

TESIS

**PENGEMBANGAN SISTEM PEMANAS AIR TENAGA
MATAHARI DENGAN VARIASI PCM STORAGE**

OLEH

ANDI SYAHRINALDY SYAHRUDDIN

D022171007



**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2020**

TESIS

**PENGEMBANGAN SISTEM PEMANAS AIR TENAGA MATAHARI
DENGAN VARIASI PCM STORAGE**

OLEH

ANDI SYAHRINALDY SYAHRUDDIN
D022171007

**Merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik
Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA**

TESIS

PENGEMBANGAN SISTEM PEMANAS AIR TENAGA MATAHARI DENGAN VARIASI PCM STORAGE

Disusun dan diajukan oleh

A. Syahrinaldy Syahrudin

Nomor Pokok D022171007

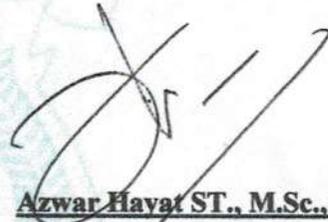
Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Tesis
pada tanggal 22 Desember 2020
dan dinyatakan telah memenuhi syarat.

Menyetujui
Komisi Penasehat,



Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT

Ketua



Azwar Havar ST., M.Sc., Ph.D

Anggota



Dr. Hanul Arsyad, ST., MT



Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT.

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini ;

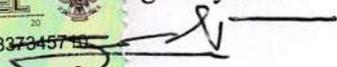
Nama : A.Syahrinaldy Syahrudin
Nomor mahasiswa : D022171007
Program studi : Teknik Mesin / Konversi Energi

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambil alihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 22 Desember 2020

METERAI
TEMPEL
TGL. 20
A5F9AAHF8373457 IS
6000
ENAM RIBU RUPIAH

ng menyatakan



A.Syahrinaldy Syahrudin

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT, karena berkat rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini yang berjudul **“Pengembangan Sistem Pemanas Air Tenaga Matahari Dengan Variasi PCM Storage”**.

Penyusunan tugas akhir ini merupakan salah satu syarat dalam menyelesaikan studi untuk memperoleh gelar Magister pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari dalam menyelesaikan tugas akhir dan penelitian ini tidaklah mudah, banyak hambatan dan masalah yang dihadapi hingga sampai ke titik ini. Namun berkat doa dan dukungan dari berbagai pihak akhirnya penelitian dan tugas akhir ini berhasil diselesaikan.

Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat dan tulus saya mengucapkan banyak terima kasih kepada Bapak Dr.Eng. Jalaluddin Haddada, ST, MT selaku pembimbing pertama dan Bapak Azwar Hayat, ST, M.Sc, Ph.D selaku pembimbing kedua yang telah memberikan sangat banyak pelajaran dan bimbingan kepada saya, dan telah meluangkan waktu dan tenaganya juga memberikan motivasi dan ide-ide sehingga saya dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

Tak lupa secara khusus penulis haturkan ucapan terimakasih kepada Ibunda Dra. Hj. Hadrawati, M.Si, dan Ayahanda Ir. H. A. Syahrudin, MT beserta segenap keluarga besar yang telah memberikan semangat, dukungan, dan doa kepada kami.

Pada kesempatan ini pula perkenankan penulis menghaturkan ucapan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan penelitian dan skripsi ini, ucapan terima kasih kepada:

1. Ibu Prof. Dwia Aris Tina Pulubuhu, selaku Rektor Universitas Hasanuddin beserta stafnya.

2. Bapak Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad, MT. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Bapak Dr.Eng. Jalaluddin Haddada, ST., MT selaku Ketua Departemen Mesin FT-UH, dan Bapak Dr. Hairul Arsyad, ST., MT selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin FT-UH.
4. Bapak Dr.Eng. Jalaluddin Haddada, ST., MT dan Bapak Azwar Hayat., ST., M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing tesis yang telah memberikan arahan serta saran dan kritik membangunnya selama proses penelitian berlangsung.
5. Seluruh dosen penguji Bapak Dr. Eng. Andi Erwin Eka Putra, ST, MT., Bapak Dr. Rustan Tarakka, ST, MT., dan Bapak Dr. Eng. Andi Amijoyo Mukhtar, ST, M.Sc yang telah memberikan kritik dan saran membangun untuk menyempurnakan tugas akhir ini.
6. Seluruh staff departemen mesin, yang telah memberikan dukungan, serta membantu mengurus proses administrasi.
7. Keluarga di rumah tidung, Bonda Inga dan Bonda Unjung, Kak Yuyun beserta suaminya Kak Rama, dan Adik Ii yang telah memberikan banyak dukungan dan motivasi kepada penulis.
8. Keluarga besar Irvicha Triayunanda Dahri yang juga telah memberikan banyak dukungan dan motivasi kepada penulis.
9. Seluruh teman-teman di rumah makkio baji, Caknas, Waru, Jagal, Magis, Kak Arsy, Kak Iwan, Anjas, Wahid, Chitoz, Peso, Rama, Jay, Fajar, Ahyar, Icho, Bulba, Hero dan masih banyak lagi yang sering menemani dalam pengerjaan tugas di rumah dan penyelesaian studi penulis.
10. Seluruh teman-teman mahasiswa pascasarjana departemen mesin, khususnya Firdan yang telah banyak membantu dalam proses penyelesaian penelitian ini.
11. Teman-teman dan adik-adik yang berada di Laboratorium Energi Terbarukan (Bahrun, Lukman, Ari, Adnan, Anis, Arifuddin, Camay dkk, Pak Hasan dkk) yang telah mendampingi dalam menyelesaikan penelitian ini.
12. Keluarga sakinah Mapala 09 SMFT-UH, kanda-kanda, saudara-saudari, dan adik-adik, Nani, Ewa, Qibal, Sofy, Uchi, Anchu, Ammang, Rul, Adi, Bolang, Fian selaku Ketua Mapala 09 Periode 2020-2021, dan semuanya yang sering menemani, berbagi ilmu, dan berbagi cerita dalam penyelesaian studi penulis.
13. Seluruh teman-teman angkatan ROKET2009 dan Teknik 2009.

14. Seluruh adik-adik mahasiswa Teknik Unhas yang sering meluangkan waktunya untuk berbagi cerita di kantin mesin.
15. Teman-teman di CFD-Online forum atas bantuannya.
16. Semua pihak yang tidak sempat disebutkan namanya satu per satu.

Semoga Allah SWT membalas kebaikan kalian semua dengan caranya. Penulis menyadari tesis ini masih jauh dari kata sempurna, sehingga penulis dengan sangat terbuka menerima kritikan dan saran yang membangun untuk memperbaiki penulisan-penulisan kedepanya agar berguna bagi pembaca nantinya.

