the shorter fluid residence time, resulting in greater heat absorption compared to a velocity of 0.5 m/s.*

*Keywords: Boiler, Organic Rankine Cycle, Transient Analysis, Computational Fluid Dynamic (CFD)*

## RINGKASAN

Sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC) merupakan teknologi potensial untuk mengonversi sumber panas tingkat rendah menjadi energi listrik. Namun, pemanfaatan *Solar thermal* sebagai sumber panas utama seringkali terkendala oleh fluktuasi intensitas radiasi matahari, sehingga diperlukan sistem pemanas *hybrid* menggunakan energi biogas serta analisis perpindahan panas pada kondisi transien. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik analisis transien pada boiler dengan sistem ORC melalui pendekatan numerik *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Simulasi dilakukan dengan memvariasikan skenario input panas *Solar Thermal* dan Biogas serta kecepatan aliran fluida kerja (0 m/s, 0,5 m/s, dan 1 m/s). Hasil simulasi menunjukkan adanya fenomena *delay time* pada kurva respons temperatur yang diakibatkan oleh tingginya inersia termal (*thermal inertia*) pada material penyusun boiler. Dari segi performa pemanasan, skenario *hybrid Solar Thermal On* dan *Biogas On* secara konsisten menghasilkan distribusi *output thermal* yang stabil dan tinggi. Selain itu, kecepatan aliran fluida teridentifikasi sebagai parameter paling signifikan dalam meningkatkan laju perpindahan panas. Peningkatan kecepatan fluida menjadi 1 m/s terbukti memperbesar bilangan Reynolds dan memicu turbulensi yang secara efektif. Kondisi ini menyebabkan naiknya koefisien perpindahan panas konveksi sehingga mampu mengkompensasi singkatnya waktu kontak (*residence time*) fluida, yang menghasilkan penyerapan panas yang lebih maksimal dibandingkan kecepatan 0,5 m/s.

## PRAKATA

Puji syukur kepada Allah SWT karena atas segala rahmat dan karunia – Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Analisis Transien Pada *Boiler* Berbasis *Solar Thermal Collector* Dan Biogas Untuk Sistem *Organic Rankine Cycle*”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penulisan skripsi ini tidak akan berhasil tanpa bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

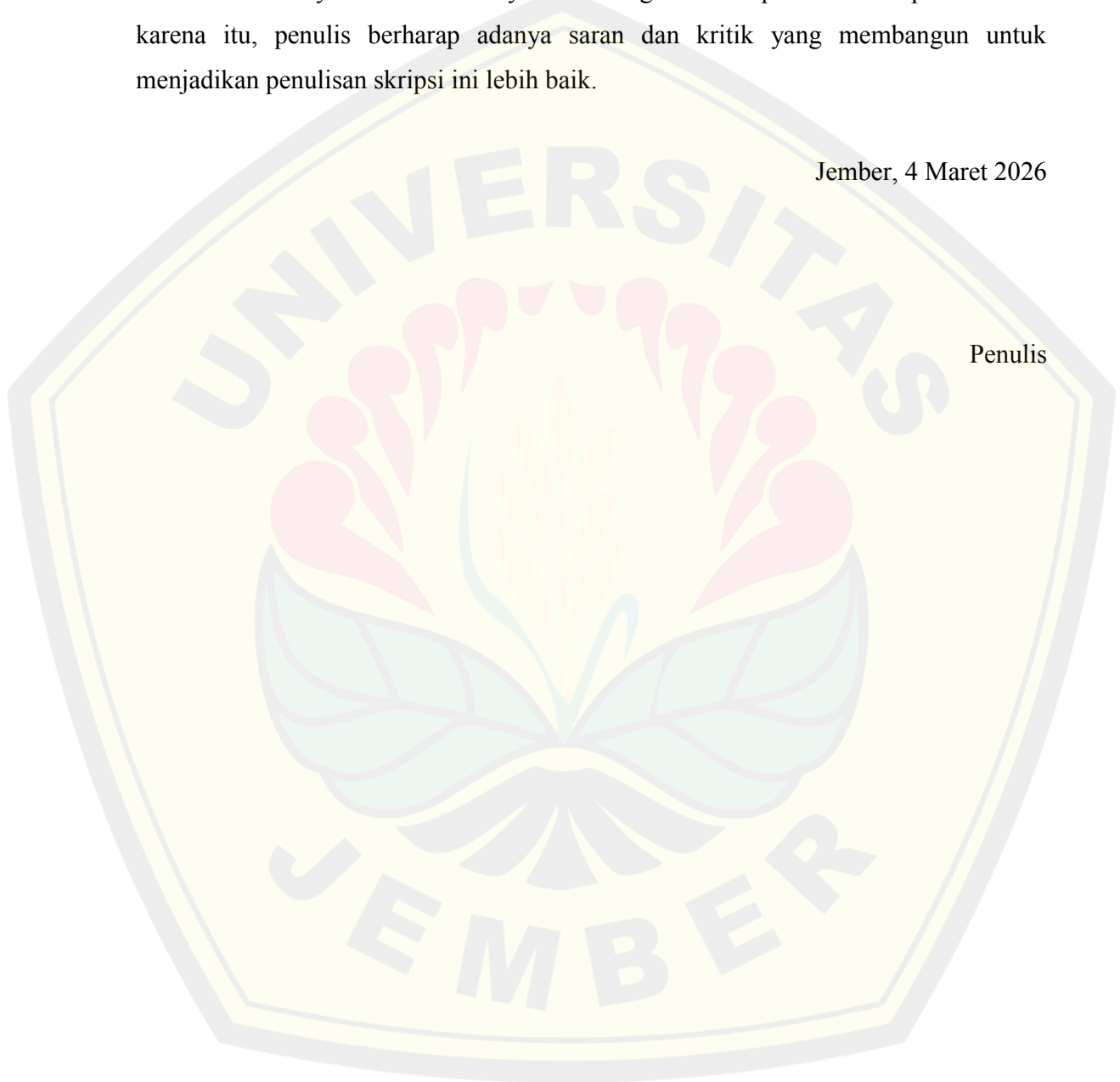
1. Tuhan yang maha esa, Allah SWT, Sang Maha Pemilik Arah. Terimakasih telah menjadi satu – satunya rumah tempatku pulang saat dunia terasa begitu kabur dan bising. Terimakasih telah menjaga waras dan langkahku, bahkan di saat aku hampir lupa alasan untuk tetap hidup.
2. Bapak Skriptyan Noor Hidayatullah Syuhri S.T., M.T., Ph.D selaku dosen pembimbing saya, terima kasih yang tak terhingga saya sampaikan, yang dengan penuh kesabaran, dan ketulusan hati telah membimbing saya, hingga akhirnya skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
3. Bapak Ir. Danang Yudistiro S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen penguji sekaligus kaprodi S1 Teknik Mesin, terimakasih saya sampaikan atas dedikasi dan masukan dalam penusunan skripsi ini.
4. Bapak Muhammad Dimiyati Nashrullah, S.T., M.Eng. selaku dosen penguji dan KOMBI S1 Teknik Mesin, terimakasih saya sampaikan atas saran dan masukan dalam penyempurnaan skripsi ini.
5. Bapak Dr. Ir. Salahuddin Junus, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing akademik.
6. Bapak Prof. Ir. Mahros Darsin, S.T., M.Sc., Ph.D. dan Ibu Ir. Rika Dwi Hidayatul Qoryah, S.T., M.T. selaku pembimbing lomba BKSTM, terimakasih telah memberikan dorongan dan semangat, sehingga bisa memberikan pengalaman baru kepada penulis selama perkuliahan.

7. Dosen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember yang telah membimbing dan memberikan ilmu yang bermanfaat.
8. Semua pihak yang telah membantu selama pengerjaan skripsi yang tidak dapat disebutkan satu – persatu.

Penulis menyadari bahwa banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis berharap adanya saran dan kritik yang membangun untuk menjadikan penulisan skripsi ini lebih baik.

Jember, 4 Maret 2026

Penulis



DAFTAR ISI

|  |              |
|--|--------------|
| <b>PERSEMBAHAN .....</b>                       | <b>iii</b>   |
| <b>MOTTO .....</b>                             | <b>v</b>     |
| <b>PERNYATAAN ORISINALITAS .....</b>           | <b>vi</b>    |
| <b>HALAMAN PERSETUJUAN .....</b>               | <b>vii</b>   |
| <b>ABSTRACT .....</b>                          | <b>viii</b>  |
| <b>RINGKASAN .....</b>                         | <b>ix</b>    |
| <b>PRAKATA.....</b>                            | <b>x</b>     |
| <b>DAFTAR GAMBAR .....</b>                     | <b>xv</b>    |
| <b>DAFTAR TABEL .....</b>                      | <b>xvii</b>  |
| <b>DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN .....</b>      | <b>xviii</b> |
| <b>BAB 1. PENDAHULUAN .....</b>                | <b>19</b>    |
| <b>1.1 Latar Belakang.....</b>                 | <b>19</b>    |
| <b>1.2 Rumusan Masalah .....</b>               | <b>20</b>    |
| <b>1.3 Batasan Masalah .....</b>               | <b>20</b>    |
| <b>1.4 Tujuan Penelitian.....</b>              | <b>21</b>    |
| <b>1.5 Manfaat Penelitian.....</b>             | <b>21</b>    |
| <b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA .....</b>           | <b>22</b>    |
| <b>2.1 Penelitian Terdahulu .....</b>          | <b>22</b>    |
| 2.1.1 <i>Organic Rankine Cycle (ORC)</i> ..... | 24           |
| 2.1.2 Siklus Ideal Rankine .....               | 25           |
| <b>2.2 Thermal Configuration.....</b>          | <b>26</b>    |
| 2.2.1 <i>Boiler</i> .....                      | 26           |
| 2.2.2 <i>Biogas</i> .....                      | 26           |
| 2.2.3 <i>Solar Thermal Collector</i> .....     | 26           |
| 2.2.4 <i>Heat Exchanger</i> .....              | 27           |
| <b>2.3 Perpindahan Panas.....</b>              | <b>28</b>    |
| 2.3.1 <i>Steady State</i> .....                | 29           |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.3.2 <i>Unsteady State</i> .....                             | 29        |
| <b>2.4 Mekanisme Perpindahan Panas</b> .....                  | <b>29</b> |
| 2.4.1 <i>Conjugate Heat Transfer (CHT)</i> .....              | 29        |
| 2.4.2 Konduksi .....  | 30        |
| 2.4.3 Konveksi .....  | 31        |
| 2.4.3 Radiasi .....   | 33        |
| <b>2.5 Properties of Fluids</b> .....                         | <b>34</b> |
| 2.5.1 Laminar .....   | 35        |
| 2.5.2 Turbulen .....  | 35        |
| <b>2.6 Permodelan Computational Fluid Dynamic (CFD)</b> ..... | <b>36</b> |
| <b>2.6.1 Discretization of the Computational Domain</b> ..... | <b>36</b> |
| 2.6.2 <i>Meshing</i> .....                                    | 37        |
| 2.6.4 <i>Time Step Size</i> .....                             | 37        |
| 2.6.5 Model Turbulensi .....                                  | 37        |
| <b>BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN</b> .....                     | <b>39</b> |
| <b>3.1 Alat dan Bahan</b> .....                               | <b>39</b> |
| <b>3.2 Variabel Penelitian</b> .....                          | <b>39</b> |
| <b>3.3 Prosedur Penelitian</b> .....                          | <b>40</b> |
| 3.3.1 <i>Pre – Processing</i> .....                           | 40        |
| 3.3.2 <i>Processing</i> .....                                 | 41        |
| 3.3.3 <i>Post Processing</i> .....                            | 42        |
| <b>3.4 Diagram Alir</b> .....                                 | <b>43</b> |
| <b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....                      | <b>44</b> |
| <b>4.1 Hasil Validasi Simulasi</b> .....                      | <b>44</b> |
| 4.1.1 <i>Mesh Convergence</i> .....                           | 44        |
| 4.1.2 Detail Meshing .....                                    | 45        |
| 4.1.3 Skenario Pembebanan <i>Thermal</i> .....                | 47        |
| 4.1.4 Residual .....  | 48        |
| <b>4.2 Hasil Contour Velocity Magnitude</b> .....             | <b>49</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.2.1 <i>Solar Thermal On Biogas On</i> .....  | 49        |
| 4.2.2 <i>Solar Thermal On Biogas Off</i> ..... | 51        |
| 4.2.3 <i>Solar Thermal Off Biogas On</i> ..... | 52        |
| <b>4.3 Distribusi Temperatur</b> .....         | <b>55</b> |
| 4.3.1 <i>Solar Thermal On Biogas On</i> .....  | 55        |
| 4.3.2 <i>Solar Thermal On Biogas Off</i> ..... | 57        |
| 4.3.3 <i>Solar Thermal Off Biogas On</i> ..... | 59        |
| <b>4.3 Analisis Thermal Performance</b> .....  | <b>60</b> |
| 4.3.1 <i>Solar Thermal On Biogas On</i> .....  | 61        |
| 4.3.2 <i>Solar Thermal On Biogas Off</i> ..... | 62        |
| 4.3.3 <i>Solar Thermal Off Biogas On</i> ..... | 64        |
| <b>5.1 Kesimpulan</b> .....                    | <b>65</b> |
| <b>5.2 Saran</b> .....                         | <b>66</b> |
| <b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....                    | <b>67</b> |

DAFTAR GAMBAR

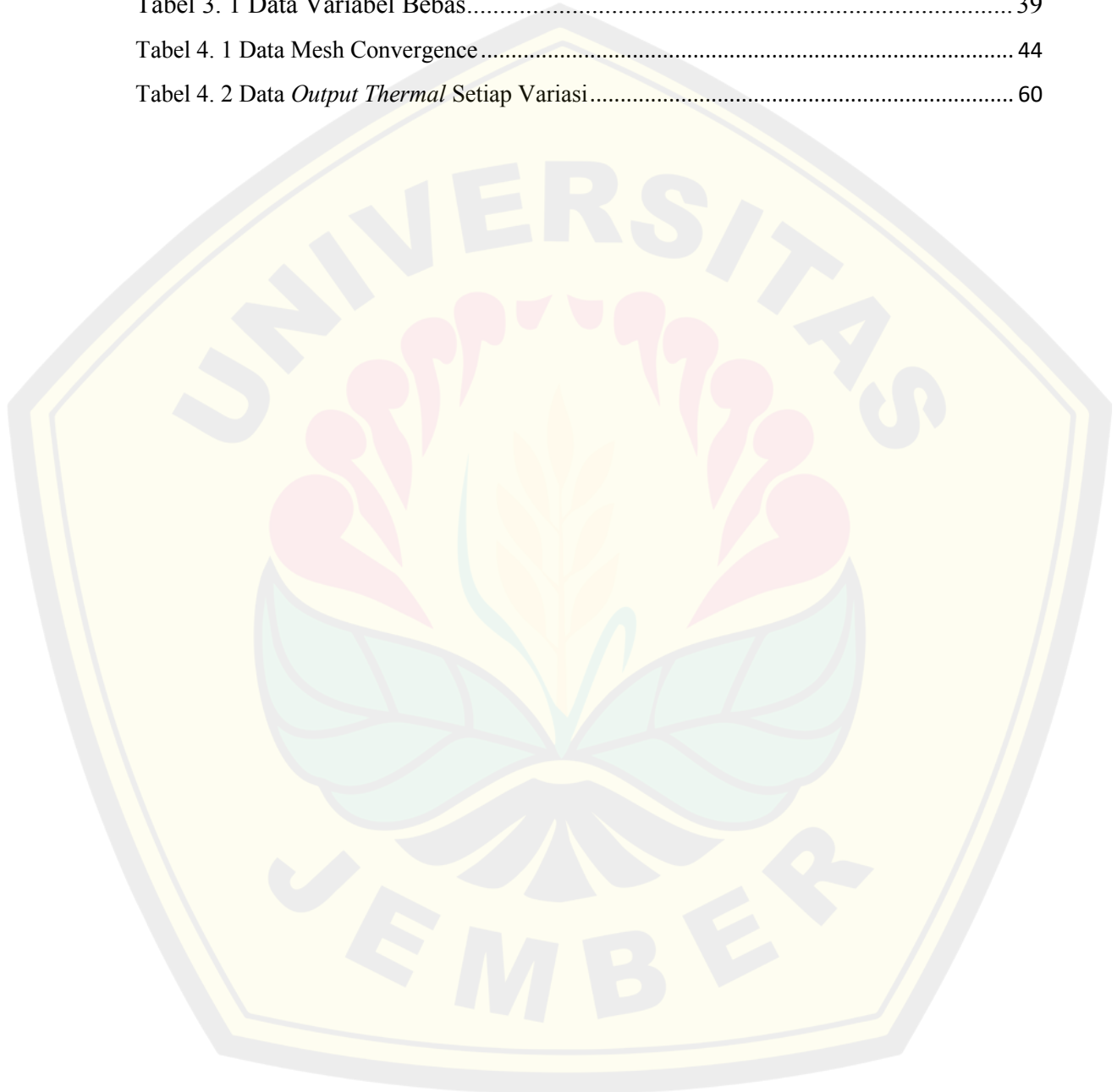
|   |    |
|---|----|
| Gambar 2. 1 <i>Principal work and heat transfers of subsystem</i> .....   | 24 |
| Gambar 2. 2 <i>Temperature entropy diagram of the ideal Rankine cycle.</i> .....  | 25 |
| Gambar 2. 3 <i>Scheme of Counter Flow Heat Exchanger</i> .....  | 28 |
| Gambar 2. 4 <i>Illustration of Fourier’s conduction law</i> .....   | 30 |
| Gambar 2. 5 <i>Illustration of Newton’s law of cooling.</i> .....   | 32 |
| Gambar 2. 6 <i>Net radiation exchange</i> .....   | 33 |
| Gambar 2. 7 <i>Laminar Flow</i> .....   | 35 |
| Gambar 2. 8 <i>Turbulen Flow</i> .....  | 35 |
| Gambar 3. 1 (a) <i>Design 3D model boiler</i> (b) <i>Detail Geometri Boiler</i> .....   | 40 |
| Gambar 3. 2 <i>Model slice half design</i> .....  | 41 |
| Gambar 3. 1 (a) <i>Design 3D model boiler</i> (b) <i>Detail Geometri Boiler</i> .....   | 40 |
| Gambar 3. 2 <i>Model slice half design</i> .....  | 41 |
| Gambar 4. 1 <i>Grafik Mesh Convergence</i> .....  | 44 |
| Gambar 4. 2 <i>Hasil Mesh 0.65 mm</i> .....   | 46 |
| Gambar 4. 3 <i>Detail Meshing, (a) Detail Mesh di Bagian Atas Sistem, (b) Mesh Di U<br/>turn Pipa ORC , (c) Mesh di sekitar Inlet ORC</i> ..... | 46 |
| Gambar 4. 4 <i>Ramp Step Plot</i> .....   | 47 |
| Gambar 4. 5 <i>Grafik Residual Temperatur</i> .....   | 48 |
| Gambar 4. 6 <i>Vector Velocity 1 Variasi Solar Thermal On Biogas On (a) Top Position<br/>(b) Bottom Position</i> .....                          | 50 |
| Gambar 4. 7 <i>Vector Velocity 0,5 Variasi Solar Thermal On Biogas On (a) Top Position<br/>(b) Bottom Position</i> .....                        | 50 |
| Gambar 4. 8 <i>Vector Velocity 1 Variasi Solar Thermal On Biogas Off (a) Top Position<br/>(b) Bottom Position</i> .....                         | 52 |
| Gambar 4. 9 <i>Vector Velocity 0,5 Variasi Solar Thermal On Biogas Off (a) Top Position<br/>(b) Bottom Position</i> .....                       | 52 |