Gowa, 22 Desember 2020

Penulis

A.SYHRINALDY SYHRUDDIN

DAFTAR ISI

SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
 BAB I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat Penelitian	6
 BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Sistem Pemanas Air Tenaga Matahari.....	7
2.2 Perpindahan Panas.....	11
2.3 Tahapan Perhitungan Efisiensi Kolektor.....	16
2.4 Phase Change Material (PCM)	24
2.2.1 PCM Organik	26
2.2.2 PCM Non Organik	29

2.2.3 PCM Kombinasi ..	31
2.5 Computational Fluid Dynamic (CFD)	32
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	39
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	39
3.2.1 Peralatan yang digunakan dalam penelitian	39
3.2.2 Bahan yang digunakan dalam penelitian	41
3.3 Skema Instalasi	43
3.3.1 Skema Pengujian Simulasi	43
3.3.2 Langkah Kerja	44
3.4 Flowchart Penelitian	70
3.5 Jadwal Penelitian	71
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Intensitas Penyinaran Matahari	72
4.2 Kontur Temperatur	75
4.3 Efisiensi Kolektor	104
BAB V. PENUTUP	
5.1 Kesimpulan	116
5.2 Saran	117
DAFTAR PUSTAKA	118
LAMPIRAN	123

ABSTRAK

A. SYAHRINALDY SYAHRUDDIN. Pengembangan Sistem Pemanas Air Tenaga Air Matahari Dengan Variasi PCM *Storage* (dibimbing oleh Jalaluddin dan Azwar Hayat).

Ketersediaan energi matahari sebagai energi terbarukan sangat melimpah dan tidak ada habisnya. Pemanas air tenaga matahari merupakan peralatan yang memanfaatkan tenaga matahari sebagai sumber energinya. Performa termal pada sistem pemanas air tenaga matahari menggunakan pelat penyerap panas dengan PCM (Material Berubah Fasa) sebagai penyimpanan energi termalnya dihadirkan pada studi kali ini. Empat pemodelan dari kolektor pemanas air tenaga matahari dengan variasi pelat penyerap menggunakan penyimpanan PCM dan tanpa penyimpanan PCM diinvestigasi secara simulasi numerik. Pelat penyerap dengan penyimpanan PCM diberikan tiga variasi ketebalan PCM, yaitu 0.015 m, 0.01 m, dan 0.006 m. Sifat material dari lilin paraffin sebagai penyimpanan PCM telah dianalisa. Setiap potongan model dari sistem pemanas air tenaga matahari telah diimpor dan disimulasikan pada tiga variasi radiasi konstan, yaitu 400 W/m^2 , 700 W/m^2 , dan 1000 W/m^2 . Dengan menggunakan data hasil pengujian eksperimental sebagai nilai referensi, simulasi dijalankan menggunakan *software* CFD (*Computational Fluid Dynamics*) FLUENT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi kolektor terbesar diberikan oleh sistem pemanas air tenaga matahari yang menggunakan penyimpanan PCM dengan ketebalan 0.015 m, dimana efisiensi rata-ratanya adalah 68.32 %. Dan sebagai validasi data antara studi eksperimental dan simulasi numerik, efisiensi kolektor rata-rata antara pelat penyerap yang menggunakan penyimpanan PCM dan tanpa penyimpanan PCM adalah 70.98 % jika menggunakan studi eksperimental dan 67.73 % jika menggunakan studi simulasi numerik.

Kata kunci: **Pemanas Air Tenaga Matahari ; Material Berubah Fasa (PCM) ; *Computational Fluid Dynamics* (CFD) FLUENT.**

ABSTRACT

A. SYAHRINALDY SYAHRUDDIN. Development of Solar Water Heater System with PCM Storage Variations (guided by Jalaluddin and Azwar Hayat).

Availability of solar energy as a renewable energy source is very abundant and inexhaustible. Solar water heater is an equipment that utilizes solar energy as a source of energy. The thermal performance of a solar water heater system using absorber plate with phase change material (PCM) as thermal energy storage is presented in this study. Four model of solar water heater collector with variations of absorber plate use a PCM storage and without PCM storage were investigated numerically simulation. Absorber plate with PCM storage has given three variations PCM thickness, i.e. 0.015 m, 0.01 m, and 0.006 m. For the first time, the material properties of paraffin wax as PCM storage was analyzed analytically. Every shape model of solar water heater systems were imported and simulated at three variations of constant solar radiation, i.e. 400 W/m², 700 W/m², and 1000 W/m². By using experimental data as reference values, simulated was run using a computational fluid dynamic (CFD) Fluent software. The results showed that the biggest collector efficiency has given by solar water heater system using PCM storage 0.015 m thickness, where the average efficiency is 68.32 %. And as data validate between experimental study and numerical simulation study, the average collector efficiency between absorber plate with and without PCM storage is 70.98 % if using experimental study and 67.73 % if using numerical simulation study.

Keywords: Solar Water Heater ; Phase Change Material (PCM) ; Computational Fluid Dynamic (CFD) Fluent.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Ketersediaan energi matahari sebagai sumber energi terbarukan sangat melimpah dan tidak ada habisnya. Pemanas air tenaga matahari merupakan sebuah peralatan yang memanfaatkan energi matahari sebagai sumber energinya dan telah banyak digunakan di berbagai negara di dunia. Namun karena masih banyaknya kekurangan dari pemanas air tenaga matahari yang ada, maka berbagai penelitian dilakukan. Penelitian mengenai sistem pemanas air tenaga matahari dinilai sangat penting karena diharapkan dapat meningkatkan efisiensi dan efektifitas teknologi pemanas air tenaga matahari. Penelitian sebelumnya merupakan sebuah penelitian eksperimental dari sistem pemanas air tenaga matahari dengan pelat absorber berbentuk V [1], dua buah sistem pemanas air tenaga matahari dipasang dan diuji pada debit rendah 0,5 L / menit dan debit tinggi 2 L / menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pemanas air tenaga matahari dengan pelat absorber berbentuk V memiliki kinerja 3,6 - 4,4% lebih baik dibandingkan dengan sistem yang menggunakan pelat absorber datar. Pengembangan lain dalam sistem pemanas air tenaga matahari yakni mengintegrasikan pemanas air tenaga matahari dengan kolektor penyimpan panas dimana hal ini menunjukkan bahwa sistem telah diuji sebagai penyedia air panas rumah tangga dengan efisiensi yang lebih baik dan biaya yang lebih rendah [2], akan tetapi banyaknya kerugian termal di waktu malam hari membuat penelitian ini membutuhkan pengembangan lebih lanjut. Selain itu, Vengadesan [3] telah menggunakan nanofluida dengan debit yang lebih rendah pada aliran masuk ke dalam pelat absorber, hal ini menunjukkan bahwa peningkatan perpindahan panas dicapai dari 13,03% menjadi 25,25% lebih banyak daripada debit yang lebih besar dan meningkatkan efisiensi energi dan eksergi pada kolektor pelat datar hingga 24% dan 30% masing – masingnya.

Karena tingginya temperatur pada permukaan pelat absorber berbentuk V, kehilangan panas pada permukaan kolektor juga menjadi lebih besar, sehingga diperlukan suatu penyimpanan energi termal yang mampu memaksimalkan kinerja kolektor. Investigasi kinerja secara eksperimental dari *phase change material* (PCM) telah dilakukan dan didiskusikan oleh Pisut Thantong [4] pada iklim tropis. Eksperimen ini telah membuktikan bahwa kolektor yang terintegrasi dengan PCM lebih hemat energi dalam hal pengurangan kehilangan panas dan penghematan energi. Palacio [5] telah mempresentasikan analisis eksperimental komparatif dari kolektor surya pelat datar konvensional dan prototipe yang identik dengan sistem penyimpanan termal oleh PCM dan hasilnya menunjukkan bahwa pemilihan PCM dan kontak konduksi antara penyerap dan PCM adalah faktor kunci untuk meningkatkan kinerja kolektor dibandingkan dengan kolektor surya pelat datar konvensional. Penggunaan komposisi polimer / bahan berpori PCM sebagai penyimpanan termal juga telah ditinjau dan dianalisis oleh Kee [6]. Selain itu Saddegh [7] juga telah membandingkan perilaku termal dalam sistem penyimpanan energi *shell-and-tube* vertikal dan horizontal menggunakan PCM. Begitu pula dengan Shalaby [8] yang telah melakukan percobaan pemanas air tenaga matahari yang terintegrasi dengan *shell and finned-tube* sistem penyimpanan panas laten, dan hasilnya menunjukkan bahwa efisiensi harian tertinggi sebesar 65% dicapai ketika konfigurasi penggabungan PCM dan tangki penyimpanan air digunakan.