|  |    |
|--|----|
| Gambar 4. 10 <i>Vector Velocity 0 m/s Variasi Solar Thermal Off Biogas On (a) Top Position (b) Bottom Position</i> ..... | 54 |
| Gambar 4. 11 <i>Variasi Solar Thermal On Biogas On Velocity 1</i> .....  | 55 |
| Gambar 4. 12 <i>Variasi Solar Thermal On Biogas On Velocity 0.5</i> .....  | 56 |
| Gambar 4. 13 <i>Variasi Solar Thermal On Biogas Off Velocity 1</i> .....   | 57 |
| Gambar 4. 14 <i>Variasi Solar Thermal On Biogas Off Velocity 0.5</i> .....   | 58 |
| Gambar 4. 15 <i>Variasi Solar Thermal Off Biogas On Velocity 0</i> .....   | 59 |
| Gambar 4. 16 <i>Grafik Hasil Output Solar Thermal On Biogas On</i> .....   | 61 |
| Gambar 4. 17 <i>Grafik Hasil Output Solar Thermal On Biogas Off</i> .....  | 63 |
| Gambar 4. 18 <i>Grafik Hasil Output Solar Thermal Off Biogas On</i> .....  | 64 |



**DAFTAR TABEL**

|  |    |
|--|----|
| Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu .....  | 22 |
| Tabel 2. 2 <i>Typical Values of the Convection Heat Transfer Coefficient</i> ..... | 33 |
| Tabel 2. 3 Nilai Reynolds Number pada Setiap Aliran.....                           | 35 |
| Tabel 3. 1 Data Variabel Bebas.....  | 39 |
| Tabel 4. 1 Data Mesh Convergence.....  | 44 |
| Tabel 4. 2 Data <i>Output Thermal</i> Setiap Variasi.....                          | 60 |



**DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN**

| Singkatan/Istikal | Arti dan Keterangan                |
|-------------------|------------------------------------|
| ORC               | <i>Organic Rankine Cycle</i>       |
| CFD               | <i>Computational Fluid Dynamic</i> |
| CST               | <i>Conjugate Heat Transfer</i>     |



## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pemanfaatan energi terbarukan saat ini berkembang pesat sebagai pembangkit listrik dengan memanfaatkan energi surya, angin, air dan panas bumi (Rusdi et al., 2021). Sistem *hybrid* didefinisikan sebagai perpaduan dua sumber energi yaitu *Solar thermal collector* yang dimaksimalkan pada saat sinar matahari tersedia, dan suplai tambahan dari biogas ketika intensitas matahari berkurang atau cuaca tidak mendukung, sehingga menciptakan sistem energi yang lebih stabil pada *boiler* dalam sistem Rankine Organik. Manfaat sistem ini adalah meningkatkan ketahanan energi dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, serta memanfaatkan potensi limbah organik secara efisien menjadi energi (Zhao et al., 2017).

Namun, permasalahan utama sistem ini adalah variabilitas cuaca yang tidak menentu sehingga pasokan panas dari *Solar thermal* menjadi tidak stabil dalam pengoperasiannya. Oleh karena itu, diperlukan sistem *hybrid* yang menggabungkan biogas sebagai cadangan sumber panas agar dapat menjaga kontinuitas operasi terutama saat mendung maupun pada malam hari (Okechi I, 2022). Tantangan lainnya adalah efisiensi termal yang dapat menurun akibat fluktuasi suhu dan ketersediaan bahan bakar yang terbatas. Penanganan masalah tersebut harus memperhitungkan kondisi operasional yang tidak menentu dan interaksi antar sumber panas yang kompleks (Pili et al., 2017).

Berbagai solusi telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan ketidakstabilan pasokan panas pada sistem *Solar thermal* dan biogas, termasuk penggunaan sistem kontrol adaptif dan integrasi multi sumber energi. Beberapa penelitian menyoroti bahwa penggunaan biogas sebagai sumber energi cadangan adalah solusi paling efektif untuk meningkatkan keandalan sistem dibandingkan dengan penyimpanan energi sementara (Lakhani et al., 2017). Selain itu, penerapan *Organic Rankine Cycle* (ORC) dalam konversi energi memberikan efisiensi yang baik dalam pemanfaatan sumber energi panas yang rendah. Namun, untuk mencapai

performa optimal dibutuhkan model simulasi yang mengakomodasi perpindahan panas transien, yang sampai saat ini masih terus dikembangkan (Okechi I, 2022).

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk mengisi gap tersebut dengan fokus penelitian ini adalah analisis transien pada sistem *hybrid* berbasis *Solar thermal collector* dan biogas untuk sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC). Studi ini fokus pada simulasi transien, yang diperlukan untuk memahami dinamika sistem dan evaluasi performa *thermal* dalam pengoperasian pemanas gabungan yang berubah – ubah terhadap waktu, menggunakan metode *Computational Fluid Dynamic*.

### 1.2 Rumusan Masalah

Terdapat rumusan masalah yang digunakan pada penelitian ini diantaranya:

1. Bagaimana karakteristik perpindahan panas transien pada *boiler* dalam sistem *organic rankine cycle*?
2. Apa pengaruh variasi *input* panas dari *solar thermal collector* dan biogas terhadap *thermal performance boiler* pada sistem *organic rankine cycle*?
3. Parameter apa yang paling berperan dalam meningkatkan laju perpindahan panas *boiler* pada sistem *organic rankine cycle*?

### 1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan untuk menghindari adanya penyimpangan, dijabarkan sebagai berikut:

1. Tidak mencakup variasi bentuk geometri design pada *boiler*
2. Penelitian difokuskan pada CFD identifikasi panas transien pada *boiler*.
3. Analisis tidak mencakup faktor eksternal seperti kondisi lingkungan secara rinci di luar variabel *input* panas.
4. Tidak mempertimbangkan degradasi material dan perubahan fasa.
5. Aliran fluida *incompressible*.

#### 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengembangkan analisis transien pada *boiler* dengan sistem *hybrid*.
2. Menganalisis pengaruh variasi *input* panas dari *solar thermal collector* dan biogas terhadap kinerja *boiler*.
3. Mengidentifikasi faktor utama yang mempengaruhi laju perpindahan panas pada *boiler* dalam sistem *organic rankine cycle*.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini dapat digunakan sebagai bahan referensi dalam pengembangan penelitian selanjutnya mengenai analisis transien dengan *input thermal* yang berbeda yakni dari *solar thermal collector* dan biogas untuk sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC).

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan topik ini disajikan pada Tabel 2.1 sebagai berikut:

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

| Nama dan Tahun Penelitian | Hasil Penelitian   |
|---------------------------|--|
| (Botsaris et al., 2019)   | Permodelan dan kinerja pembangkit listrik kogenerasi skala mikro yang beroperasi menggunakan sistem energi hibrida dengan menggabungkan <i>Parabolic Trough Collectors</i> (PTC) bertenaga surya dan sumur panas bumi ( <i>geothermal</i> ) berentalpi rendah. Dalam konfigurasi <i>hybrid</i> ini, kedua sumber energi terbarukan tersebut dimanfaatkan secara terintegrasi untuk menyuplai panas secara tidak langsung ke sebuah tangki penyimpanan energi termal TES ( <i>Thermal Energy Storage</i> ) berkapasitas 5 m <sup>3</sup> . Melalui metode <i>hybrid</i> energi surya dan panas bumi ini, sistem terbukti mampu menyuplai pemanasan distrik pada suhu di atas 80°C secara lebih konsisten. |
| (Zhao et al., 2017)       | Sistem <i>Organic Rankine Cycle</i> (ORC) <i>hybrid</i> yang secara inovatif menggabungkan energi surya ( <i>Parabolic Trough Collectors</i> ) dengan <i>boiler</i> biogas guna mengatasi kelemahan mendasar dari energi surya, yakni sifatnya yang intermiten atau berfluktuasi dan tidak tersedia di malam hari. Dalam konfigurasi hibrida ini, energi surya sebagai sumber panas primer, sementara pemanas biogas berperan krusial sebagai  |

---

sumber panas sekunder sekaligus kompensator daya yang memastikan sistem ORC tetap mendapatkan fluks panas yang stabil untuk beroperasi secara kontinu sepanjang waktu. Hasil pemodelan termodinamika membuktikan bahwa, integrasi kedua sumber energi terbarukan ini tidak hanya memberikan keandalan operasional yang lebih tinggi, tetapi juga berhasil menghasilkan efisiensi eksergi sistem secara keseluruhan dari 35,2% menjadi 38,2% dibandingkan jika hanya mengandalkan sumber panas tunggal.

---

Analisis transien menggunakan CFD pada *boiler*, pengamatan parameter secara transien ini diperlukan untuk mengetahui aliran fluida dari kondisi awal hingga sistem *boiler* mencapai kondisi operasional yang konstan dan stabil (*steady state*) pada detik ke – 40. Hasil ini menunjukkan bahwa dinamika transien ditandai oleh redistribusi material granular yang menurunkan hambatan aliran, meningkatkan kecepatan fluida, dan menghasilkan kondisi operasi yang stabil, dalam memprediksi perilaku hidrodinamika *boiler* terhadap perubahan waktu

(Tony et al., 2022)

---

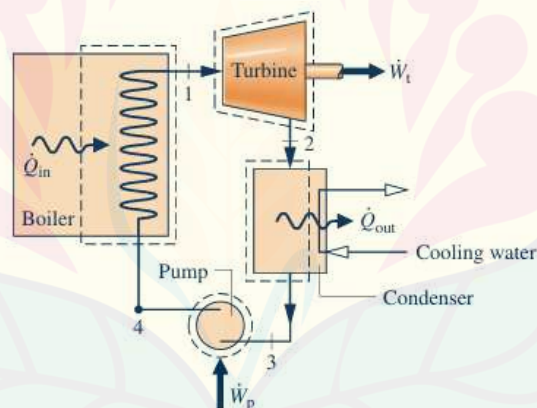
### **2.1 Modelling The Rankine Cycle**

Menurut buku (Moran et al., 2006) setiap unit massa fluida kerja secara periodik mengalami siklus termodinamika saat mengalir melalui serangkaian komponen yang saling terhubung, siklus ini disebut Siklus Rankine.

### 2.1.1 Organic Rankine Cycle (ORC)

Pada buku (Moran et al., 2006) *Organic Rankine Cycle* menggunakan zat organik sebagai fluida kerja, termasuk pentana, campuran hidrokarbon, pendingin yang umum digunakan, amonia, dan minyak. Untuk beroperasi secara efisien pada kondisi suhu rendah hingga sedang, sistem ini memanfaatkan fluida kerja organik dengan titik didih rendah, contohnya amonia, R134a, R245fa, ataupun R123. Sifat termofisik dari fluida – fluida tersebut menjadi faktor krusial dalam menentukan performa keseluruhan sistem (Hijriawan et al., 2022).

Fluida yang bekerja biasanya dipilih untuk memenuhi kebutuhan aplikasi tertentu. Jika fluida kerja melewati berbagai komponen dari siklus rankine tanpa adanya irreversibilitas, penurunan tekanan akibat gesekan tidak akan terjadi didalam *boiler* dan kondensor, dan fluida kerja akan mengalir melalui komponen-komponen ini pada tekanan konstan. Selain itu, dengan tidak adanya irreversibilitas dan perpindahan panas dengan lingkungan, proses melalui turbin dan pompa akan bersifat isentropik.



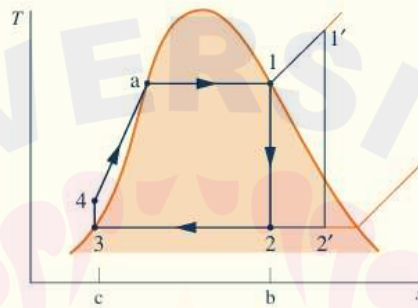
Gambar 2. 1 *Principal work and heat transfers of subsystem*  
(Sumber : Moran et al., 2006)

Penggunaan *input* temperatur ORC  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  didasari pada penelitian yang dilakukan oleh (Gao et al., 2019) dalam sistem yang memanfaatkan fluida kerja amonia memiliki karakteristik perpindahan panas dan penurunan tekanan (*pressure drop*) yang sangat spesifik pada fase aliran mendidih (*flow boiling*). Oleh karena itu, dalam

perancangan komponen *heat exchanger* sebagai *input* panas untuk sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC) maupun sistem refrigerasi yang beroperasi pada suhu  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mengkompensasi efek penurunan koefisien perpindahan panas ini agar efisiensi siklus termodinamika secara keseluruhan tidak menurun drastis.

### 2.1.2 Siklus Ideal Rankine

Siklus yang mengikuti idealisasi ini adalah siklus Rankine ideal yang ditunjukkan pada gambar 2.2. Mengacu pada gambar 2.1, disajikan bahwa fluida kerja menjalani serangkaian proses reversibel internal sebagai berikut:



Gambar 2. 2 *Temperature entropy diagram of the ideal Rankine cycle.*  
(Sumber : Moran et al., 2006)

1. Proses 1–2: Ekspansi isentropik pada Turbin  
Ekspansi isentropik fluida kerja melalui turbin dari uap jenuh pada kondisi 1 hingga tekanan kondensor.
2. Proses 2–3: Kondensasi pada Kondensor (isotermal–isobar)  
Transfer panas dari fluida kerja saat mengalir pada tekanan konstan melalui kondensor dan keluar sebagai cairan jenuh pada kondisi 3.
3. Proses 3–4: Kompresi di Pompa (isentropik)  
Kompresi isentropik pada pompa hingga kondisi 4 di wilayah cairan terkompresi.
4. Proses 4–1: Pemanasan di *Boiler* (isobar)  
Transfer panas ke fluida kerja saat mengalir pada tekanan konstan melalui *boiler* untuk menyelesaikan siklus.

## 2.2 Thermal Configuration

### 2.2.1 Boiler

Fluida kerja menyelesaikan siklus saat cairan yang keluar dari pompa pada kondisi 4 yakni fluida menerima panas untuk menjadi uap, yang disebut *boiler feedwater*, dipanaskan hingga jenuh dan diuapkan di dalam *boiler* (Moran et al., 2006). Dengan mengambil volume kontrol pada *boiler* yang membawa air dari kondisi 4 ke kondisi 1, sehingga rumus laju transfer panas ditunjukkan pada persamaan 2.1 :

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} = h_1 - h_4 \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan

$Q_{in}$  = Laju transfer panas (kJ/s)

$\dot{m}$  = Laju massa fluida kerja (kg/s)

$h_1$  = Entalpi fluida masuk (uap jenuh / *superheated*)

$h_2$  = Entalpi fluida keluar (cair jenuh)

### 2.2.2 Biogas

Menurut (Poblete et al., 2020) biogas adalah gas yang dihasilkan dari proses anaerobik penguraian bahan organik oleh mikroorganisme tanpa kehadiran oksigen. Proses ini biasanya terjadi dalam sistem pencernaan anaerobik, di mana limbah organik seperti kotoran ternak, limbah pertanian, atau limbah domestik diuraikan menjadi campuran gas yang terutama terdiri dari metana (CH<sub>4</sub>) dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Biogas ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan untuk berbagai keperluan, seperti pembangkit listrik, pemanasan, dan bahan bakar.