Kajian terhadap peningkatan laju pengisian dan pengosongan penyimpanan energi panas laten telah dipelajari oleh Yanping Du [9], menghasilkan temperatur komposit logam-foam PCM menjadi lebih seragam, sedangkan laju pelepasan kalor ditingkatkan sekitar 8 kali. Wei Wu [10] juga telah menyelidiki studi eksperimental tentang kinerja sistem pemanas air tenaga matahari dengan dan tanpa PCM. Sistem kinerja, seperti pengumpulan efisiensi telah diukur dan dibandingkan antara sistem dengan dan tanpa PCM. Dalam kondisi pengoperasian yang sama, sistem dengan PCM memiliki kinerja yang jauh lebih baik daripada tanpa PCM, fluktuasi kolektor dengan PCM 30% lebih sedikit daripada tanpa PCM. Sehingga sistem dengan PCM

terbukti lebih efektif dan bermanfaat dalam penerapan energi matahari. Pendekatan komparatif numerik tentang penambahan PCM di dalam pemanas air tenaga matahari juga telah ditinjau oleh Bouhal [11]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemilihan metode numerik berperan penting dalam mendeskripsikan secara efisien fenomena perubahan fasa dan sistem kinerja termal. Proses optimasi peleburan dan pemadatan pada system pemanas air tenaga matahari yang terintegrasi dengan kolektor penyimpan panas telah dianalisa oleh Allouhi [12] dengan hasil optimasi dapat diperoleh ketika laju aliran massa sebesar $0,0015 \text{ kg / s}$ dengan ketebalan PCM $0,01 \text{ m}$ dan temperatur 313 K .

Seiring dengan perkembangan zaman, sistem pemanas air tenaga matahari saat ini menggunakan prinsip *thermosifon*. Eksperimen dan simulasi dari sistem pemanas tenaga matahari telah dipresentasikan oleh Ka-Kui Tse [13] dan hasilnya menunjukkan bahwa efisiensi keseluruhan dari sistem pemanas air tenaga matahari dapat ditingkatkan dengan optimasi desain fisik lebih lanjut. Sedangkan untuk validasi data antara metode matematis dan metode eksperimen menunjukkan bahwa temperatur maksimum air panas terjadi pada pukul 16.00 masing-masing sebesar $65,25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $71,19 \text{ }^{\circ}\text{C}$, dan $69,46 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [14]. Garnier [15] telah mempresentasikan analisis dinamika fluida komputasi atau yang lebih dikenal dengan istilah *computational fluid dynamic* (CFD) dengan aliran internal dan konfigurasi perpindahan panas dalam kolektor dan membandingkan kinerjanya dengan *prototipe* yang dikembangkan sebelumnya menggunakan pengujian empiris. Studi tentang simulasi pemanas air tenaga matahari juga telah diteliti oleh Badiei dan Eslami [16] dengan kolektor pelat datar yang terintegrasi lapisan PCM dan distribusi temperatur yang dihasilkan juga dianalisa selama dua hari yang berbeda yaitu musim panas dan musim dingin di Shiraz, Iran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa meskipun sistem dengan PCM memiliki temperatur keluar yang lebih rendah di pagi hari, air panas dapat disuplai dalam durasi yang lebih lama di malam hari saat pemakaian.

Dari kajian yang telah dibahas sebelumnya dapat disimpulkan bahwa simulasi numerik dengan analisa *computational fluid dynamic* (CFD) sangat penting dilakukan sebelum menghadirkan sebuah *prototipe* dari suatu produk. Dalam studi kali ini, sebuah pemanas air tenaga matahari yang terintegrasi dengan PCM *storage* sebagai penyimpan energi panas atau *termal energy storage* (TES) dengan sistem *thermosifon* disimulasikan dan diteliti secara eksperimental. Empat pemodelan sistem pemanas air tenaga matahari dengan dua kolektor panas yang berbeda, yaitu pelat absorber dengan dan tanpa PCM *storage*, dan juga dengan tiga ketebalan PCM yang berbeda, yaitu 0,015 m, 0,01 m, dan 0,006 m telah dibuat dan kinerjanya disimulasikan secara numerik. Berdasarkan uraian latar belakang di atas maka dilakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh penggunaan penyimpanan PCM pada sistem pemanas air tenaga matahari dengan judul: ***Pengembangan Sistem Pemanas Air Tenaga Matahari dengan Variasi PCM Storage.***

1.2 RUMUSAN MASALAH

Rumusan masalah dalam penelitian ini antara lain :

1. Bagaimana pengaruh intensitas matahari terhadap kinerja dari sistem pemanas air tenaga matahari dengan dan tanpa PCM *storage*.
2. Bagaimana visualisasi perubahan temperatur yang terjadi pada sistem pemanas air tenaga matahari dengan dan tanpa PCM *storage*.
3. Bagaimana perbandingan efisiensi antara sistem pemanas air tenaga matahari konvensional tanpa PCM *storage* dan sistem pemanas air tenaga matahari yang menggunakan PCM *storage* dengan metode simulasi numerik.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Berdasarkan rumusan masalah di atas, penelitian ini memiliki beberapa tujuan utama antara lain :

1. Menganalisa pengaruh intensitas matahari terhadap kinerja dari sistem pemanas air tenaga matahari dengan dan tanpa PCM storage.
2. Menganalisa bagaimana visualisasi perubahan temperatur yang terjadi pada sistem pemanas air tenaga matahari dengan dan tanpa PCM storage.
3. Menganalisa bagaimana perbandingan efisiensi antara sistem pemanas air tenaga matahari konvensional tanpa PCM storage dan sistem pemanas air tenaga matahari yang menggunakan PCM storage dengan metode simulasi numerik.

1.4 BATASAN MASALAH

Melihat kompleksitas permasalahan di atas, maka dalam penelitian ini perlu ditetapkan batasan masalah sebagai berikut :

1. Pengujian dilakukan menggunakan metode simulasi numerik dengan pemodelan geometri yang disimulasikan masing-masing terdiri dari satu buah pipa, satu buah pelat absorber baik itu yang datar untuk konvensional tanpa PCM *storage*, atau yang berbentuk V untuk sistem pemanas air tenaga matahari dengan PCM *storage*, serta satu buah PCM *storage* dengan ketebalan PCM yakni 0,015 m, 0,01 m, dan 0,006 m.
2. Pengujian dilakukan menggunakan metode simulasi numerik dengan variasi intensitas radiasi matahari yang konstan yaitu : 400 W/m², 700 W/m², dan 1000 W/m².
3. Data hasil pengujian eksperimen akan digunakan sebagai pembanding untuk pengujian dengan metode simulasi numerik.

1.5 MANFAAT PENELITIAN

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah :

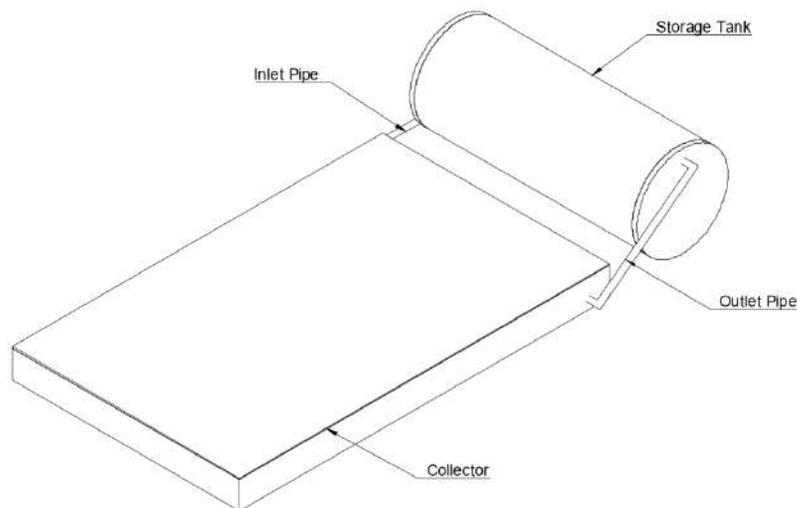
1. Memberikan informasi tentang simulasi numerik sebuah sistem pemanas air tenaga matahari dengan modifikasi pelat absorber berbentuk V yang dilengkapi PCM *storage*.
2. Memberikan penjelasan bagaimana pengaruh penyerapan panas, kehilangan energi panas ke permukaan dan perpindahan energi panas ke fluida kerja serta penyimpanan energi panas pada *storage*.
3. Memberikan penjelasan pengaruh penggunaan PCM *storage* pada unjuk kerja pemanas air tenaga matahari.
4. Memberikan informasi mengenai perbandingan sebuah eksperimen yang dilakukan di lapangan dengan hasil simulasi numerik yang dilakukan secara komputasi.
5. Sebagai referensi desain untuk aplikasi nyata pemanfaatan teknologi untuk kepentingan masyarakat luas.
6. Mendukung konsep *green energy building*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. SISTEM PEMANAS AIR TENAGA MATAHARI

Sistem pemanas air tenaga matahari adalah sebuah alat yang digunakan untuk mentransfer energi panas matahari menjadi energi panas air. Radiasi matahari ditransmisikan melalui penutup yang transparan dan diubah menjadi panas pada pelat penyerap. Selanjutnya, energi panas pada pelat absorber ditransfer ke air yang mengalir dalam pipa [17]. Karena adanya beda temperatur air pada pipa yang masuk dan keluar dari kolektor maka air yang bertemperatur lebih tinggi dengan sendirinya akan berpindah dari kolektor panas menuju tanki penyimpanan, sistem ini kita kenal dengan istilah *thermosifon*. Skema dari sistem pemanas air tenaga matahari *thermosifon* dapat kita lihat pada gambar 1 berikut.



Gambar 1: Skema sistem pemanas air tenaga matahari *thermosifon*

Sistem pemanas air tenaga matahari memiliki komponen utama yang terbuat dari selembar bahan konduktif termal yang disebut pelat penyerap

(*absorber*) yang kepadanya menempel pipa-pipa pembawa cairan (air) atau biasa disebut pipa pemanas (*riser pipe*). Absorber ini terbuat dari lembaran metal tipis dan permukaannya dibuat berwarna hitam untuk memaksimalkan penyerapan radiasi matahari. Menurut teori yang ada, benda hitam adalah penyerap radiasi yang baik. Penghitaman bisa dilakukan dengan pengecatan warna hitam sebagai cara yang paling mudah, atau dengan metoda yang lebih canggih dengan proses pelapisan seperti *elektroplating*, *anodizing*, dan lain-lain. Cara pelapisan canggih tersebut, misal dengan *black chrome* atau *black nickel*, dimaksudkan selain untuk meningkatkan penyerapan material terhadap radiasi matahari, juga untuk merendahkan emitansinya terhadap gelombang sinar inframerah [18].

Untuk memaksimalkan terjadinya perpindahan panas yang baik dari absorber ke pipa-pipa pemanas, bahan dasar absorber harus mempunyai konduktivitas termal yang baik. Beberapa bahan dasar yang dapat dipakai sebagai absorber diberikan seperti pada tabel 1 berikut.

Tabel 1. Konduktivitas termal beberapa bahan kolektor matahari tertentu [19]

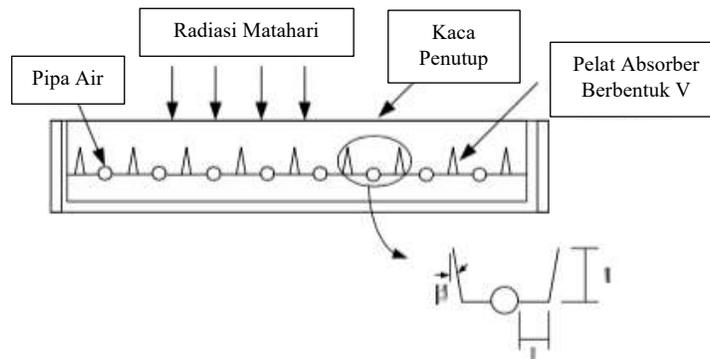
Bahan	Konduktivitas termal (k), W/(m.K)
Tembaga	387.6
Alumunium	202.4
Timah putih	66.0
Baja, 1% karbon	45.0
Baja tahan karat	16.0

Lembaran kaca transparan digunakan sebagai penutup permukaan kolektor. Penutup kaca ini berfungsi untuk meneruskan radiasi matahari berupa gelombang pendek dan juga mencegah panas yang keluar dari kolektor ke udara luar [20]. Seperti diketahui bahwa kaca memiliki sifat transparan terhadap gelombang ultraviolet dan cahaya tampak (kedua jenis gelombang cahaya ini mendominasi radiasi matahari), tetapi tidak transparan terhadap gelombang sinar inframerah sebagaimana yang terjadi pada efek rumah kaca, sehingga

kerugian panas akibat radiasi dari permukaan absorber keluar kolektor dapat diminimalkan [21]. Meskipun demikian masih terdapat kerugian panas ke permukaan karena pengaruh konveksi udara yang bergerak di dalam ruang antara pelat absorber dan kaca. Perbedaan antara koefisien kerugian panas dan temperatur kaca yakni kurang dari 9% pada jarak udara yang normal antara pelat dan kaca, dan menjadi 14% lebih besar jika jarak antara pelat dan kaca diperkecil [22].

Beberapa penelitian untuk menganalisis unjuk kerja kolektor, modifikasi bentuk pelat absorber dan material kolektor telah dilakukan. Analisis energi dan eksergi dari kolektor pelat datar untuk mengetahui kondisi operasi optimal telah dilakukan, hasilnya menunjukkan bahwa temperatur air masuk sekitar 40° lebih dari temperatur lingkungan serta laju aliran yang rendah akan meningkatkan performansi kolektor keseluruhan [23]. Penelitian menggunakan kolektor pelat datar dengan kemiringan 22° mencapai temperatur air rata-rata 44,44 °C jika dibandingkan dengan pelat datar dengan posisi horizontal yang hanya mencapai 42,98 °C [24].