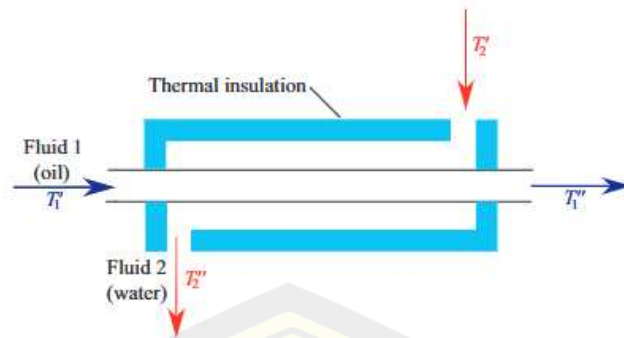
### 2.2.3 Solar Thermal Collector

*Solar thermal collector* adalah perangkat yang berfungsi menangkap dan mengubah energi radiasi matahari menjadi energi panas melalui proses penyerapan oleh permukaan penyerap (*absorber*) yang berwarna gelap. Menurut (Krishna et al., 2020) air memiliki konduktivitas termal yang lebih baik (0.677 W/mK) dibandingkan

minyak ( $0.17 \text{ W/mK}$ ), sehingga proses penyerapan panas dari dinding pipa ke fluida berjalan lebih cepat dan efisien. Selain mempertimbangkan keunggulan sifat termofisik air, menurut (Zaphar et al., 2023) analisis termal pada *Evacuated Tube Collector* (ETC), penetapan temperatur *input* sebesar  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  yang menunjukkan bahwa jenis kolektor ini memiliki efisiensi tinggi dalam menyerap dan mentransfer panas di bawah berbagai kondisi operasional. Pada penelitian (Hosouli et al., 2024) variasi kecepatan aliran masuk ditetapkan pada  $0,5 \text{ m/s}$  dan  $1 \text{ m/s}$  yang menekankan pentingnya laju aliran fluida untuk mengoptimalkan kinerja termal sistem. Variasi ini diterapkan untuk menganalisis dampak kondisi aliran terhadap distribusi suhu dinding penukar panas.

#### 2.2.4 Heat Exchanger

*Heat exchanger* adalah perangkat yang digunakan untuk mentransfer panas antara dua fluida yang memiliki suhu berbeda tanpa mencampurkan kedua fluida tersebut. Proses perpindahan panas ini terjadi melalui dinding pemisah yang memisahkan kedua fluida, sehingga memungkinkan perpindahan energi panas secara efisien. Efisiensi perpindahan panas sangat dipengaruhi oleh desain *heat exchanger*, kondisi aliran fluida, serta sifat termofisik fluida yang digunakan. Pemodelan *heat exchanger* dalam penelitian yang dilakukan oleh (Thavamani et al., 2017) menerapkan inovasi geometri berupa penggunaan pipa berbentuk serpentin. Konfigurasi ini dipilih untuk menggantikan rancangan pipa lurus pada desain terdahulu, guna memperpanjang durasi waktu kontak (*residence time*) fluida di dalam sistem. Untuk menentukan efisiensi dan parameter operasi *heat exchanger*, dengan skema *counter flow heat exchanger* disajikan pada gambar 2.3. Kemudian, dilakukan perhitungan termal yang melibatkan suhu akhir fluida dan koefisien perpindahan panas rata – rata yang ditunjukkan pada rumus persamaan 2.2. (Kurmanova et al., 2023)



Gambar 2. 3 *Scheme of Counter Flow Heat Exchanger*  
(Sumber : Kurmanova et al., 2023)

$$Q = \bar{k}F\Delta\bar{T} \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan :

$Q$  = Jumlah panas yang dipindahkan antara dua fluida (J/s)

$\bar{k}$  = Koefisien perpindahan panas rata – rata fluida ( $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ )

$F$  = Luas permukaan perpindahan panas ( $\text{m}^2$ )

$\Delta\bar{T}$  = Perbedaan suhu rata – rata antara kedua fluida (K)

### 2.3 Perpindahan Panas

Perpindahan panas (*Heat Transfer*) mempelajari dan memprediksi aliran energi yang terjadi akibat perbedaan suhu antara dua benda atau bahan. Energi yang berpindah dalam proses ini adalah panas (kalor), yang secara alami bergerak dari daerah bersuhu lebih tinggi ke daerah bersuhu lebih rendah. Prinsip pencampuran kalor dapat terjadi karena adanya aliran kalor, sementara dalam kalorimeter, perpindahan kalor tidak hanya menyebabkan perubahan suhu suatu zat, tetapi juga menyebarkan panas kebagian lain dalam sistem (Fatiatun et al., 2022).

Perpindahan panas berperan penting dalam proses pendinginan, pemanasan, maupun konversi energi. Perilaku perpindahan panas secara menyeluruh, diperlukan analisis terhadap kondisi waktu proses tersebut berlangsung. Dalam beberapa kasus, suhu dan fluks panas tidak berubah terhadap waktu, sedangkan pada kasus lain,

keduanya berubah secara dinamis. Kondisi utama perpindahan panas, yaitu keadaan tunak (*steady state*) dan tak tunak (*unsteady state* atau *transien*) (Hwang et al., 2016).

### 2.3.1 *Steady State*

Menurut (Braga, 2015) perpindahan panas *steady* adalah kondisi di mana suhu dan laju transfer panas tetap konstan dari waktu ke waktu, biasanya terjadi dalam sistem yang mencapai keadaan seimbang atau stabil secara termal, seperti pada kolektor surya saat kondisi cuaca tetap dan tidak berubah secara signifikan. Pada kondisi ini, analisis perpindahan panas dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan konduksi, konveksi, dan radiasi yang bersifat statis, serta memperhitungkan parameter tetap seperti suhu inlet dan outlet, efisiensi kolektor, dan kehilangan panas yang konstan ditunjukkan dengan persamaan 2.3.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots (2.3)$$

### 2.3.2 *Unsteady State*

Menurut (Braga, 2015) perpindahan panas *unsteady* terjadi ketika suhu dan laju transfer panas berubah seiring waktu, yang biasanya terjadi selama proses awal pemanasan, pengisian, atau saat kondisi lingkungan berubah – ubah, sehingga memerlukan pendekatan analisis yang melibatkan perubahan energi dan suhu secara waktu-variabel, seperti melalui persamaan diferensial yang menggambarkan perubahan suhu dan energi dalam sistem secara *transient*, sehingga rumus ditunjukkan pada persamaan 2.4 :

$$\frac{\partial T}{\partial t} \neq 0 \dots\dots\dots (2.4)$$

## 2.4 Mekanisme Perpindahan Panas

### 2.4.1 *Conjugate Heat Transfer* (CHT)

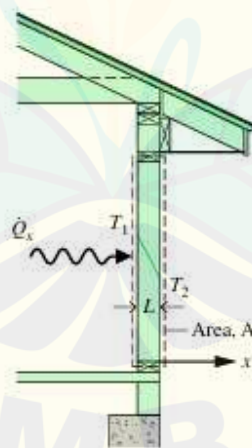
*Conjugate heat transfer* adalah perpindahan panas yang menggabungkan perpindahan panas konduksi di dalam benda padat dengan perpindahan panas konveksi di fluida yang mengalir di sekitarnya, sehingga kedua domain tersebut harus

diselesaikan secara bersamaan dan saling berkorelasi (*conjugated*). Perpindahan panas dalam konteks *conjugate heat transfer* (CHT) melibatkan interaksi antara perpindahan panas di dalam suatu benda padat dan perpindahan panas di fluida yang mengalir di sekitarnya. (Dorfman, 2009)

Sehingga *conjugate heat transfer* merupakan pendekatan yang mengintegrasikan perpindahan panas dengan dua media berbeda padat dan fluida secara simultan untuk mendapatkan solusi yang lebih akurat dan realistis dibandingkan jika kedua perpindahan panas tersebut dianalisis secara terpisah. Analisis dapat dilanjutkan pada mekanisme fisis perubahan panas itu sendiri. Terdapat tiga mekanisme utama yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi, yang sering kali terjadi secara bersamaan dalam sistem termal.

#### 2.4.2 Konduksi

Transfer energi melalui konduksi dapat terjadi pada padat, cairan, dan gas. Konduksi dapat dianggap sebagai transfer energi dari partikel – partikel suatu zat yang lebih energik ke partikel – partikel di sekitarnya yang kurang energik akibat interaksi antar partikel. Menurut (Moran et al., 2006) laju waktu transfer energi melalui konduksi diukur secara makroskopik menggunakan *Fourier's Law* yang ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2. 4 *Illustration of Fourier's conduction law*  
(Sumber : Moran et al., 2006)

Sebagai aplikasi dasar, pada Gambar 2.4 yang menunjukkan dinding datar dengan ketebalan  $L$  dalam *steady state*, dimana temperatur  $T(x)$  bervariasi secara linear dengan posisi  $x$ . Menurut hukum *Fourier*, laju perpindahan panas melintasi bidang apapun yang tegak lurus terhadap arah  $x$ ,  $\dot{Q}_x$  sebanding dengan luas dinding,  $A$ , dan gradien suhu dalam arah  $x$ ,  $dT/dx$  hal ini sesuai dengan persamaan (2.1).

#### 2.4.3 Konveksi

Menurut (Moran et al., 2006) transfer energi antara permukaan padat pada suhu  $T_b$  dan gas atau cairan yang bergerak berdekatan pada suhu lain  $T_f$  mempunyai peran penting dalam kinerja banyak perangkat yang memiliki kepentingan praktis. Hal ini umumnya disebut sebagai konveksi. Konveksi tidak hanya dipengaruhi oleh perbedaan suhu, tetapi juga oleh karakteristik aliran fluida. Untuk memudahkan evaluasi fenomena ini, digunakan bilangan Nusselt sebagai parameter utama yang menggambarkan intensitas perpindahan panas akibat konveksi, rumus bilangan Nusselt ditunjukkan pada persamaan 2.6.

$$Nu = \frac{L h}{k} \dots\dots\dots (2.6)$$

Keterangan :

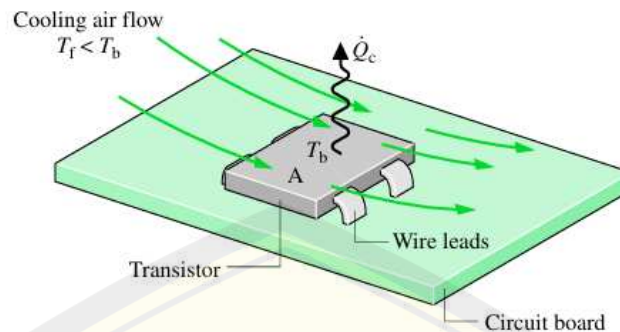
$h$  = Koefisien perpindahan panas konveksi ( $W/m^2 \cdot K$ )

$L$  = Panjang karakteristik (m)

$k$  = Konduktivitas termal fluida ( $W/m \cdot K$ )

Sebagai ilustrasi, perhatikan gambar 2.5, di mana  $T_b > T_f$ . Dalam kasus ini, energi ditransfer dalam arah yang ditunjukkan oleh panah akibat efek gabungan konduksi di dalam udara dan gerakan massa udara. Pada persamaan 2.7 disajikan rumus laju transfer energi dari permukaan ke udara dapat dihitung dengan menggunakan persamaan empiris sebagai berikut :

$$\dot{Q}_c = hA (T_f - T_b) \dots\dots\dots (2.7)$$



Gambar 2. 5 *Illustration of Newton's law of cooling.*  
(Sumber : Moran et al., 2006)

Keterangan :

- $\dot{Q}_c$  = Laju perpindahan panas (W)
- $h$  = Koefisien Perpindahan panas
- $A$  = Luas permukaan plat ( $m^2$ )
- $T_b$  = Suhu absolut permukaan benda
- $T_f$  = Suhu absolut lingkungan sekitar

Koefisien perpindahan panas bukanlah sifat termodinamika. Hal ini adalah parameter empiris yang memasukkan ke dalam hubungan perpindahan panas sifat pola aliran didekat permukaan, sifat fluida, dan geometri. Ketika kipas atau pompa menyebabkan fluida bergerak, nilai koefisien perpindahan panas umumnya lebih besar daripada ketika terjadi gerakan lambat yang disebabkan oleh buoyansi. Dua kategori umum ini disebut konveksi paksa dan bebas (alami). Tabel 2.2 memberikan nilai tipikal dari koefisien perpindahan panas konveksi untuk konveksi paksa dan bebas. (Moran et al., 2006).

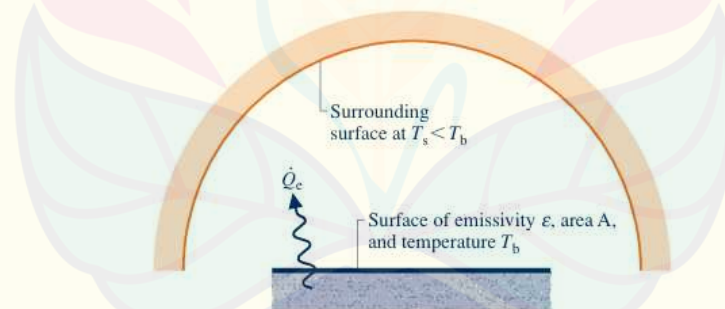
Tabel 2. 2 Typical Values of the Convection Heat Transfer Coefficient

| Applications             | H (W/m <sup>2</sup> .K) | h (Btu/h . ft <sup>2</sup> . °R) |
|--------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| <i>Free Convection</i>   |                         |                                  |
| <i>Gases</i>             | 2 – 25                  | 0,35 – 4,4                       |
| <i>Liquid</i>            | 50 – 100                | 8,8 – 180                        |
| <i>Forced Convection</i> |                         |                                  |
| <i>Gases</i>             | 25 – 250                | 4,4 – 44                         |
| <i>Liquids</i>           | 50 – 20.000             | 8,8 – 3500                       |

(Sumber : Moran et al., 2006)

### 2.4.3 Radiasi

Dalam buku (Moran et al., 2006) radiasi termal dipancarkan oleh materi sebagai akibat dari perubahan konfigurasi elektronik dari atom atau molekul di dalamnya. Energi ini dibawa oleh gelombang elektromagnetik (foton). Tidak seperti konduksi, radiasi termal tidak memerlukan medium perantara untuk merambat. Permukaan padat, gas, dan cairan memancarkan, menyerap, dan mentransmisikan radiasi termal dalam derajat yang berbeda – beda.



Gambar 2. 6 Net radiation exchange (Sumber : (Moran et al., 2006)

$$\dot{Q}_e = \epsilon\sigma AT_b^4 \dots\dots\dots (2.8)$$

Secara umum, laju perpindahan energi melalui radiasi termal antara dua permukaan melibatkan hubungan antara sifat-sifat permukaan. Kasus khusus yang sering terjadi adalah pertukaran radiasi antara sebuah permukaan dengan suhu  $T_b$  dan permukaan sekitarnya yang jauh lebih besar dengan suhu  $T_s$ , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6. Pada persamaan 2.8 disajikan rumus radiasi yang dipancarkan oleh permukaan saja, sedangkan persamaan 2.9 adalah rumus radiasi dengan Kondisi lingkungan juga diperhitungkan. Laju pertukaran radiasi antara permukaan yang lebih kecil, dengan luas  $A$  dan emisivitas  $\varepsilon$ , dan lingkungan yang lebih besar adalah :

$$\dot{Q}_e = \varepsilon \sigma A [T_b^4 - T_s^4] \dots \dots \dots (2.9)$$

Keterangan :

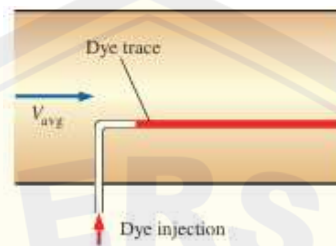
- $\dot{Q}_e$  = Laju perpindahan panas radiasi (W)
- $\varepsilon$  = Emisivitas permukaan
- $\sigma$  = Konstanta Stefan – Boltzmann ( $W/m^2 \cdot K^4$ )
- $A$  = Luas permukaan ( $m^2$ )
- $T_b$  = Suhu absolut permukaan benda
- $T_s$  = Suhu absolut lingkungan sekitar

### **2.5 Properties of Fluids**

Menurut buku (Çengel, 2020) suatu zat dalam fase cair atau gas disebut sebagai fluida. Pada tahap ini bilangan Reynolds menjadi sangat penting, karena bilangan tak berdimensi ini digunakan untuk mengidentifikasi apakah aliran bersifat laminar, transisi, atau turbulen, pada tabel 2.3 disajikan nilai bilangan Reynold untuk menentukan aliran pada fluida, dan rumus bilangan Reynold ditunjukkan pada persamaan 2.10. Transisi dari aliran laminar ke turbulen bergantung pada tingkat gangguan aliran oleh kekasaran permukaan, getaran pipa, dan fluktuasi pada aliran.

### 2.5.1 Laminar

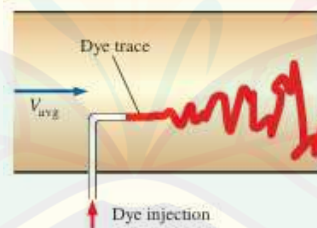
Perhatikan gambar 2.7 disajikan aliran laminar adalah kondisi ketika fluida mengalir secara teratur, halus, dan membentuk lapisan-lapisan yang bergerak sejajar tanpa saling bercampur secara *intens*. Pada regime ini, gaya viskositas mendominasi sehingga gerakan partikel fluida cenderung stabil dan dapat diprediksi.