Penggunaan kolektor pelat datar dengan posisi miring 22° mampu menaikkan temperatur air jika dibandingkan dengan pelat datar dengan posisi horizontal akan tetapi efisiensinya masih terbilang rendah. Penelitian selanjutnya yaitu menggunakan pelat absorber berbentuk V yang menunjukkan performa yang lebih baik jika dibandingkan dengan kolektor pelat datar. Hasil pengujian menunjukkan bahwa performansi kolektor dengan pelat absorber bentuk V terhadap kolektor pelat datar meningkat masing-masing sebesar 2,36 % pada debit 0,5 Liter per menitnya dan 4,23 % pada debit air 2,0 Liter per menitnya [25]. Pelat absorber yang digunakan adalah pelat absorber berbentuk-V. Pelat absorber berbentuk-V dapat dilihat pada gambar 2 berikut.



Gambar 2: Pelat absorber berbentuk-V

Meskipun demikian masih terdapat kerugian panas ke permukaan karena konveksi udara yang bergerak di dalam ruang antara absorber dan kaca. Rugi-rugi panas konveksi ini pada kenyataannya justru mengambil porsi yang terbesar sekitar 70%-80% dari total rugi-rugi panas ke permukaan, menyebabkan efisiensi termal kolektor rendah sekitar 20%-40%. Oleh karena itu dilakukan penelitian mengenai sistem pemanas air tenaga matahari yang diintegrasikan dengan *Phase Change Material* (PCM) yang secara spesifik menggunakan *paraffin wax* sebagai PCMnya [26] dan dengan dimensi kolektor serta tangki yang lebih kecil [27]. Karena PCM *storage* pada sistem pemanas air tenaga matahari sangat berpengaruh untuk meningkatkan efisiensi dan masih banyaknya jenis PCM yang belum diintegrasikan dengan sistem pemanas air tenaga matahari maka simulasi komputasi perlu dilakukan. Penjabaran kajian pustaka mengenai PCM dan simulasi komputasi akan dijelaskan pada sub-bab selanjutnya.

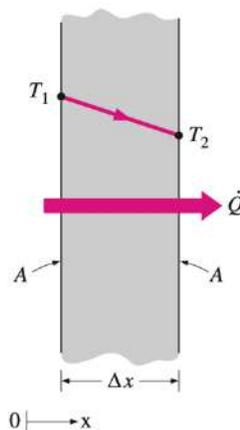
2.2. PERPINDAHAN PANAS

Perpindahan panas didefinisikan sebagai penentuan laju aliran pada perpindahan energi dimana bentuk energi dapat dipindahkan dari satu sistem ke sistem lainnya sebagai hasil dari perbedaan temperatur [28]. Analisis termodinamika menjelaskan seberapa banyak panas yang harus dipindahkan pada sebuah perubahan keadaan tertentu untuk memenuhi prinsip hukum kekekalan energi dimana sistem mencapai keadaan setimbang (tidak ada perbedaan temperatur).

Perpindahan panas yang terjadi pada sebuah sistem terdiri atas 3 macam, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi.

2.2.1 Konduksi

Konduksi adalah perpindahan energi dari partikel zat yang bertemperatur tinggi ke partikel zat lain yang bertemperatur lebih rendah sebagai hasil dari interaksi antara partikel zat tersebut. Konduksi dapat terjadi pada fluida padat, cair, maupun gas [28]. Peristiwa konduksi yang terjadi pada sebuah partikel zat dapat dilihat pada gambar 3 berikut.



Gambar 3. Konduksi yang melewati dinding setebal Δx dan luas penampang A

Dari gambar diatas, perbedaan temperatur antara kedua sisi dinding benda disebut $\Delta T = T_2 - T_1$, sehingga laju aliran panas konduksi yang melewati dinding berbanding lurus dengan perbedaan temperatur yang melintasi dinding dan luas area perpindahan panas, akan tetapi berbanding terbalik dengan ketebalan dari dinding tersebut. Hal ini ditunjukkan pada persamaan (1) yaitu :

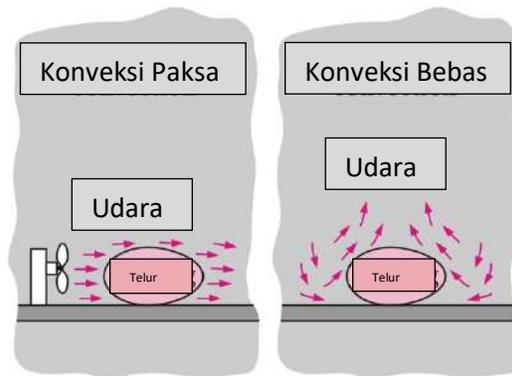
$$Q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

Dimana konstanta k adalah konduktifitas termal dari material yang mengalami konduksi panas. Persamaan diatas disebut juga Hukum Fourier's pada konduksi panas. Pada persamaan (1) di atas, untuk laju aliran konduksi perpindahan panas pada kondisi *steady* (tunak) dapat juga dilihat sebagai persamaan untuk mencari konduktifitas termal k . Konduktifitas termal dari sebuah material merupakan ukuran dari material tersebut untuk menyalurkan panas.

2.2.2 Konveksi

Konveksi adalah model transfer energi antara permukaan padat dan fluida cair ataupun gas yang bergerak di dekat permukaan padat tersebut, hal ini melibatkan efek gabungan dari peristiwa konduksi dan pergerakan fluida tersebut [28]. Semakin cepat pergerakan dari suatu fluida membuat perpindahan panas konveksi menjadi lebih baik. Secara umum konveksi dibedakan menjadi dua macam, yaitu konveksi paksa dan konveksi bebas. Konveksi disebut konveksi paksa jika fluidanya diberikan gaya untuk mengalir melewati permukaan benda dengan faktor eksternal seperti kipas, pompa, ataupun angin. Sebaliknya, konveksi disebut konveksi bebas jika pergerakan fluida yang mengalir melewati permukaan benda didasari oleh gaya apung yang disebabkan oleh perbedaan densitas karena adanya variasi temperatur dalam fluida tersebut. Sebagai contoh perbedaan antara kedua jenis konveksi tersebut dapat kita lihat pada gambar 4 berikut ini dimana temperatur tinggi dari sebuah telur panas

berpindah ke temperatur yang lebih rendah pada udara di sekeliling telur tersebut.



Gambar 4. Konveksi paksa dan konveksi bebas

Dengan menggunakan Hukum Newton pada pendinginan, laju perpindahan panas konveksi dinilai searah dengan perbedaan temperatur dan luas penampang permukaan yang dilalui oleh perpindahan panas konveksi dan dituliskan dalam persamaan (2) berikut :

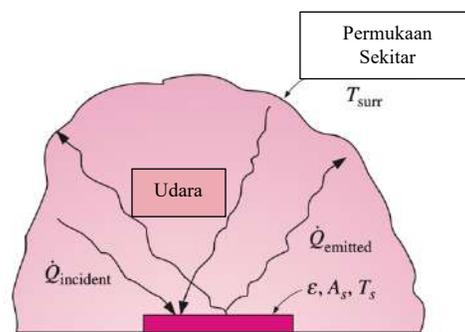
$$Q = hA_s (T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Dimana h merupakan koefisien perpindahan panas konveksi dalam satuan $W/m^2 \cdot ^\circ C$ atau $Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$, A_s merupakan luas area permukaan yang dilalui oleh perpindahan panas konveksi dalam satuan m^2 , T_s adalah temperatur permukaan dan T_∞ temperatur fluida yang berjarak jauh dari permukaan. Perlu dicatat bahwa pada permukaan, temperatur fluida dinyatakan sama dengan temperatur permukaan benda padat.

2.2.3 Radiasi

Radiasi adalah energi yang dipancarkan oleh suatu hal dalam bentuk gelombang elektromagnetik (atau cahaya) sebagai hasil dari pergantian dalam konfigurasi elektromagnetik pada atom atau molekul [28]. Tidak seperti konduksi dan konveksi, perpindahan energi pada radiasi tidak memerlukan media perantara untuk berpindah. Faktanya, transfer energi oleh radiasi merupakan yang tercepat (secepat kecepatan cahaya) dan tetap dapat bergerak dalam ruang hampa udara. Inilah mengapa energi dari matahari dapat mencapai bumi.

Radiasi merupakan fenomena volumetrik, dan semua benda baik itu padat, cair maupun gas dapat menyerap dan memancarkan radiasi. Namun, radiasi biasanya dihubungkan pada fenomena permukaan untuk benda padat yang tidak tembus cahaya terhadap radiasi termal seperti logam, kayu, dan batu karena radiasi yang dipancarkan dari bagian dalam benda tersebut tidak pernah mencapai permukaan dan peristiwa radiasi pada benda tersebut biasanya diserap dalam beberapa mikron dari permukaan. Peristiwa perpindahan panas radiasi antara permukaan benda dengan permukaan sekitar dapat kita lihat pada gambar 5 berikut ini.



Gambar 5. Perpindahan panas radiasi antara permukaan benda dan sekitarnya

Dari gambar diatas, ketika emisivitas permukaan ϵ dan luas permukaan A_s pada temperatur absolut T_s benar-benar tertutup oleh permukaan yang jauh

lebih besar (atau benda hitam) dipisahkan oleh gas seperti udara tidak mengganggu radiasi, maka laju aliran perpindahan panas radiasi antara dua permukaan seperti gambar diatas dapat dihitung menggunakan persamaan (3) berikut :

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{surr}^4) \quad (3)$$

Dimana ε merupakan emisivitas dari permukaan benda yang nilainya berada diantara $0 \leq \varepsilon \leq 1$ dan σ merupakan konstanta Stefan-Boltzmann dengan nilai $= 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ atau $0,1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/h.ft}^2 \cdot \text{R}^4$. Adapun besar nilai emisivitas dari beberapa permukaan material pada temperatur 300 K dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Emisivitas dari beberapa material pada temperatur 300 K [28]

Jenis Material	Emisivitas
Aluminium Foil	0,07
Anodized Aluminium	0,82
Polished Copper	0,03
Polished Gold	0,03
Polished Silver	0,02
Polished Stainless Steel	0,17
Black Paint	0,98
White Paint	0,90
White Paper	0,92 – 0,97
Asphalt Pavement	0,85 – 0,93
Red Brick	0,93 – 0,96
Human Skin	0,95
Wood	0,82 – 0,92
Soil	0,93 – 0,96
Water	0,96
Vegetation	0,92 – 0,96

2.3. TAHAPAN PERHITUNGAN EFISIENSI KOLEKTOR

2.3.1 Analisa perpindahan panas konveksi

Adapun koefisien perpindahan panas konveksi yaitu:

- a. Koefisien perpindahan panas konveksi antara kaca penutup dan udara luar

Koefisien perpindahan panas konveksi oleh kaca penutup transparan terhadap udara luar [29], didasarkan pada hembusan angin di atas penutup transparan sehingga menggunakan persamaan konveksi bebas, dimana :

Bilangan Reynold, Re

$$Re = V \frac{L}{\nu} \quad (4)$$

Dimana: V = kecepatan angin (m/s)
 ν = viskositas kinematik (m^2/s)
 L = Panjang karakteristik penutup (m)

Bilangan Nusselt, N_u

$$Nu = 0,332Re^{1/2}Pr^{1/3} \quad (5)$$

$$h_w = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad (6)$$

Dimana: k = koefisien konveksi (W/m.K)
 L = Panjang penutup (m)

b. Koefisien perpindahan panas konveksi antara pelat absorber dengan penutup

Koefisien perpindahan panas konveksi antara pelat absorber dengan penutup (h_{c_p-c}) dimana udara terselungkup di dalam ruang tertutup dan dengan sudut kemiringan kolektor [28] didapatkan dengan persamaan berikut:

Bilangan Nusselt, N_u

$$Nu = Nu_{\theta=0^\circ} \left(\frac{Nu_{\theta=90^\circ}}{Nu_{\theta=0^\circ}} \right)^{\theta/\theta_{cr}} (\sin \theta_{cr})^{\theta/4\theta_{cr}} \quad (7)$$

$$Nu_{\theta=0^\circ} = 0,069 Ra_L^{1/3} Pr^{0,074} \quad (8)$$

$$Nu_{\theta=90^\circ} = 0,18 \left(\frac{Pr}{0,2Pr} Ra_L \right)^{0,29} \quad (9)$$

Dimana: θ = sudut kemiringan kolektor

θ_{cr} = sudut kritis kemiringan kolektor

Rayleigh Number, R_a

$$R_a = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (10)$$

Dimana: ΔT : Beda temperatur antara pelat dengan penutup (K)

L : Jarak pelat dengan penutup (m)

α : Difusifitas termal (m^2/s)

Sehingga diperoleh:

$$h_{c_{p-c}} = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad (11)$$

Dimana: L : Panjang karakteristik penutup (m)

c. Koefisien perpindahan panas konveksi antara pelat absorber dengan fluida kerja.

Koefisien perpindahan panas konveksi antara pelat absorber dengan fluida kerja merupakan konveksi bebas yang melibatkan aliran dalam pipa (*internal flow*) terselungkup berperilaku seperti fluida yang konduktivitas termalnya kNu akibat arus konveksi. Oleh karena itu kNu disebut konduktivitas termal efektif [28], sehingga:

$$K_{eff} = kNu \quad (12)$$

Hubungan k_{eff} berlaku untuk $0,70 \leq Pr \leq 6000$ dan $10^2 \leq F_{cyl} Ra_L \leq 10^7$, maka bilangan Nusselt untuk aliran laminar dalam pipa menjadi :

$$Nu = 0,386 \left(\frac{Pr}{0,861 + Pr} \right)^{1/4} (F_{cyl} Ra_L)^{1/4} \quad (13)$$

Dimana: F_{cyl} : Faktor geometrik untuk silinder konsentrik

$$F_{cyl} = \frac{[\ln(\frac{D_o}{D_i})]}{Lc^3 (D_i^{-\frac{3}{5}} + D_o^{-\frac{3}{5}})^5} \quad (14)$$

Dimana: D_o : Diameter luar pipa

D_i : Diameter dalam pipa

2.3.2 Analisa perpindahan panas radiasi.

Adapun koefisien perpindahan panas radiasi yaitu:

a. Koefisien perpindahan panas radiasi antara kaca penutup dengan udara luar.