Gambar 2. 7 *Laminar Flow* (Sumber : Çengel, 2020)

### 2.5.2 Turbulen

Pada gambar 2.8 adalah ilustrasi aliran turbulen yang ditandai oleh gerakan fluida yang kacau (*chaotic*), fluktuatif, dan tidak beraturan. Pada aliran turbulen, terjadi pencampuran momentum yang intens sehingga distribusi kecepatan, tekanan, dan energi menjadi lebih kompleks.



Gambar 2. 8 *Turbulen Flow* (Sumber : Çengel, 2020)

Tabel 2. 3 Nilai *Reynolds Number* pada Setiap Aliran

| Aliran         | Nilai (Re)      |
|----------------|-----------------|
| <i>Laminar</i> | $\lesssim 2300$ |

|                 |                 |
|-----------------|-----------------|
| <i>Transisi</i> | $\lesssim 4000$ |
| <i>Turbulen</i> | $\gtrsim 4000$  |

(Sumber : Çengel, 2020)

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{v L}{\nu} \dots\dots\dots(2.10)$$

Pada rumus persamaan 2.10,  $\nu$  adalah viskositas. Viskositas merupakan ukuran tingkat kekentalan atau hambatan internal suatu fluida ketika fluida tersebut mengalir.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \dots\dots\dots(2.11)$$

Keterangan :

$\rho$  = Massa jenis (densitas) fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$\nu$  = Kecepatan aliran fluida ( $\text{m/s}$ )

$L$  = Panjang karakteristik (*characteristic length*) ( $\text{m}$ )

$\mu$  = Viskositas dinamik fluida (*dynamic viscosity*) ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

## 2.6 Permodelan *Computational Fluid Dynamic* (CFD)

### 2.6.1 *Discretization of the Computational Domain*

#### a. Domain

Domain komputasi dibagi menjadi dua subdomain, yakni meliputi subdomain fluida dan subdomain padat. Subdomain fluida yang mengalami sirkulasi alami yang didorong oleh gaya apung akibat gradien suhu. Subdomain padat sesuai dengan dinding dan elemen pemanas.

#### b. *Boundary Condition*

Kondisi batas (*boundary condition*) merupakan sekumpulan nilai atau batasan fungsional yang ditetapkan pada seluruh permukaan pada domain komputasi. Kondisi batas berfungsi untuk memberikan solusi spesifik terhadap persamaan diferensial parsial yang mengatur aliran fluida.

### 2.6.2 Meshing

Proses meshing dilakukan untuk membagi domain simulasi menjadi elemen – elemen kecil, sehingga analisis aliran fluida dapat dilakukan dengan akurasi yang tinggi. Pada area kritis, dilakukan refinement mesh untuk meningkatkan akurasi prediksi aliran dan gaya angkat (*lift*) maupun gaya dorong (*thrust*) (Lintermann, 2021).

### 2.6.4 Time Step Size

*Time Step Size* digunakan apabila analisis dilakukan secara *transient* atau tidak tunak. *Computational Fluid Dynamic* (CFD) memungkinkan pengguna mengatur *time increment* dan jumlah langkah simulasi berdasarkan kestabilan numerik maupun fenomena yang ingin ditangkap. Pendekatan simulasi transien dengan skala waktu menit telah digunakan pada sistem *Solar thermal*, penelitian (Mendoza Orbegoso et al., 2025) menetapkan waktu simulasi fisik sebesar 600s untuk menangkap respons *termofluid* alami akibat efek *thermosiphon*, dengan diskretisasi waktu yang memastikan stabilitas numerik dan representasi dinamika termal yang akurat.

### 2.6.5 Model Turbulensi

Model turbulensi *Shear Stress Transport* (SST)  $k - \omega$  merupakan salah satu model turbulensi paling banyak digunakan pada simulasi CFD karena memiliki kemampuan prediksi yang baik terhadap aliran yang melibatkan boundary layer, pemisahan aliran (*flow separation*), dan gradien tekanan tinggi (Hajdukiewicz et al., 2024).

## 2.7 Hipotesis

1. Jika kecepatan fluida berada pada kondisi 0 m/s (fluida air tidak mengalir) dan tidak ada *input heat* dari *Solar thermal collector*, maka perpindahan panas di dalam *boiler* hanya didominasi oleh panas *input* dari biogas, sehingga laju perpindahan panas menjadi jauh lebih lambat. Akibatnya, waktu yang diperlukan fluida air untuk mencapai kenaikan suhu signifikan menjadi lebih lama.

2. Variasi *velocity* memengaruhi dinamika perpindahan panas di dalam *boiler*. Pada *velocity* rendah (0,5 m/s), laju aliran fluida air lebih lama terhadap waktu sehingga temperatur fluida air dapat mencapai kondisi *steady state* lebih lama karena waktu penyerapan panas lebih lambat.
3. Pada *velocity* tinggi (1 m/s), adanya peningkatan laju respon perpindahan panas transien menjadi lebih cepat terhadap waktu, sehingga temperatur fluida air dapat mencapai kondisi *steady state* lebih cepat karena waktu penyerapan panas lebih singkat.



### BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Komputer Ryzen 7 5700X RAM 8GB NVIDIA RTX 3060
2. Software Autodesk Fusion 360 2024
3. Software Autodesk CFD 2024

#### 3.2 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Variabel Bebas

Pada penelitian ini variabel bebas yang digunakan disajikan pada Tabel 3.1 yakni sebagai berikut :

Tabel 3. 1 Data Variabel Bebas

| Total Time Step Size (s)                      | 600                                       |   |
|---|---|---|
| <i>Velocity Solar Thermal Collector (m/s)</i> | <i>Input Solar Thermal Collector (°C)</i> | <i>Input Flux Thermal Biogas (W /m<sup>2</sup>)</i> |
| 0,5   | 90  | 400   |
|   | 90  | -   |
| 1   | 90  | 400   |
|   | 90  | -   |
| 0   | -   | 400   |

2. Variabel Terikat

Adapun variabel terikat merupakan variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas yakni sebagai berikut :

- a. Distribusi Temperatur

b. *Dynamic Thermal Performance*

3. Variabel Kontrol

Variabel kontrol pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

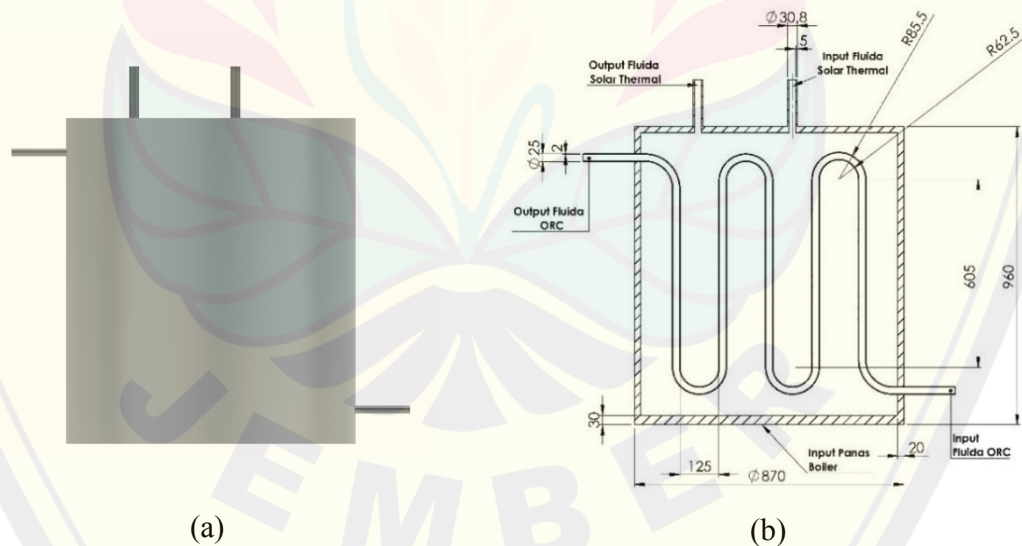
- a. Menggunakan *automatic* meshing
- b. *Residual check*  $10^{-5}$
- c. Fluida *Solar thermal collector* menggunakan air
- d. *Setting pressure gage* pada *outlet Solar thermal collector* 0 bar
- e. Fluida ORC menggunakan *amonia* pada *liquid phase default* dengan densitas  $611,75 \text{ kg/m}^3$ , *input suhu*  $-5 \text{ }^\circ\text{C}$  dan *velocity*  $0,5 \text{ m/s}$
- f. Boundary condition menggunakan simetric analysis

### 3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dilakukan guna merancang dan mensimulasikan *boiler* meliputi:

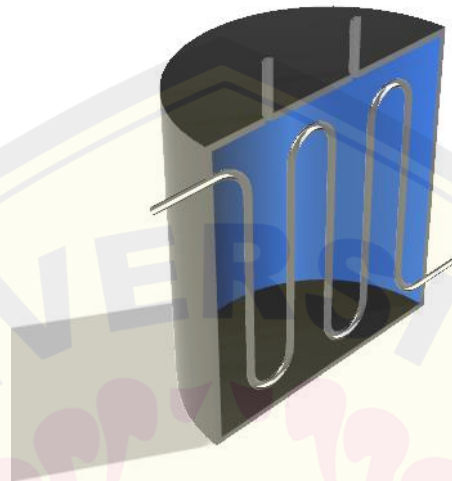
#### 3.3.1 Pre – Processing

- a. Design 3D model dibuat menggunakan Autodesk Fusion 360 yang disajikan pada gambar 3.1.



Gambar 3. 1 (a) Design 3D model boiler (b) Detail Geometri Boiler

- b. *Design 3D model* yang telah dirancang, dimodifikasi dengan membagi geometri menjadi dua bagian (*slice – half design*). Hal ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi komputasi dan mempercepat waktu iterasi tanpa mengurangi akurasi hasil simulasi.



Gambar 3. 2 Model slice half design

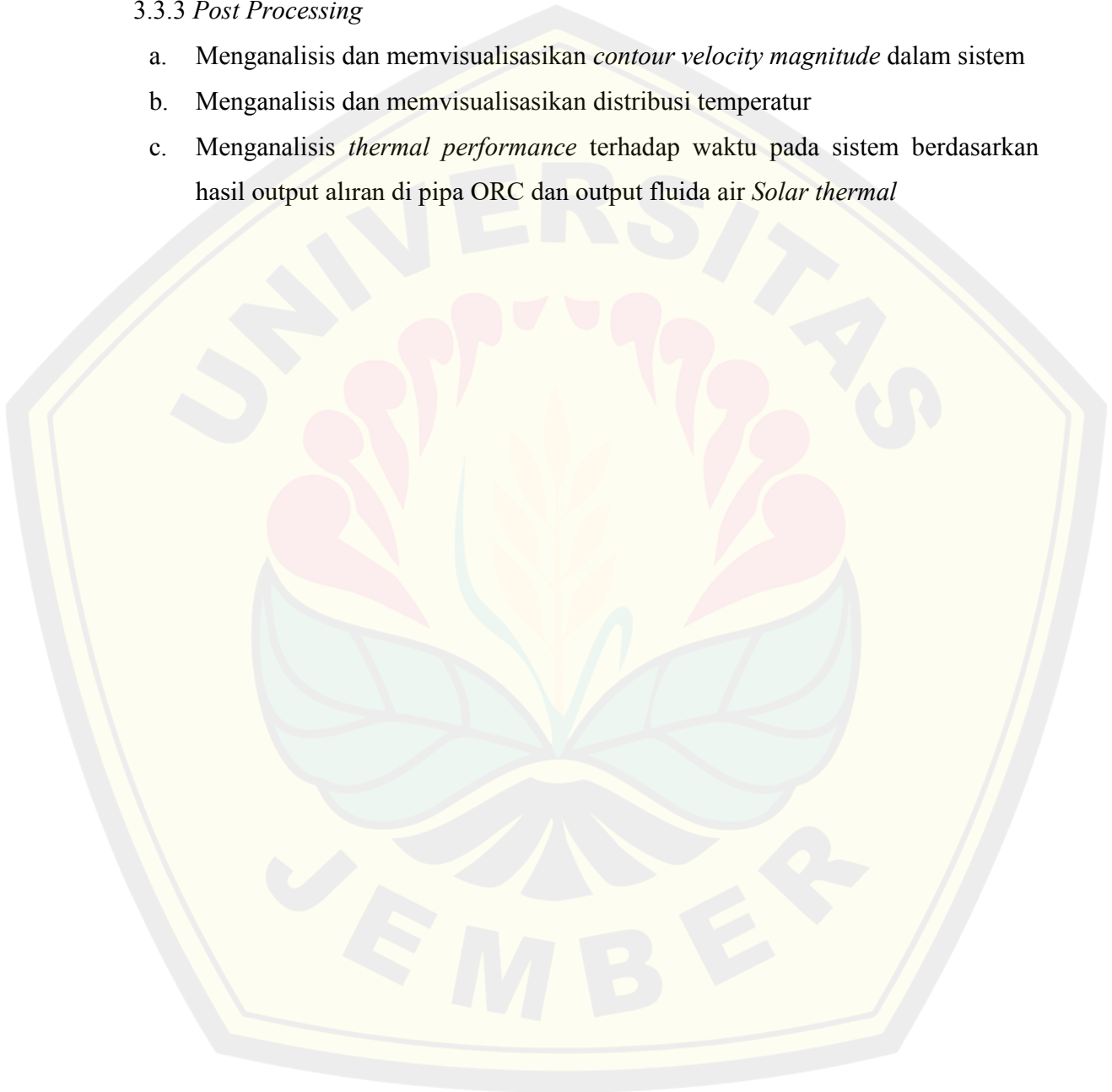
### 3.3.2 Processing

- Menetapkan properti fluida kerja, pada *Solar thermal* menggunakan air dan *Organic Rankine Cycle* (ORC) menggunakan amonia.
- Mengatur spesifikasi material komponen, yaitu *stainless steel* untuk dinding *heat exchanger* dan *copper* untuk pipa ORC.
- Mengaplikasikan *boundary condition* yang meliputi kecepatan masuk (*inlet velocity*) dan temperatur pada sisi *Solar thermal* maupun ORC, serta memberikan beban panas berupa *heat flux* pada dinding pemanas *boiler*.
- Mengatur sisi simetri (*slip/symmetry*) pada bidang potong model untuk simulasi geometri setengah bagian (*slice half model*)
- Menetapkan model turbulensi dengan menggunakan SST  $k - \omega$
- Mengatur residual iterasi ke  $10^{-5}$  untuk memastikan presisi solusi numerik.

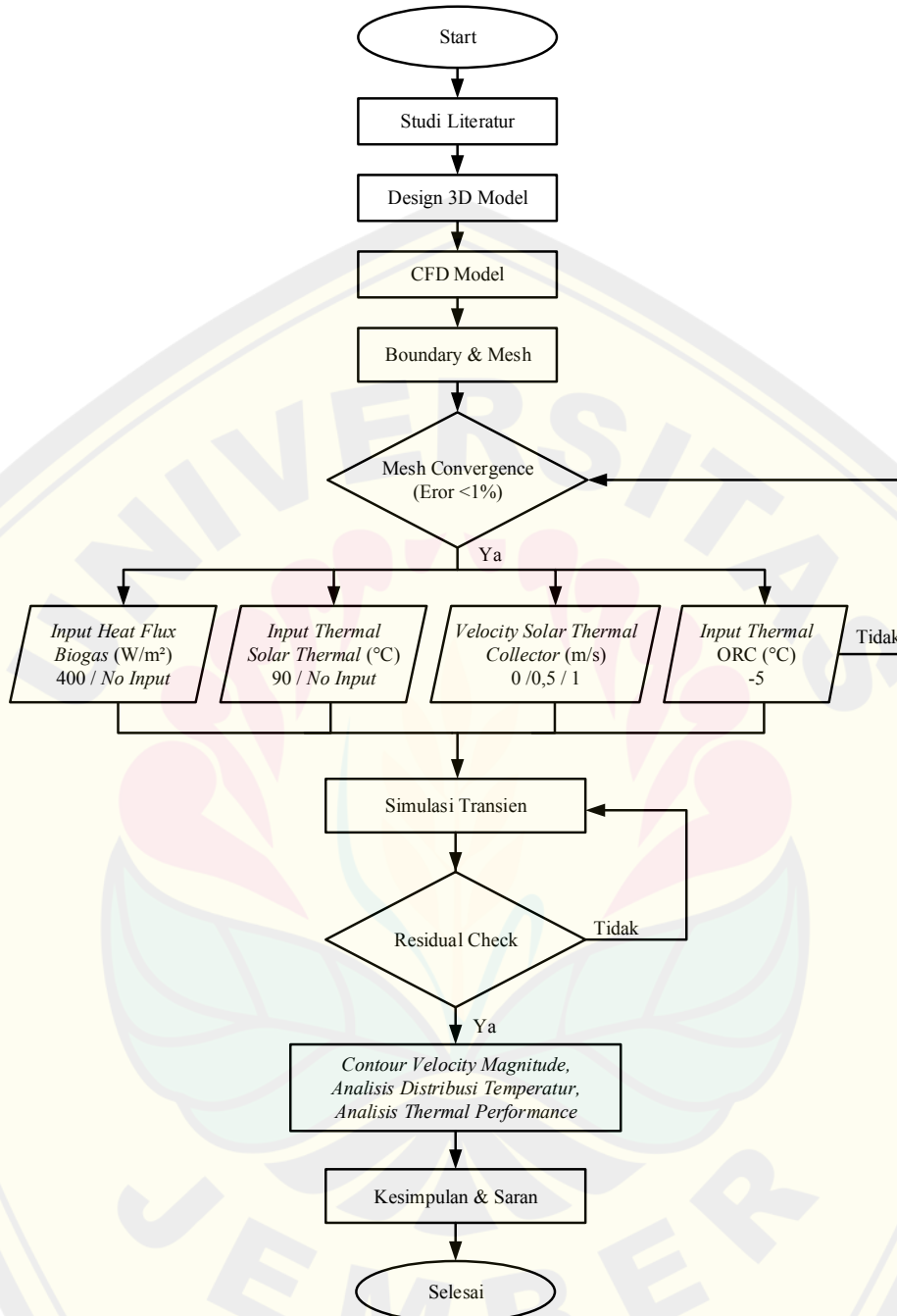
- g. Melakukan *mesh convergence* dan *residual check* hingga *mesh independence* serta grafik residual stabil untuk memastikan keakuratan.
- h. Mengkonfigurasi parameter simulasi *transient*, yaitu menetapkan total durasi simulasi selama 600 s dan ukuran langkah waktu (*time step size*) sebesar 10 s untuk menangkap respon termal sistem secara presisi.

### 3.3.3 Post Processing

- a. Menganalisis dan memvisualisasikan *contour velocity magnitude* dalam sistem
- b. Menganalisis dan memvisualisasikan distribusi temperatur
- c. Menganalisis *thermal performance* terhadap waktu pada sistem berdasarkan hasil output aliran di pipa ORC dan output fluida air *Solar thermal*



3.4 Diagram Alir



## BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

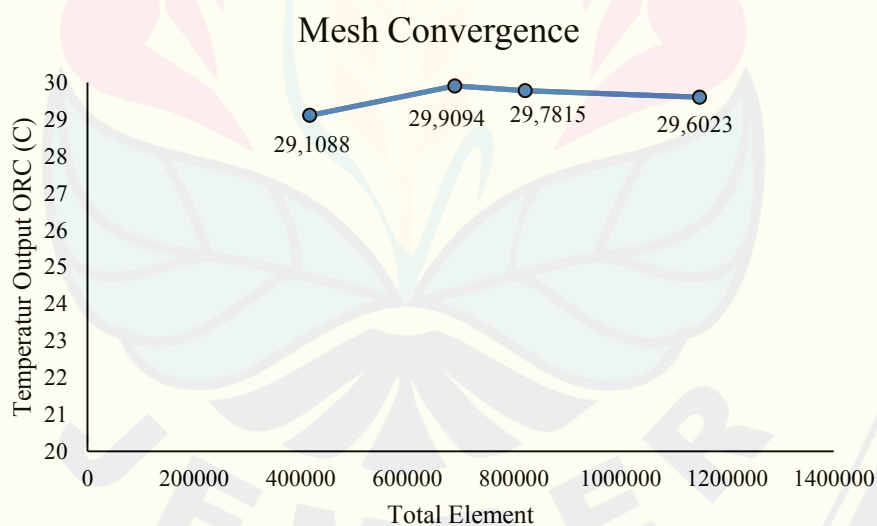
### 4.1 Hasil Validasi Simulasi

#### 4.1.1 Mesh Convergence

*Mesh Convergence* dilakukan dengan membandingkan parameter temperatur *outlet* dengan beberapa tingkat kerapatan *mesh* yang berbeda. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa hasil simulasi yang diperoleh bersifat *independent*, yang artinya hasil parameter yang diuji tidak lagi mengalami perubahan yang signifikan.

Tabel 4. 1 Data *Mesh Convergence*

| <i>Mesh Volume Adjustment</i> | Total Elemen | Temperatur <i>Output</i> ORC (°C) | %Eror  |
|-------------------------------|--------------|-----------------------------------|--------|
| 1                             | 416.952      | 29,1088                           | 2,7503 |
| 0,75                          | 689.360      | 29,9094                           | 2,6767 |
| 0,65                          | 821.296      | 29,7815                           | 0,4294 |
| 0,59                          | 1.148.511    | 29,6023                           | 0,6053 |



Gambar 4. 1 Grafik *Mesh Convergence*

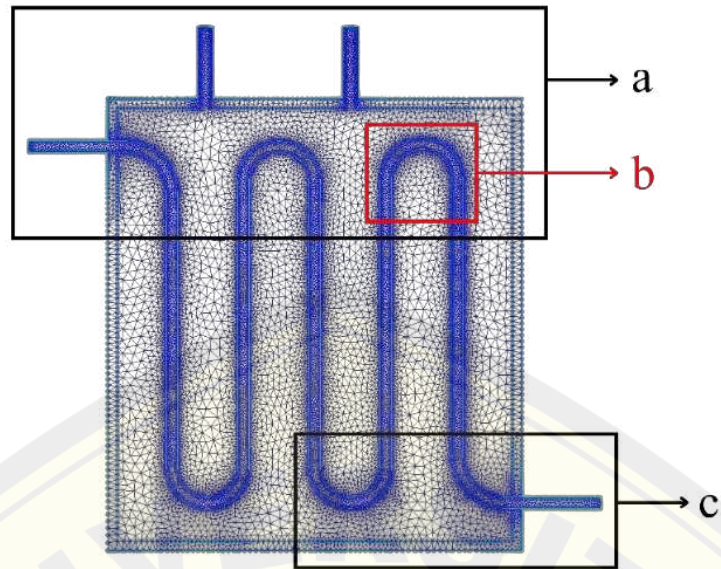
Indikator kestabilan yang dipantau adalah temperatur *outlet fluida* kerja pada sistem ORC. Hasil simulasi menunjukkan perubahan temperatur terhadap jumlah elemen grid yang ditunjukkan pada tabel 4.1 dan gambar 4.1. Validasi numerik diawali dengan melakukan uji *independensi grid*. Independensi grid dinyatakan tercapai ketika deviasi parameter *output* utama antara dua variasi kepadatan mesh bernilai sangat kecil. Uji konvergensi dilakukan dengan memvariasikan jumlah elemen mesh dalam rentang 400.000 hingga 1.200.000 elemen.

Pada peningkatan jumlah elemen dari 400.000 ke 689.360, terjadi perubahan temperatur yang cukup signifikan dari 29,10°C menjadi 29,91°C. Hal ini mengindikasikan bahwa pada tahap awal, resolusi mesh belum cukup untuk menangkap fenomena perpindahan panas secara akurat. Saat kepadatan mesh ditingkatkan lebih lanjut dari 689.360 elemen menjadi 821.296 elemen, temperatur yang dihasilkan berubah dari 29,9094°C menjadi 29,7815°C. Grafik menunjukkan pola yang mulai mendatar pada fase ini.

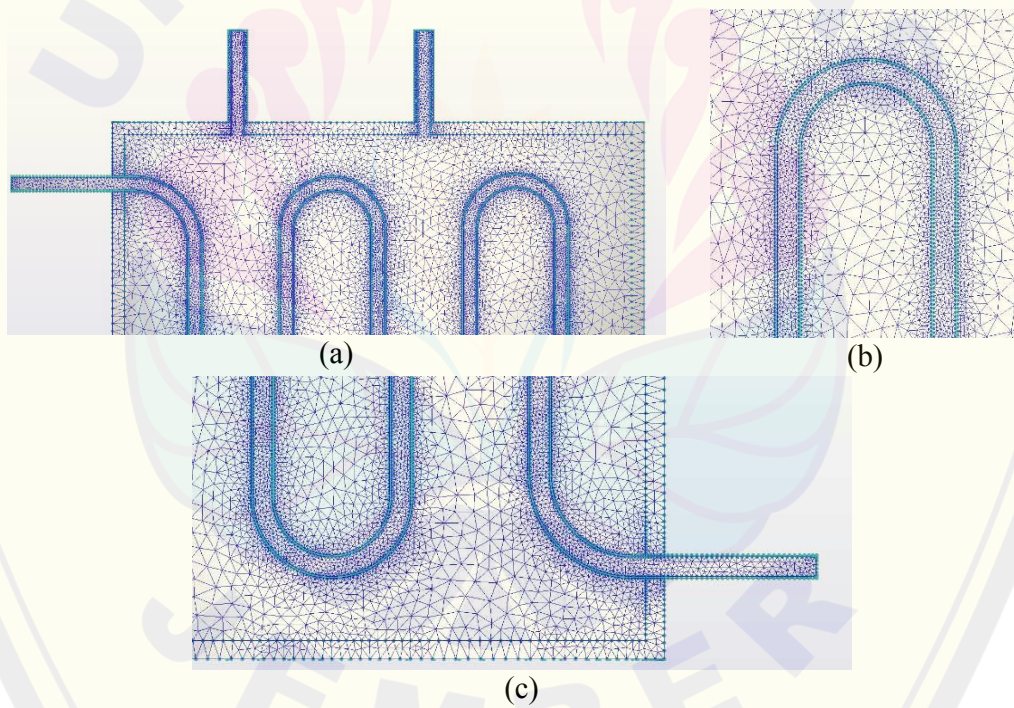
Prosedur ini mengacu pada metodologi validasi yang diterapkan oleh (Khoshvaght-aliabadi et al., 2022), yang menetapkan bahwa kondisi *grid independent* tercapai ketika persentase eror atau deviasi antara dua variasi mesh bernilai sangat kecil, secara spesifik sebesar <1%. Oleh karena itu, ukuran mesh 0,65 mm dipilih sebagai titik optimum dengan persentase perbandingan eror 0,429% terhadap ukuran mesh 0,59 mm. Pemilihan ini didasarkan pada pertimbangan efisiensi, dimana mesh 0,65 mm mampu menghasilkan data yang sudah *independent* (stabil) tanpa membebani sumber daya komputasi dengan waktu *running* yang berlebihan seperti yang terjadi pada mesh 0,59 mm.

#### 4.1.2 Detail Meshing

Berdasarkan hasil uji *mesh convergence* diperoleh *mesh independent* yang telah dipaparkan sebelumnya, konfigurasi mesh dengan ukuran 0,65 mm ditetapkan sebagai model referensi untuk simulasi dalam penelitian ini dengan hasil mesh yang disajikan pada gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Hasil Mesh 0,65 mm

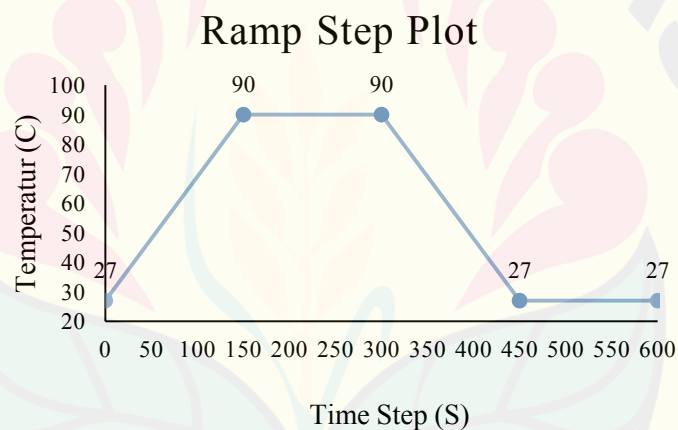


Gambar 4. 3 Detail Meshing, (a) Detail Mesh di Bagian Atas Sistem, (b) Mesh Di U turn Pipa ORC , (c) Mesh di sekitar Inlet ORC

Gambar 4.3 memperlihatkan bentuk detail dari susunan mesh yang digunakan, yaitu ukuran 0,65 mm. Jenis elemen yang digunakan pada model ini berbentuk *tetrahedral*, yang mampu beradaptasi dengan geometri lengkung pada sistem perpipaan ORC. Hal yang paling penting terlihat pada gambar potongan (b) dan (c), pada gambar tersebut terlihat bahwa lapisan elemen yang tersusun rapat dan halus di area dekat dinding, berfungsi untuk menangkap fenomena lapisan batas (*boundary layer*) serta gradien termal antara dinding pipa dan fluida kerja, sehingga perhitungan simulasi bisa berjalan lebih stabil.

#### 4.1.3 Skenario Pembebanan *Thermal*

Simulasi ini menggunakan skenario pembebanan siklus termal (*thermal cycling*) dengan total durasi 600 detik. Fungsi yang digunakan adalah *Ramp Step*, dimana temperatur berubah secara linear terhadap waktu dengan rincian empat fase sebagai berikut :



Gambar 4. 4 *Ramp Step Plot*

##### 1. Fase Pemanasan (*Ramp-Up*): 0 – 150s

Simulasi dimulai dari kondisi temperatur awal 27 °C. Temperatur kemudian naik secara linear hingga mencapai suhu puncak 90 °C pada detik ke 0 – 150s. Fase ini mensimulasikan inersia termal saat kolektor mulai menerima panas matahari dan memanaskan fluida.

2. Fase Stabil (*Steady State/Holding*): 150 – 300s

Pada rentang waktu ini, temperatur dipertahankan konstan pada nilai maksimum 90 °C. Hal ini merepresentasikan kondisi operasi stabil ketika *solar thermal* menerima radiasi matahari secara penuh dan konsisten.

3. Fase Pendinginan (*Ramp-Down*): 300 – 450s

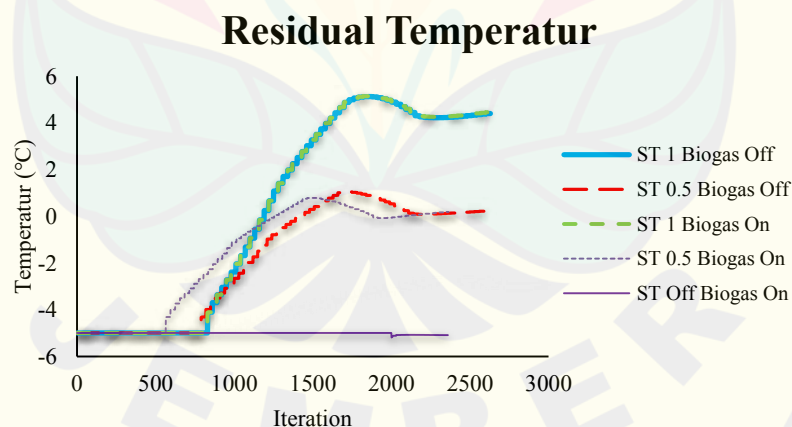
Mulai detik ke – 300, temperatur *input* diturunkan secara linear kembali ke nilai dasar 27 °C hingga pada detik ke – 450. Fase ini mensimulasikan penurunan suplai panas secara perlahan, misalnya saat cuaca mulai mendung atau intensitas matahari menurun drastis.

4. Fase (*Low Steady*): 450 – 600s

Dari detik ke – 450 hingga akhir simulasi pada detik ke – 600, temperatur dijaga konstan pada suhu 27 °C. Hal ini menunjukkan kondisi dimana tidak ada lagi suplai panas yang signifikan masuk ke dalam sistem.

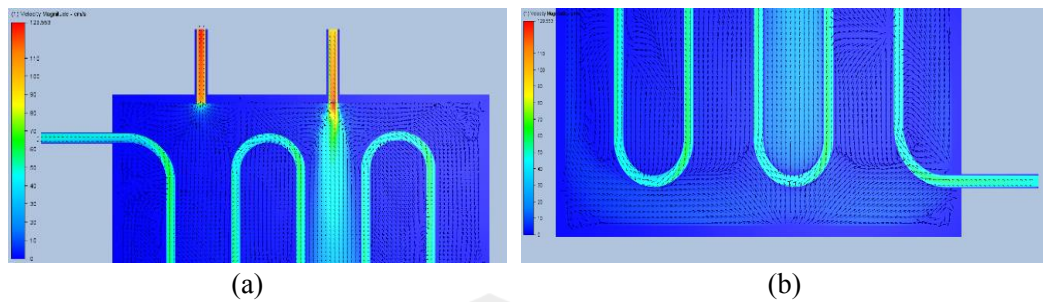
#### 4.1.4 Residual

Kriteria konvergensi digunakan untuk memvalidasi keakuratan solusi numerik, pada simulasi ini diatur dengan target residual yang ketat, yaitu mencapai angka  $10^{-5}$ . Selain memantau nilai residual, verifikasi tambahan dilakukan dengan mengamati stabilitas nilai temperatur selama proses iterasi berlangsung.