Koefisien perpindahan panas radiasi antara kaca penutup terhadap udara luar [30] dapat dihitung dengan persamaan :

$$h_{r_{c-a}} = \varepsilon \frac{\sigma(T_c^4 + T_s^4)}{(T_c - T_s)} \quad (15)$$

Dimana: ε = *emisivitas* penutup

σ = konstanta Stefan-Boltzman ($5,6697 \times 10^{-8}$, W/m²K⁴)

T_c = temperatur penutup (K)

T_s = temperatur udara luar (K)

T_{sky} adalah temperatur iklim yang berkaitan dengan temperatur udara luar [30], sehingga dapat dihitung berdasarkan:

$$T_{sky} = 0,0552 \cdot T_a^{1,5} \quad (16)$$

b. Koefisien perpindahan panas radiasi pelat-penutup

Koefisien perpindahan panas radiasi pelat dengan penutup yaitu:

$$h_{r_{p-c}} = \frac{\sigma(T_p^2 + T_c^2)(T_p + T_c)}{\frac{1-\varepsilon_p}{\varepsilon_p} + \frac{1}{F_{1-2} \cdot A_p} + \frac{1-\varepsilon_c}{\varepsilon_c \cdot A_c}} \quad (17)$$

Dimana: ε_c : Emisivitas penutup

ε_p : Emisivitas pelat

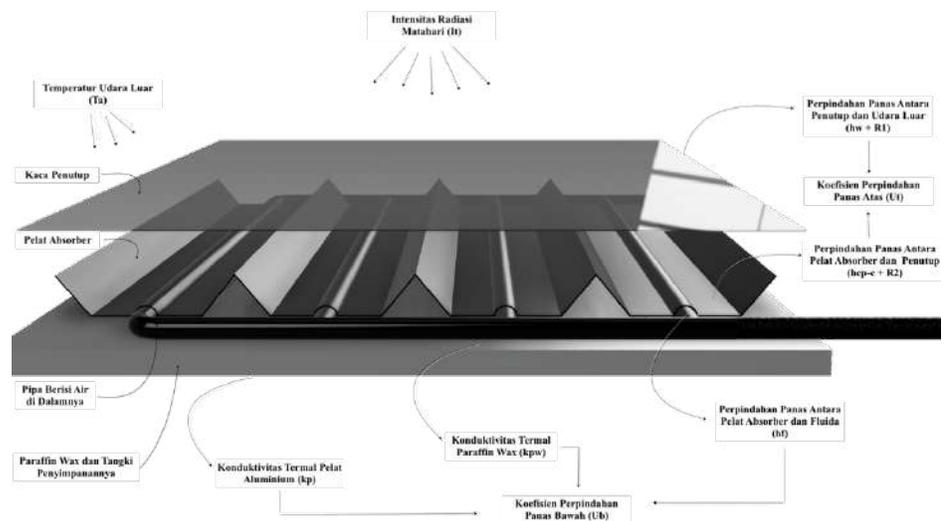
A_p : Luas pelat absorber (m^2)

A_c : Luas kaca penutup (m^2)

2.3.3 Koefisien perpindahan panas kolektor

Koefisien perpindahan panas kolektor yang akan dihitung [29], yaitu :

- a. Koefisien perpindahan panas bagian atas kolektor atas (U_t) dari rangkaian termal dimana rangkaian termal terdiri dari rangkaian termal 1 (R_1) dan rangkaian termal 2 (R_2), hal ini biasanya dikenal dengan sebutan jala-jala termal seperti terlihat pada gambar 6 berikut ini.



Gambar 6. Ilustrasi rangkaian jala-jala termal pada kolektor

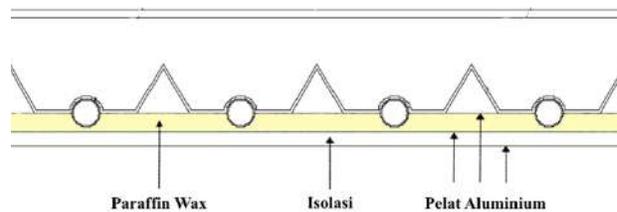
Dari gambar di atas terlihat kontak antara rangkaian termal 1 (R_1) dengan rangkaian termal 2 (R_2), hal ini membuat persamaan untuk mengetahui koefisien perpindahan panas bagian atas kolektor (U_t) adalah sebagai berikut :

$$R_1 = \frac{1}{h_w + h_{r_{c-a}}} \quad (18)$$

$$R_2 = \frac{1}{h_{c_{p-c}} + h_{r_{p-c}}} \quad (19)$$

$$U_t = \frac{1}{(R_1 + R_2)} \quad (20)$$

b. Koefisien perpindahan panas bagian bawah kolektor



Gambar 7. Urutan material bagian bawah kolektor

$$U_b = \frac{1}{\left[\frac{L_a}{k_a} + \frac{L_F}{k_F} + \frac{L_{pw}}{k_{pw}} + \frac{1}{h_f} \right]} \quad (21)$$

- Dimana:
- L_a : ketebalan aluminium foil (m)
 - L_F : ketebalan foam / isolasi (m)
 - L_{pw} : ketebalan paraffin wax (m)
 - k_p : konduktivitas foam / isolasi (W/mK)
 - k_a : konduktivitas aluminium foil (W/mK)
 - k_{pw} : konduktivitas paraffin wax (W/mK)
 - h_f : koefisien konveksi pelat ke air (W/m²K)

Sehingga koefisien perpindahan panas total kolektor adalah :

$$U_L = U_t + U_b \quad (22)$$

2.3.4 Efisiensi kolektor (Teoritis)

Efisiensi kolektor dipengaruhi oleh radiasi matahari yang diserap:

a. Faktor efisiensi kolektor (F'):

Untuk mendapatkan faktor efisiensi kolektor, perlu diketahui massa absorber dan faktor bentuk dari kolektor tersebut. Sehingga persamaan massa dan persamaan faktor bentuk yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k\delta}} \quad (23)$$

$$F = \frac{\tanh[m(W-D_o)/2]}{m(W-D_o)/2} \quad (24)$$

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left[\frac{1}{U_L [D_o + (W-D_o)F]} + \frac{1}{\pi D_i h_{p-f}} \right]} \quad (25)$$

Dimana: W : Jarak antara pipa (m)
 D_o : Diameter luar pipa (m)
 D_i : Diameter dalam (m)
 k : Konduktivitas termal absorber (W/m.K)
 δ : Tebal absorber (m)

b. *Collector flow factor* (F''):

Sementara itu, untuk mendapatkan faktor aliran kolektor, perlu diketahui laju aliran massa dari aliran fluida yang melewati kolektor tersebut. Sehingga persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$\dot{m} = \frac{-U_L \cdot F' \cdot A_c}{C_p \cdot \ln \left[1 - \frac{U_L \cdot (T_{out} - T_{in})}{S - U_L(T_{in} - T_A)} \right]} \quad (26)$$

$$F'' = \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_c U_L F'} \left[1 - \frac{\frac{S}{U_L} (T_{f,o} - T_a)}{\frac{S}{U_L} (T_{f,i} - T_a)} \right] \quad (27)$$

Dimana: \dot{m} : Laju aliran massa (kg/s)

S : Radiasi matahari yang diserap oleh absorber

A_c : Luas absorber (m²)

$T_{f,o}$: Temperatur fluida keluar (K)