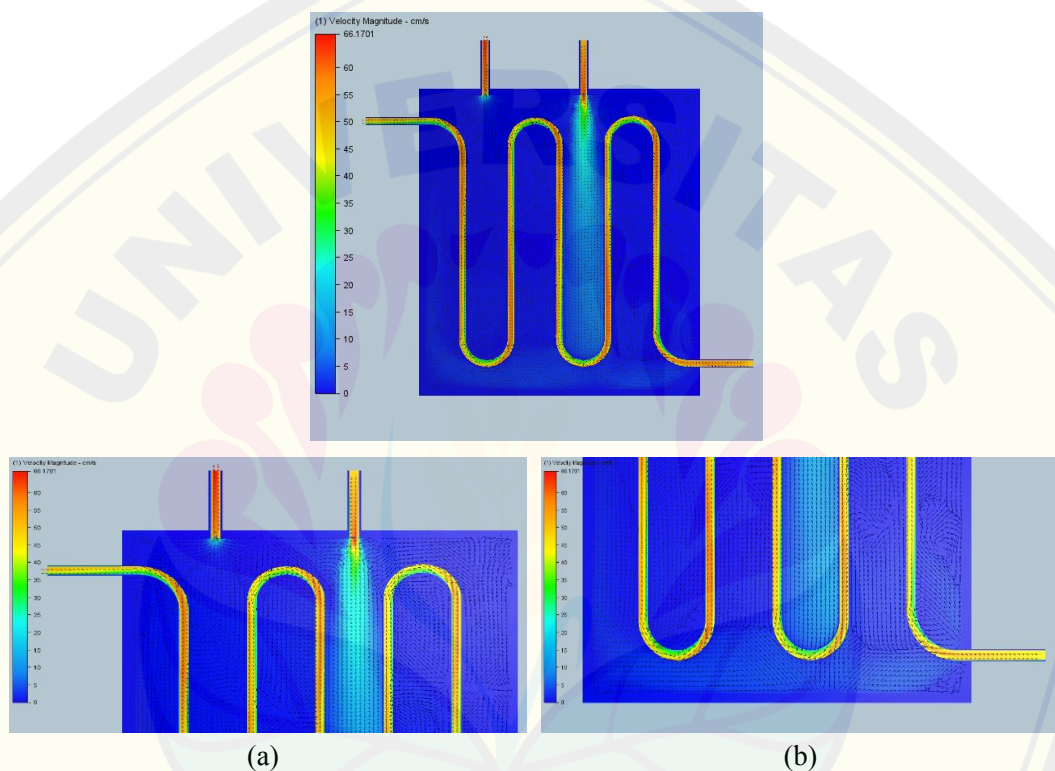


Gambar 4. 5 Grafik Residual Temperatur





Gambar 4. 6 *Vector Velocity 1 Variasi Solar Thermal On Biogas On (a) Top Position (b) Bottom Position*



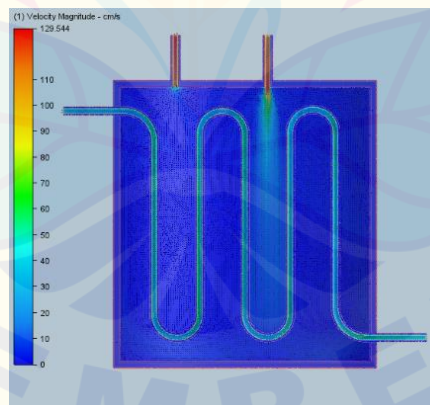
Gambar 4. 7 *Vector Velocity 0,5 Variasi Solar Thermal On Biogas On (a) Top Position (b) Bottom Position*

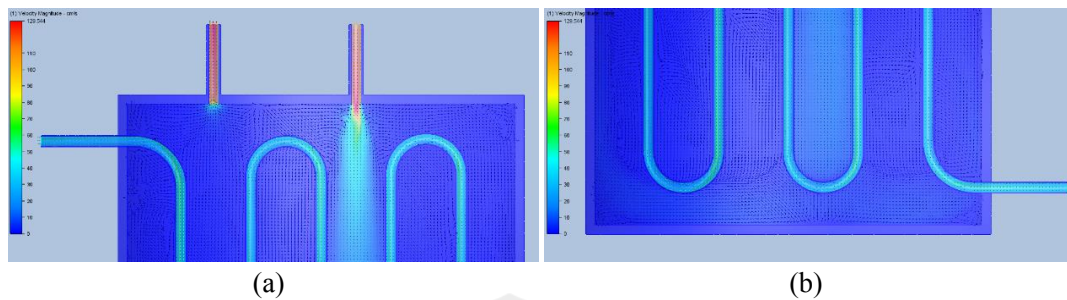
Visualisasi *velocity vectors* pada gambar 4.6 dan gambar 4.7 menyajikan detail karakteristik arah dan magnitudo pergerakan fluida dalam system, pada variasi *solar thermal* dan biogas dinyalakan. Analisis vektor bertujuan untuk mengidentifikasi fenomena aliran fluida, berdasarkan hasil simulasi, didapat fenomena awal teramati

pada area *inlet*, akibat peluasan penampang dari pipa masuk *solar thermal* ke dalam sistem, terbentuk zona semburan (*inlet jet zone*) dimana fluida masuk dengan momentum tinggi. Kemudian, tepat pada titik fluida menabrak dengan dinding bawah bagian *boiler*, kecepatan fluida mendadak menjadi nol. Area ini diidentifikasi sebagai titik stagnasi (*stagnation point*), dimana energi kinetik aliran dikonversi sepenuhnya menjadi tekanan statis (*static pressure*). Kemudian terjadi fenomena *uniform flow* pada area disekitar pipa ORC yaitu ketika fluida mengalir ke seluruh sistem dengan kecepatan maupun arah aliran yang stabil.

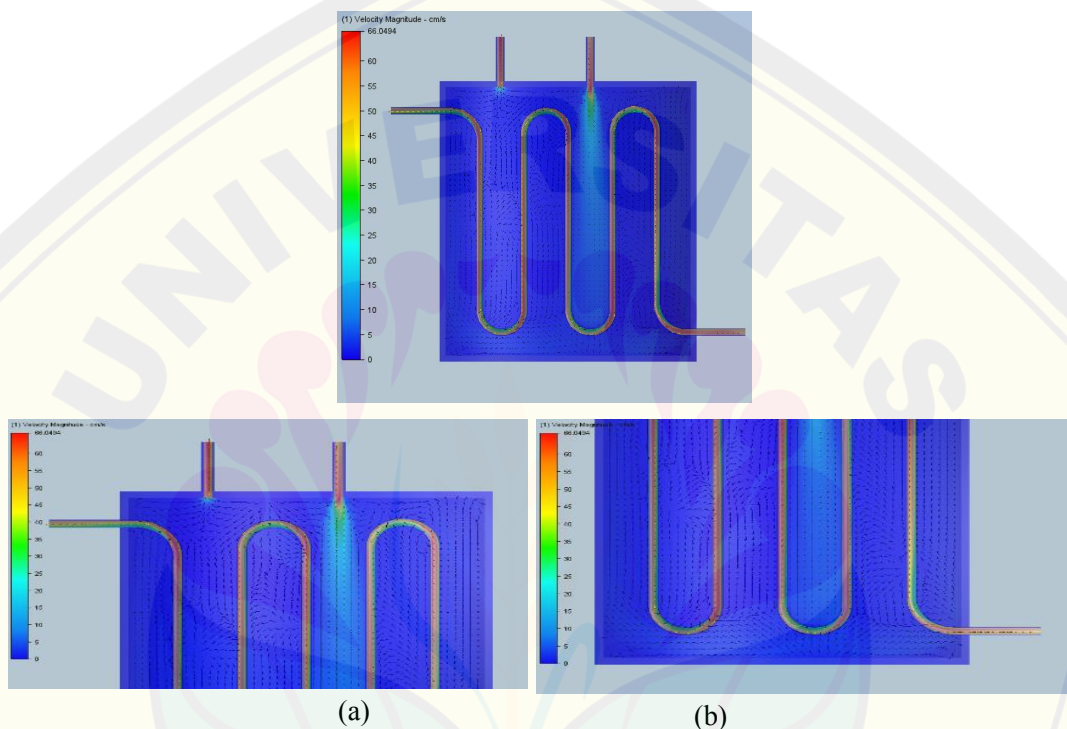
Pada bagian sudut geometri *boiler* yang membentuk sudut 90 derajat, terjadi penurunan tekanan yang signifikan sehingga fluida tidak lagi mengalir lurus, melainkan berputar membentuk *vortex flow*. Pada area *inlet* ORC terjadi *developing flow*, yaitu kondisi dimana kecepatan aliran fluida amonia mengalami fase transisi saat baru memasuki pipa, sebelum akhirnya menjadi aliran yang stabil (*uniform flow*). Pada variasi kecepatan 1 m/s, zona pada bagian pipa ORC terlihat lebih luas dengan gradien tekanan yang lebih tinggi. Hal ini dapat dilihat pada warna *contour* magnitudo *velocity*, yakni dengan nilai 55 – 70 cm/s dibandingkan variasi *velocity* 0,5 m/s memperoleh nilai 40 – 55 cm/s.

#### 4.2.2 Solar Thermal On Biogas Off





Gambar 4. 8 *Vector Velocity 1 Variasi Solar Thermal On Biogas Off* (a) *Top Position* (b) *Bottom Position*



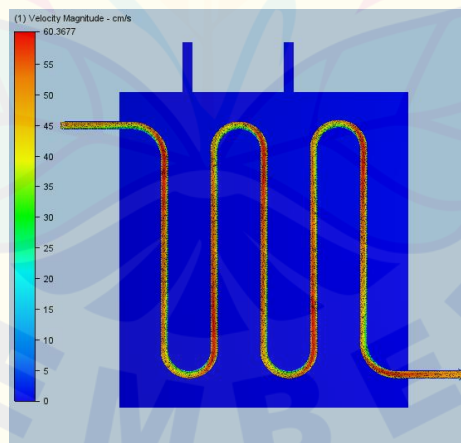
Gambar 4. 9 *Vector Velocity 0,5 Variasi Solar Thermal On Biogas Off* (a) *Top Position* (b) *Bottom Position*

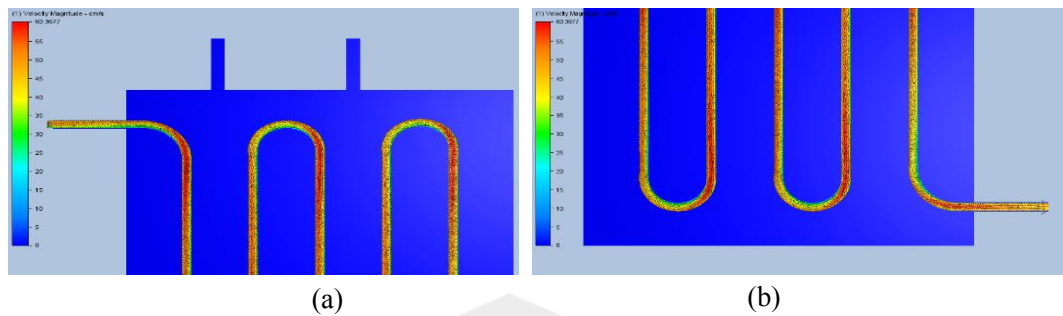
Merujuk pada gambar 4.6 dan 4.7 memperlihatkan visualisasi *vector contour velocity* pada variasi *solar thermal* dinyalakan dan biogas dimatikan. Analisis ini dilakukan untuk memetakan fenomena *velocity* spesifik yang terjadi dalam sistem. Berdasarkan hasil simulasi, fenomena pembentukan zona semburan (*inlet jet zone*) di area saluran masuk pipa *solar thermal*. Hal ini disebabkan oleh peluasan penampang aliran dari pipa masuk menuju sistem, yang memicu tingginya momentum fluida.

Selanjutnya, saat fluida menabrak dinding bagian dasar *boiler*, terjadi penurunan kecepatan secara drastis hingga nol. Area ini didefinisikan sebagai titik stagnasi (*stagnation point*), dimana terjadi konversi total energi kinetik menjadi tekanan statis. Kemudian terjadi fenomena *uniform flow* pada area disekitar pipa ORC yaitu ketika fluida mengalir ke seluruh sistem dengan kecepatan maupun arah aliran yang stabil. Pada bagian sudut geometri *boiler* yang membentuk sudut 90 derajat, terjadi penurunan tekanan yang signifikan sehingga fluida tidak lagi mengalir lurus, melainkan berputar membentuk *vortex flow*.

Kemudian pada bagian area dekat pipa ORC fluida mengalami fenomena *reverse flow*, hal ini terjadi akibat adanya gradien tekanan balik yang melebihi momentum aliran, sehingga sebagian fluida bergerak berlawanan arah dengan aliran utama. Pola aliran memperlihatkan bahwa terjadinya *develoing flow* pada area *inlet* pipa ORC, yang kemudian fluida cenderung mengalami pola aliran yang stabil (*uniform flow*). Secara spesifik, variasi kecepatan 1 m/s, zona pada bagian pipa ORC terlihat lebih luas dengan gradien tekanan yang lebih tinggi. Hal ini dapat dilihat pada legend warna *contour* magnitudo *velocity*, yakni dengan nilai 50 – 70 cm/s dibandingkan variasi *velocity* 0,5 m/s memperoleh nilai 35 – 55 cm/s.

#### 4.2.3 Solar Thermal Off Biogas On





Gambar 4. 10 *Vector Velocity* 0 m/s Variasi *Solar Thermal Off* Biogas *On* (a) *Top Position*  
(b) *Bottom Position*

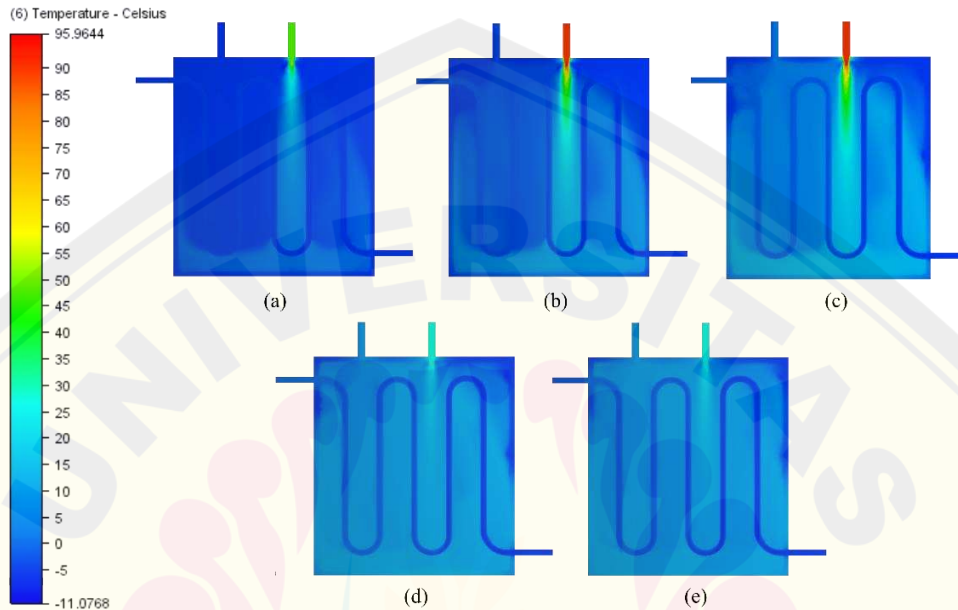
Gambar 4.10 menampilkan kontur dan vektor kecepatan aliran pada konfigurasi pipa *serpentine* untuk kondisi *solar thermal* dimatikan dan biogas dinyalakan dengan kecepatan inlet *solar thermal* 0 m/s. Secara umum, area fluida air di luar pipa ORC terlihat warna *contour* berwarna biru yang mengindikasikan bahwa pada kondisi tanpa dorongan aliran (*forced convection*), kecepatan yang terbentuk cenderung stagnan, dan transport energi dalam sistem lebih didominasi oleh mekanisme konduksi sehingga terjadinya konveksi relatif lemah. Sedangkan aliran yang teridentifikasi terutama terjadi di sepanjang jalur pipa ORC. Pola aliran memperlihatkan bahwa terjadinya *developing flow* pada area *inlet* pipa ORC, yang kemudian menjadi aliran stabil.

Hal ini sejalan dengan penelitian (Lazzarin & Viero, 2023) yang menyatakan geometri tikungan *U – bend* pada pipa *serpentine* menyebabkan perubahan arah aliran yang tajam. Pada bagian tikungan, aliran melengkung secara teori dapat memunculkan aliran sekunder (*secondary flow*), yang dikenal sebagai fenomena (*dean vortices*) pada aliran di pipa ORC. Vektor kecepatan di sepanjang pipa ORC memperlihatkan kecenderungan yang serupa, yaitu *velocity* mengalami *uniform flow*, dimana kondisi kecepatan aliran fluida tetap konstan di sepanjang aliran pipa.

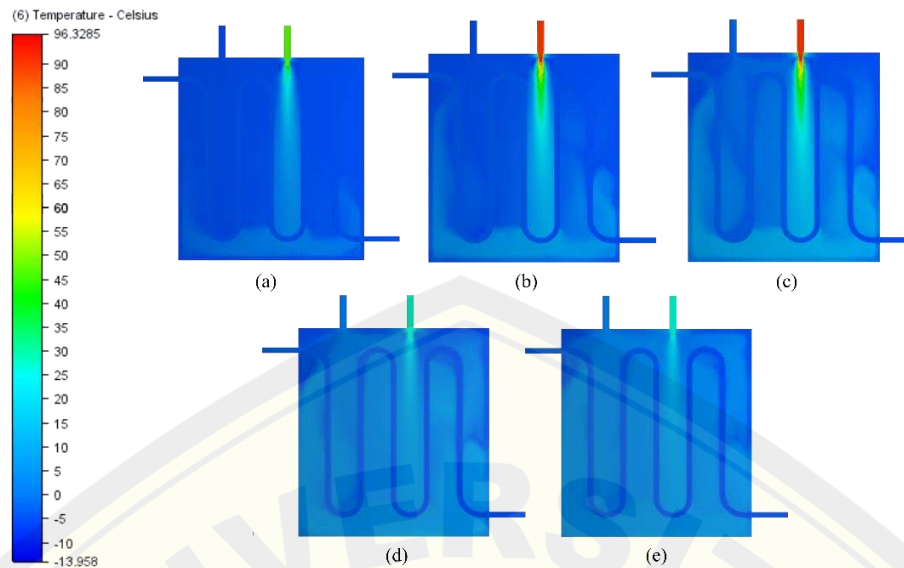
### 4.3 Distribusi Temperatur

Distribusi temperatur merupakan karakteristik visual perpindahan panas yang terjadi di dalam sistem. Subbab ini menyajikan visualisasi kontur distribusi temperatur yang bertujuan untuk memetakan pola penyebaran panas yang terjadi dalam sistem.

#### 4.3.1 *Solar Thermal On Biogas On*



Gambar 4. 11 Variasi *Solar Thermal On Biogas On Velocity 1 m/s*  
(a) 50 s (b) 150 s (c) 300 s (d) 450 s (e) 600 s



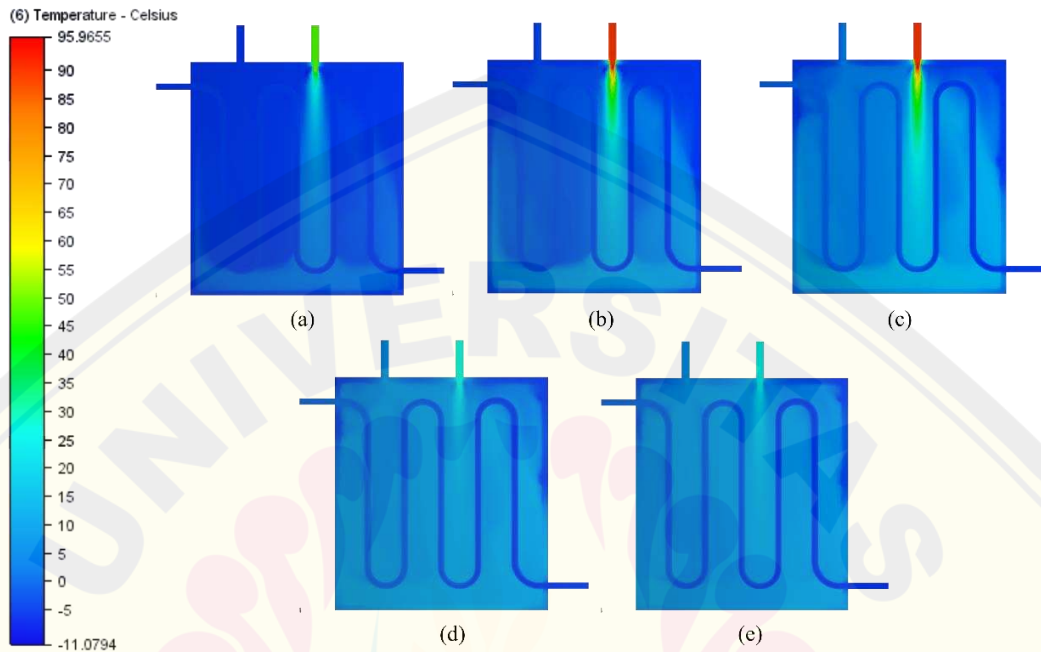
Gambar 4. 12 Variasi *Solar Thermal On Biogas On Velocity* 0.5 m/s  
(a) 50 s (b) 150 s (c) 300 s (d) 450 s (e) 600 s

Pada gambar 4.11 dan gambar 4.12 memperlihatkan distribusi temperatur pada sistem untuk kondisi *solar thermal* dan biogas dinyalakan, masing – masing kecepatan aliran 1 m/s dan 0,5 m/s pada beberapa waktu pengamatan, yaitu 50 s, 150 s, 300 s, 450 s, dan 600 s. Secara umum, pola kontur menunjukkan bahwa kenaikan temperatur bermula dari area masuk yang ditandai zona warna merah di sekitar jalur aliran, kemudian distribusi temperatur menyebar mengikuti lintasan pipa ORC seiring berjalannya waktu.

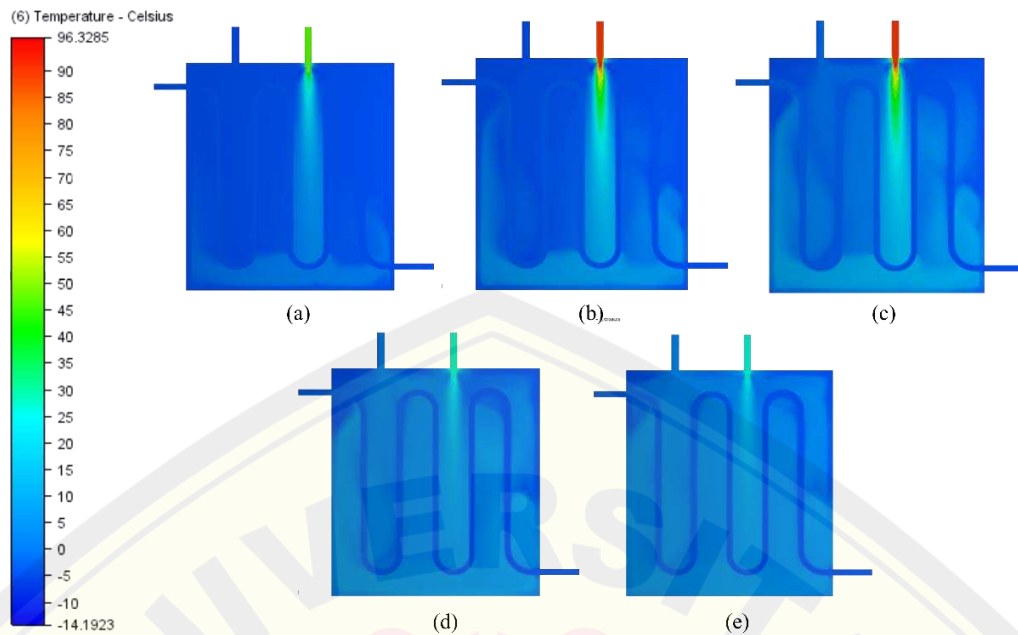
Pada fase *ramp – up* dan *holding* yakni waktu 0 – 300 s, zona temperatur yang lebih tinggi masih terkonsentrasi di sekitar inlet/area pemanasan, sementara sebagian besar domain masih berada pada temperatur rendah warna dominan biru. Memasuki fase *ramp – down* pada waktu 450 – 600 s, temperatur domain cenderung didominasi warna biru, distribusi temperatur terlihat semakin merata yang mengindikasikan bahwa penurunan kecepatan fluida menyebabkan kemampuan perpindahan panas berkurang, sehingga proses pemanasan lebih bergantung pada difusi termal yang lebih lambat. Hal

ini menjelaskan bahwa pada *velocity* 1 m/s, perkembangan zona panas dan distribusi temperatur yang dihasilkan terjadi lebih cepat merata dibandingkan *velocity* 0,5 m/s.

#### 4.3.2 Solar Thermal On Biogas Off



Gambar 4. 13 Variasi *Solar Thermal On Biogas Off Velocity* 1 m/s  
(a) 50 s (b) 150 s (c) 300 s (d) 450 s (e) 600 s



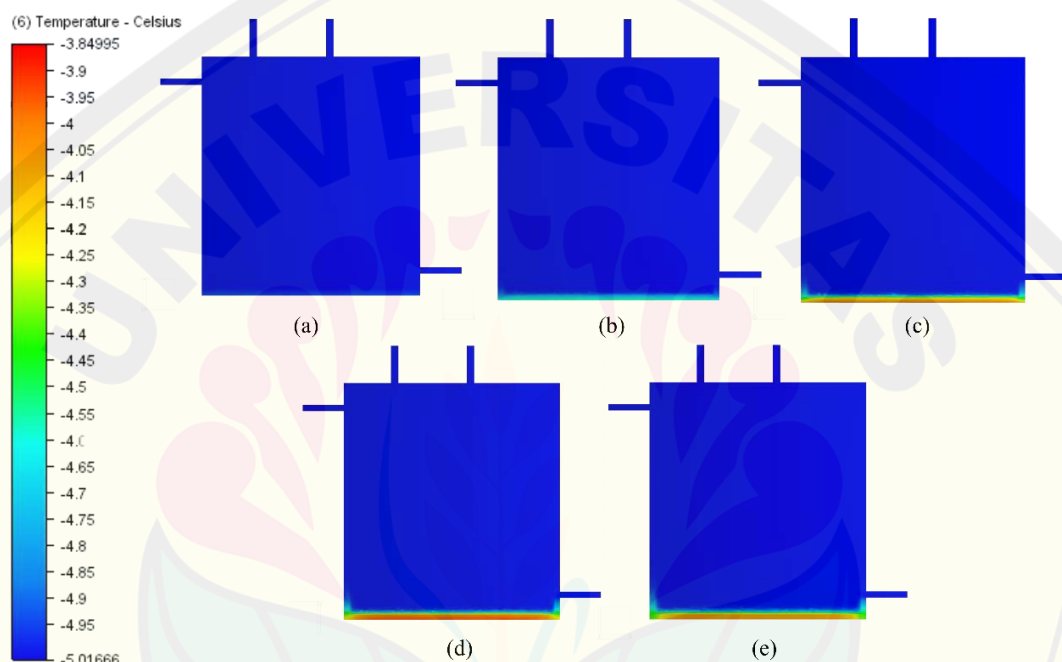
Gambar 4. 14 Variasi *Solar Thermal On Biogas Off Velocity 0.5 m/s*  
(a) 50 s (b) 150 s (c) 300 s (d) 450 s (e) 600 s

Distribusi temperatur variasi *solar thermal* dinyalakan dan biogas dimatikan, ditampilkan pada gambar 4.13 dan gambar 4.14 pada beberapa waktu pengamatan (50 s, 150 s, 300 s, 450 s, dan 600 s) dengan variasi kecepatan aliran masing – masing 1 m/s dan 0,5 m/s. Secara umum, kenaikan temperatur diawali dari area masuk zona warna merah lebih panas di sekitar jalur aliran, kemudian menyebar mengikuti lintasan serpentin seiring berjalannya waktu. *Ramp – up* dan *holding* yakni waktu 0 – 300 s area temperatur lebih tinggi didominasi di sekitar jalur aliran *inlet solar thermal* yang ditandai dengan zona berwarna merah, sedangkan sebagian besar domain masih berada pada temperatur rendah dengan warna dominan biru.

Memasuki fase *ramp – down* 450 – 600 s, distribusi temperatur *velocity 1 m/s* lebih cepat menyebar dan cenderung mendekati keadaan stabil dibandingkan *velocity 0,5 m/s*. Namun pada bagian *legend* yang menampilkan warna maupun nilai dari hasil simulasi, terlihat bahwa nilai temperatur maksimal pada *velocity 1 m/s* sebesar 95,9655 °C lebih rendah dibandingkan dengan *velocity 0,5 m/s* sebesar 96,3285 °C, hal ini

disebabkan karena kecepatan aliran pada 0,5 m/s, fluida bergerak lebih lambat sehingga memiliki waktu tinggal (*residence time*) yang lebih panjang didalam sistem, sementara intensitas pencampuran fluida relatif lebih rendah. Kondisi ini memungkinkan panas terakumulasi di area tertentu, sehingga nilai puncak temperatur menjadi lebih tinggi. Sebaliknya, pada kecepatan 1 m/s distribusi difusi termal yang lebih cepat di dalam sistem, dapat menurunkan nilai temperatur puncak.

#### 4.3.3 *Solar Thermal Off Biogas On*



Gambar 4. 15 Variasi *Solar Thermal Off Biogas On Velocity 0 m/s*  
(a) 50 s (b) 150 s (c) 300 s (d) 450 s (e) 600 s

Berdasarkan Gambar 4.15 variasi *solar thermal* dimatikan dan biogas dinyalakan dengan *velocity 0 m/s* yang menampilkan distribusi temperatur pada  $t = 50$  s, 150 s, 300 s, 450 s, dan 600 s, terlihat bahwa hampir seluruh volume domain tetap berada pada temperatur mendekati kondisi awal yakni warna dominan biru. Kenaikan temperatur hanya muncul pada bagian dinding biogas yang ditandai dengan zona warna hijau, kuning, dan merah, yang semakin jelas seiring berjalannya waktu. Hal ini

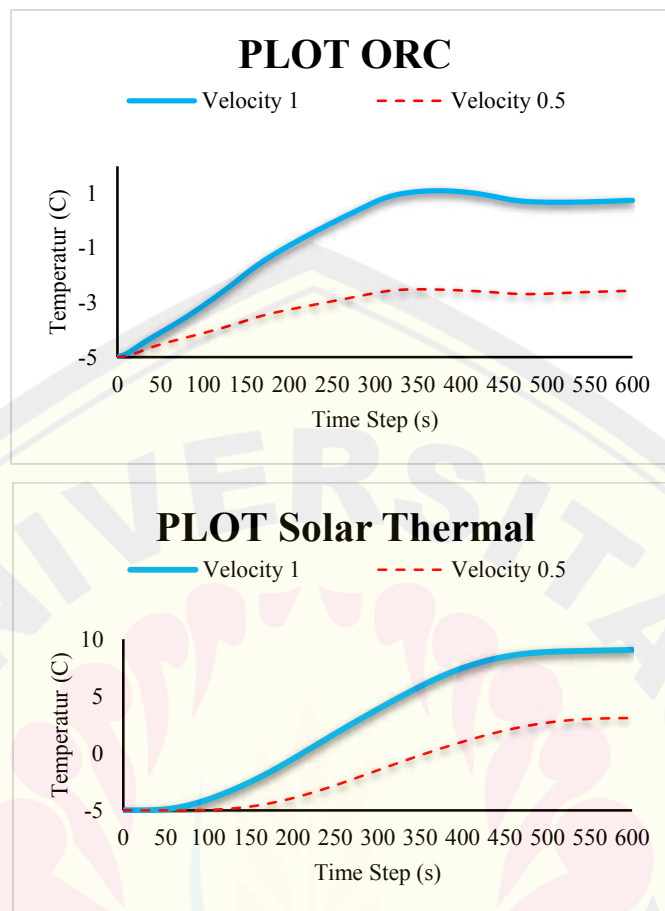
menunjukkan bahwa, saat tidak adanya aliran yakni dengan *velocity* 0 m/s dan tidak adanya *input* panas dari *solar thermal*, mekanisme perpindahan panas fluida tidak menyebar ke seluruh sistem, melainkan cenderung terakumulasi pada area yang langsung menerima panas yaitu pada dinding dasar *boiler*.

#### 4.3 Analisis Thermal Performance

Analisis *thermal performance* adalah evaluasi terhadap respon sistem seiring berjalannya waktu. Bagian ini akan membahas mengenai performa termal dinamis dalam sistem, sesuai dengan skenario pembebanan *thermal* yang telah ditetapkan.

Tabel 4. 2 Data *Output Thermal* Setiap Variasi

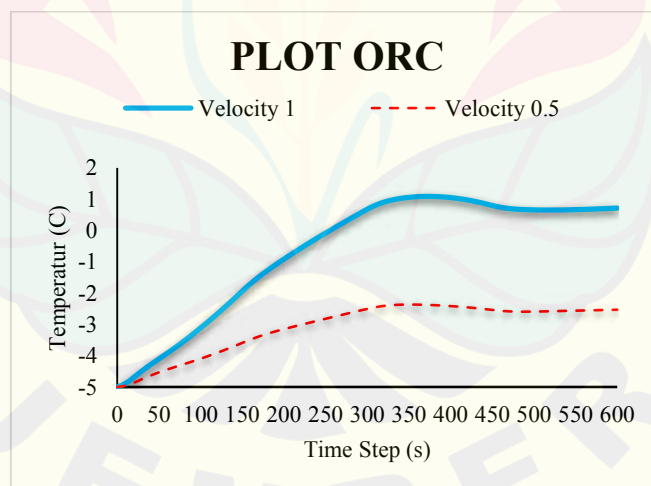
| <i>Velocity Solar Thermal Collector</i> (m/s) | Variasi                                      | <i>Output Solar Thermal Collector</i> (°C) | <i>Output ORC</i> (°C) |
|---|--|--|------------------------|
| 0,5   | <i>Solar Thermal On</i><br>Biogas <i>On</i>  | 3,08571                                    | -2,56399               |
|   | <i>Solar Thermal On</i><br>Biogas <i>Off</i> | 3,04391                                    | -2,53146               |
| 1   | <i>Solar Thermal On</i><br>Biogas <i>On</i>  | 9,06285                                    | 0,751341               |
|   | <i>Solar Thermal On</i><br>Biogas <i>Off</i> | 8,96659                                    | 0,715519               |
| 0   | <i>Solar Thermal Off</i><br>Biogas <i>On</i> | -5   | -5                     |

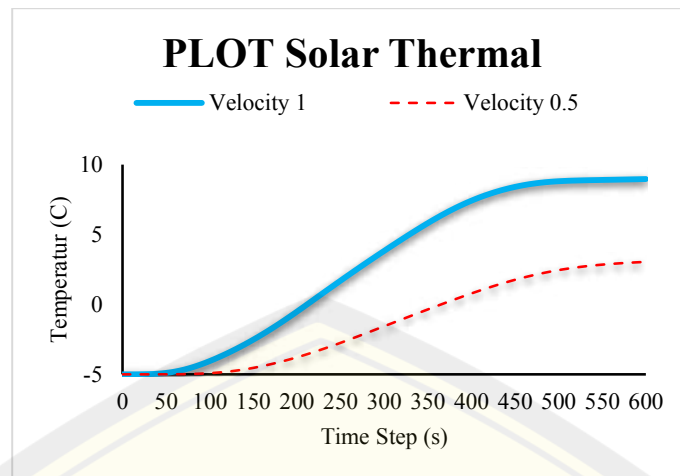
4.3.1 *Solar Thermal On Biogas On*Gambar 4. 16 Grafik Hasil *Output Solar Thermal On Biogas On*

Berdasarkan gambar 4.16 menampilkan grafik profil temperatur terhadap waktu, pada variasi *solar thermal* dan biogas dinyalakan. Performa termal dari sistem pada kondisi operasional transien sangat dipengaruhi oleh laju aliran massa fluida kerja. Pada plot ORC profil temperatur terhadap waktu, mekanisme perpindahan panas yang berlangsung didalam sistem melibatkan konveksi paksa. Ketika fluida air dari *input solar thermal* bergerak, kemudian merambat secara konveksi paksa melalui dinding material pipa ORC, kemudian diteruskan ke fluida amonia dalam sistem ORC yang mengalir di dalamnya.

Plot *solar thermal* profil temperatur terhadap waktu yang dihasilkan, mengalami perpindahan panas yang melibatkan konduksi dan konveksi. Hal ini terjadi, perpindahan panas konduksi antar lapis dari biogas merambat melalui dinding bawah *boiler*, lalu perlahan diserap oleh fluida air yang ada di dalamnya. Kemudian fluida air mengalami konveksi paksa dan natural, yakni fluida air mengalir dan bergerak pada lapisan fluida yang lebih hangat secara perlahan memanaskan lapisan fluida air yang masih relatif dingin. Terdapat perbedaan karakteristik yang signifikan antara variasi kecepatan 0,5 m/s dan 1 m/s, baik dari segi pencapaian temperatur maksimum maupun waktu respons sistem. Pada kecepatan 1 m/s, tingginya bilangan Reynolds memicu aliran turbulen, sehingga mempercepat pencampuran aliran fluida yang mampu menyerap panas lebih cepat dan mencapai temperatur akhir yang lebih tinggi. Hal ini divalidasi dengan penelitian (Han et al., 2025) yang menyatakan bahwa tingginya *velocity* dapat meningkatkan bilangan Reynolds sehingga memicu aliran turbulen, yang mengakibatkan nilai koefisien perpindahan panas konveksi mengalami kenaikan secara signifikan.

#### 4.3.2 Solar Thermal On Biogas Off



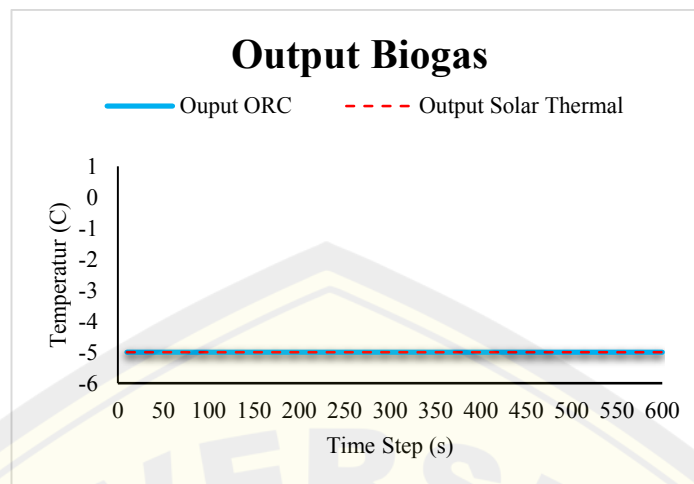


Gambar 4. 17 Grafik Hasil *Output Solar Thermal On Biogas Off*

Berdasarkan gambar 4.17 yang memperlihatkan profil temperatur terhadap waktu pada variasi *solar thermal* dinyalakan dan biogas dimatikan, performa termal sistem pada kondisi transien sangat ditentukan oleh laju aliran fluida kerja. *Output temperature* yang dicapai, lebih besar velocity 1 m/s dibandingkan 0,5 m/s. Hal ini terjadi pada kecepatan 1 m/s, bilangan Reynolds yang lebih besar memicu aliran menjadi turbulen. Fluida mampu menyerap energi panas dalam jumlah yang lebih besar dan mencapai temperatur akhir yang lebih tinggi. Sebaliknya, pada kecepatan 0,5 m/s, meskipun fluida air memiliki waktu tinggal yang lebih lama didalam sistem, sifat aliran yang cenderung laminar membuat fluida air bergerak secara teratur dan lambat.

Mekanisme perpindahan panas yang berlangsung didalam sistem melibatkan konveksi paksa. Ketika fluida air dari *input solar thermal* bergerak, kemudian merambat secara konveksi paksa melalui dinding material pipa ORC, dan diteruskan ke fluida amonia dalam sistem ORC yang mengalir di dalamnya. Sehingga, *output temperature* yang dihasilkan pada variasi *solar thermal on biogas off* secara keseluruhan lebih rendah dibandingkan variasi *solar thermal on biogas on*, karena suplai panas hanya bersumber dari *solar thermal* tanpa tambahan *input* panas dari biogas.

### 4.3.3 Solar Thermal Off Biogas On



Gambar 4. 18 Grafik Hasil Output Solar Thermal Off Biogas On

Berdasarkan gambar 4.18 variasi *solar thermal off biogas on*, yaitu kondisi *solar thermal* dimatikan dan biogas dinyalakan, baik kurva *output ORC* maupun *output solar thermal* menunjukkan nilai temperatur yang tetap konstan dengan nilai  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  sepanjang waktu simulasi hingga 600 s. Kondisi ini mengindikasikan bahwa, *input* panas yang terlalu kecil dari *heat flux* biogas dan tidak ada pasokan panas dari *solar thermal*, menyebabkan sistem hanya mengandalkan dua cara perpindahan panas, yakni konduksi dan konveksi natural. Panas dari biogas merambat secara konduksi melalui dinding bawah *boiler*, lalu perlahan diserap oleh fluida air yang ada di dalamnya. Karena tidak ada dorongan aliran paksa akibat dimatikannya *solar thermal*, maka pergerakan fluida air hanya bisa berpindah secara konveksi natural. Fenomena ini terjadi karena adanya perubahan massa jenis fluida, lapisan fluida yang lebih hangat di bagian bawah *boiler* akan mengalami penurunan densitas sehingga memicu timbulnya gaya apung (*buoyancy force*). Gaya inilah yang mendorong fluida hangat tersebut bergerak naik secara perlahan, untuk memanaskan lapisan fluida di atasnya yang masih relatif dingin, sehingga panas yang terdistribusi tidak cukup signifikan untuk menaikkan suhu fluida air di dalam *boiler*.

## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang didapat dari penelitian dan analisis yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Karakteristik perpindahan panas transien pada *boiler* ditandai dengan adanya fenomena jeda waktu (*delay time*) antara pembebanan panas yang diberikan hingga terjadinya kenaikan temperatur *outlet* fluida. Keterlambatan respons ini diakibatkan oleh efek inersia termal (*thermal inertia*) pada material penyusun sistem, di mana energi panas yang disuplai pada awal proses tidak langsung memanaskan fluida secara utuh, melainkan terakumulasi terlebih dahulu untuk menaikkan temperatur material *boiler*
2. Pengaruh variasi *input* panas terhadap *thermal performance* berbeda – beda, pada skenario *solar thermal on* dan *biogas on* menghasilkan *thermal performance* berupa pencapaian temperatur *outlet* yang paling tinggi dan stabil. Sebaliknya, pada skenario *solar thermal on* dan *biogas off*, output temperatur yang dihasilkan lebih rendah karena sistem hanya mengandalkan satu sumber panas yakni dari *solar thermal*. Pada skenario *solar thermal off* dan *biogas on* dengan kecepatan fluida 0 m/s, respons termal sistem menjadi stagnan karena *input heat flux* dari biogas terserap oleh inersia termal material sebelum mampu memanaskan fluida.
3. Parameter yang paling berperan dalam meningkatkan laju perpindahan panas adalah kecepatan aliran fluida kerja. Peningkatan kecepatan menjadi 1 m/s menghasilkan bilangan Reynolds yang tinggi, sehingga memicu aliran turbulen yang secara signifikan menaikkan koefisien perpindahan panas konveksi dalam sistem. Laju perpindahan panas yang sangat tinggi mampu mengkompensasi singkatnya waktu kontak fluida (*residence time*) di dalam sistem, sehingga fluida mampu menyerap panas lebih banyak dan mencapai temperatur akhir yang lebih tinggi dibandingkan variasi kecepatan 0,5 m/s.

## 5.2 Saran

Adapun saran yang dapat dilakukan untuk keberlanjutan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Dari hasil penelitian, diketahui bahwa terjadi peningkatan kecepatan lokal di area transisi pipa *solar thermal* menuju tangki/evaporator, untuk penelitian selanjutnya disarankan menambahkan elemen desain seperti diffuser, baffle, atau pengarah aliran agar distribusi aliran lebih merata, mengurangi potensi *recirculation* yang tidak diinginkan.
2. Pada penelitian ini, sistem *hybrid* terbukti berhasil menstabilkan temperatur. Untuk riset berkelanjutan, disarankan untuk meningkatkan variasi beban fluks panas (*heat flux*) dari sumber biogas. Hal ini bertujuan untuk menguji kapasitas maksimal biogas agar temperatur fluida kerja dapat mencapai titik didih optimalnya.
3. Tingginya *velocity* terbukti meningkatkan nilai Reynold *Number*, sehingga disarankan untuk menggunakan variasi *velocity* yang tinggi agar memperoleh performa perpindahan panas yang lebih baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bianchi, M., Branchini, L., De Pascale, A., Melino, F., Ottaviano, S., Peretto, A., & Torricelli, N. (2021). Experimental Transient Analysis of Micro-Orc System for Low-Grade Heat Recovery. *International Seminar on ORC Power Systems*, (2019), 1–10.
- Botsaris, P. N., Pechtelidis, A. G., & Lympelopoulou, K. A. (2019). Modeling, Simulation, and Performance Evaluation Analysis of a Parabolic Trough Solar Collector Power Plant Coupled to an Organic Rankine Cycle Engine in North Eastern Greece Using trnsys. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 141(6). <https://doi.org/10.1115/1.4043658>
- Braga, W. (2015). Connecting unsteady-state and steady-state analyses using heat transfer and fluids examples. In *International Journal of Mechanical Engineering Education* (Vol. 34, Number 2).
- Çengel. (2020). *Yunus A. Çengel - Fluid mechanics \_fundamentals and applications- McGraw-Hill Education* (2020).
- Dorfman, A. (2009). Conjugate problems in convective heat transfer: Review. In *Mathematical Problems in Engineering* (Vol. 2009). <https://doi.org/10.1155/2009/927350>
- Fatiatun, F., Pratiwi, A. D., Wirdati, A. C., & Avifatun, N. (2022). PENERAPAN TERMODINAMIKA HEATING DAN COLLING PADA DISPENSER. *Jurnal Penelitian Dan Pengabdian Kepada Masyarakat UNSIQ*, 9(2), 146–150. <https://doi.org/10.32699/ppkm.v9i2.2658>
- Gao, Y., Shao, S., Feng, Y., & Tian, C. (2019). Heat transfer and pressure drop characteristics of ammonia/miscible oil mixture during flow boiling in an 8 mm horizontal smooth tube. *International Journal of Thermal Sciences*, 138(September 2018), 341–350. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.12.040>

- Hajdukiewicz, M., González Gallero, F. J., Mannion, P., Loomans, M. G. L. C., & Keane, M. M. (2024). A narrative review to credible computational fluid dynamics models of naturally ventilated built environments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 198(April). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114404>
- Han, T., Li, Q., Shang, L., Chen, X., Zhou, F., & Li, W. (2025). Study on the Influence of Reynolds Number on Heat Exchange Performance and Nusselt Number of Spray Coil Heat Exchanger. *Processes*, 13(2), 1–16. <https://doi.org/10.3390/pr13020588>
- Hijriawan, M., Himawanto, D. A., Pambudi, N. A., & Arifin, Z. (2022). Organic Rankine Cycle (Orc) System in Renewable and Sustainable Energy Development: a Review of the Utilization and Current Conditions for Small-Scale Application. *Journal of Applied Engineering Science*, 20(3), 957–970. <https://doi.org/10.5937/jaes0-36319>
- Hosouli, S., Bagde, S., Talha Jahangir, M., Hasnain Qamar, S., Formosa, N., & Gomes, J. (2024). Mitigating PV cell cracking in Solar photovoltaic thermal collectors with a novel H-pattern absorber design. *Applied Thermal Engineering*, 242(November 2023), 122516. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122516>
- Hwang, S., Son, C., Seo, D., Rhee, D. H., & Cha, B. (2016). Comparative study on steady and unsteady conjugate heat transfer analysis of a high pressure turbine blade. *Applied Thermal Engineering*, 99, 765–775. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.139>
- Khoshvaght-aliabadi, M., Ghodrati, P., & Mortazavi, H. (2022). International Journal of Heat and Mass Transfer Predicting heat transfer and flow features of supercritical CO<sub>2</sub> in printed circuit heat exchangers with novel wavy minichannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 196, 123232. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123232>

- Krishna, Y., Faizal, M., Saidur, R., Ng, K. C., & Aslfattahi, N. (2020). *International Journal of Heat and Mass Transfer State-of-the-art heat transfer fluids for parabolic trough collector*. 152. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119541>
- Kurmanova, D., Jaichibekov, N., Karpenko, A., & Volkov, K. (2023). Modelling and Simulation of Heat Exchanger with Strong Dependence of Oil Viscosity on Temperature. *Fluids*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/fluids8030095>
- Lakhani, S., Raul, A., & Saha, S. K. (2017). Dynamic modelling of ORC-based *Solar* thermal power plant integrated with multitube shell and tube latent heat thermal storage system. *Applied Thermal Engineering*, 123, 458–470. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.115>
- Lazzarin, T., & Viero, D. P. (2023). Curvature-induced secondary flow in 2D depth-averaged hydro-morphodynamic models: An assessment of different approaches and key factors. *Advances in Water Resources*, 171(July 2022), 104355. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2022.104355>
- Lintermann, A. (2021). *Computational Meshing for CFD Simulations* (pp. 85–115). [https://doi.org/10.1007/978-981-15-6716-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-15-6716-2_6)
- Mendoza Orbegoso, E. M., Alcántara, J. A., Verástegui, L. J., Bengoa, J. C., Marcelo-Aldana, D., La Madrid Olivares, R., & Kyprianidis, K. G. (2025). Thermofluidics in Water-in-Glass Evacuated-Tube *Solar* Collectors Analysis Based on the Symmetry Conditions of Heat Flux and Tilt Angle. *Symmetry*, 17(1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/sym17010044>
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2006). *FUNDAMENTALS OF ENGINEERING THERMODYNAMICS Eighth Edition*. [www.wiley.com/college/moran](http://www.wiley.com/college/moran).
- Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H. (1994). *Fundamentals of fluid mechanics*. <https://doi.org/10.1201/b11709-7>
- Okechi I. (2022). Cite this article: Ifeanyi-nze FO, Okayim PE (2022) A Critical Review of Hybrid *Solar*-Biomass Renewable Energy System for

- Sustainable Rural Development in Nigeria. *Chem Eng Process Tech*, 7(2), 1071.
- Pili, R., Spliethoff, H., & Wieland, C. (2017). Dynamic simulation of an Organic Rankine Cycle - Detailed model of a kettle boiler. *Energies*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/en10040548>
- Poblete, I. B. S., Araujo, O. de Q. F., & de Medeiros, J. L. (2020). Dynamic analysis of sustainable biogas-combined-cycle plant: Time-varying demand and bioenergy with carbon capture and storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109997>
- Rusdi, M., Hariyanto, H., & Cipto, C. (2021). Sosialisasi Pemanfaatan Energi Terbarukan Dan Pelatihan Teknologi Tepat Guna Berbasis Solarcell Untuk Pelajar SMPIT Ibnu Sina Merauke. *Jurnal Pengabdian Masyarakat Indonesia*, 1(3), 79–84. <https://doi.org/10.52436/1.jpmi.20>
- Tony, M. S. K., Utomo, S., Yohana, E., & Halim, R. (2022). ANALISIS HIDRODINAMIKA DI DALAM CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER BERDASARKAN PERUBAHAN WAKTU MENGGUNAKAN CFD. In *Jurnal Teknik Mesin S-1* (Vol. 10, Number 3).
- Verma, G., & Weber, M. (2022). *Autodesk CFD 2023 Black Book*. CAD/CAM/CAE WORKS.
- Zaphar, S., Chandrashekar, M., & Verma, G. (2023). Thermal Analysis of an Evacuated Tube Solar Collector using a One-end Stainless Steel Manifold for Air Heating Applications under Diverse Operational Conditions. *Evergreen*, 10(2), 897–911. <https://doi.org/10.5109/6792885>
- Zhao, C., Zheng, S., Zhang, J., & Zhang, Y. (2017). Exergy and economic analysis of organic Rankine cycle hybrid system utilizing biogas and Solar energy in rural area of China. *International Journal of Green Energy*, 14(14), 1221–1229. <https://doi.org/10.1080/15435075.2017.1382362>