$T_{f,i}$: Temperatur fluida masuk (K)

c. Faktor pelepasan panas (F_R) [29]:

$$F_R = F' \cdot F'' \quad (28)$$

Dari persamaan faktor pelepasan panas oleh kolektor maka dapat diketahui panas yang berguna pada kolektor dengan menggunakan persamaan berikut :

$$q_u = A_c \cdot F_R [S - U_L(T_i - T_a)] \quad (29)$$

Selanjutnya diperoleh efisiensi kolektor (η) dengan persamaan :

$$\eta = \frac{q_u}{A_c I_T} \quad (30)$$

Dimana : I_T = intensitas matahari total (W/m^2)

2.4. PHASE CHANGE MATERIAL (PCM)

Penyimpanan energi bisa dilakukan dalam bentuk panas sensibel, panas laten, atau hasil energi kimia yang dapat balik (reversibel). Energi yang disimpan tersebut tidak hanya digunakan untuk memanaskan suatu fluida, tetapi juga mampu untuk mendinginkan atau mempertahankan temperatur suatu fluida agar tetap konstan. Penyimpanan energi kimia belum digunakan secara praktis. Hal ini disebabkan biaya dan penggunaannya memerlukan perhatian khusus. Saat ini, penelitian tentang material penyimpan panas dipusatkan pada panas sensibel dan panas laten [25].

A. Panas Laten

Suatu bahan akan mengalami perubahan temperatur bila terjadi perpindahan panas antara benda dengan lingkungannya. Pada suatu situasi tertentu, aliran panas ini tidak merubah temperaturnya. Hal ini terjadi bila bahan mengalami perubahan fasa. Misalnya padat menjadi cair (mencair), cair menjadi uap (mendidih) dan perubahan struktur kristal (zat padat). Energi yang diperlukan disebut panas transformasi atau biasa juga disebut kalor transformasi. Kalor yang diperlukan untuk merubah fasa dari materi bermassa m adalah:

$$Q = mL_e \quad (31)$$

Dimana: Q : Kalor laten zat (J)

Le : Kapasitas kalor spesifik laten (J/kg)

m : Massa zat (kg)

B. Panas Sensibel

Tingkat panas atau intensitas panas dapat diukur ketika panas tersebut merubah temperatur dari suatu benda. Perubahan intensitas panas dapat diukur dengan termometer. Ketika perubahan temperatur didapatkan, maka dapat diketahui bahwa intensitas panas telah berubah dan disebut sebagai panas sensibel. Dengan kata lain, panas sensibel adalah panas yang diberikan atau yang dilepaskan oleh suatu jenis benda sehingga temperaturnya naik atau turun tanpa menyebabkan perubahan fasa pada benda tersebut. Material yang digunakan sebagai PCM harus memiliki panas laten yang besar dan konduktifitas termal yang tinggi. PCM tersebut juga harus memiliki temperatur titik cair yang bekerja pada rentang temperatur yang diizinkan, reaksi kimia yang stabil, biaya rendah, tidak beracun, dan tidak menyebabkan korosi. Dari hasil penelitian numerik mengenai sistem pemanas air tenaga matahari yang terintegrasi dengan PCM *storage* menunjukkan bahwa penyimpanan panas laten lebih baik daripada penyimpanan panas sensibel diwaktu siang hari. Penelitian tersebut menggunakan *myristic acid* dan grafit RT42 sebagai PCMnya. Adapun untuk pengoperasian di malam hari, penyimpanan panas laten juga lebih efektif untuk kedua jenis PCM tersebut karena pengaruh kehilangan panas pada penyimpanan panas laten lebih rendah daripada pengaruh kehilangan panas pada penyimpanan panas sensibel [31].

PCM diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu organik dan non organik [32]. PCM organik merupakan PCM dari golongan hidrokarbon, asam/ester atau garam, alkohol, freon, dan polimer. Keuntungan penggunaan PCM organik adalah sifat fisik dan kimia yang stabil dan perilaku termal material yang baik. Kerugian penggunaan PCM ini adalah konduktifitas termal rendah, massa jenis

rendah, titik lebur rendah, kelembapan tinggi, mudah terbakar, dan perubahan volume. PCM non organik merupakan campuran unsur metal pembentuk garam. Keuntungan penggunaan PCM non organik adalah penyimpanan energi yang tinggi, konduktifitas termal tinggi, dan tidak mudah terbakar. Kerugian penggunaan PCM ini adalah mudah menyebabkan pengkaratan, pemisahan unsur ketika terjadi perubahan fasa, dan penurunan suhu yang drastic.

$$Q = mC\Delta T \quad (32)$$

Dimana, Q : Kalor laten zat (J)
 C : Kapasitas kalor spesifik Sensibel (J/kg)
 m : Massa zat (kg)
 ΔT : Perbedaan suhu

2.2.1 PCM Organik

PCM organik dapat berupa alifatik atau organik lain. Umumnya PCM organik mempunyai rentang temperatur yang rendah. PCM organik mahal dan mempunyai rata – rata panas laten per satuan volume serta densitas yang rendah. Sebagian besar PCM organik mudah terbakar di alam. PCM organik dapat dibedakan sebagai *paraffin* dan *non paraffin*.

A. *Paraffin Wax*

Lilin Parafin (*paraffin wax*) digunakan pada pengaplikasian titik didih zat cair yang rendah karena biayanya yang rendah dan sifat fisik kimianya, diantaranya pengering, pemanas, dan pemanas air rumah tangga. Kerugian utamanya dikarenakan rendahnya konduktivitas termal yaitu sebesar 0.2 W/mK. Solusi untuk ini adalah dengan menggabungkan PCM dengan material

konduktivitas termal yang tinggi seperti aluminium, tembaga, dan lain-lain [33].

Tabel 3. Sifat termofisik paraffin wax [31]

Sifat Termofisik	Nilai	
	Solid	Cair
Densitas, g/cm ³	0,861	0,778
Panas Spesifik,	1900	2300
Titik Leleh, °C	55	
Panas Laten, kJ/kg	200 ± 10	

Lilin paraffin adalah campuran senyawa hidrokarbon alkane CH₃-(CH₂)-CH₃. Kristalisasi CH₃- melepaskan sejumlah panas laten. Titik leleh dan panas peleburan laten meningkat dengan semakin panjangnya rantai. Kualifikasi paraffin sebagai bahan penyimpanan panas laten disebabkan oleh rentang suhunya yang sangat luas. Beberapa titik leleh dan panas peleburan laten paraffin dapat dilihat pada tabel 4 berikut.

Tabel 4. Titik Leleh dan Panas Peleburan Laten Beberapa Jenis Paraffin [34].

Jumlah Atom C	Titik Leleh (°C)	Panas Peleburan Laten (kJ/kg)
14	5,5	228
15	10	205
16	16,7	237,1
17	21,7	213
18	28,0	244
19	32,0	222
20	36,7	246
21	40,2	200
22	44,0	249
23	47,5	232
24	50,6	255
25	49,4	238
26	56,3	256
27	58,8	236
28	61,6	253

Lilin paraffin aman digunakan, dapat diprediksi, rendah biaya, dan tidak korosif. Sifat kimianya stabil dibawah temperatur 500 °C, yang menunjukkan perubahan volume kecil untuk melelehkan dan memiliki tekanan uap rendah dalam bentuk leleh. Untuk sifatnya, paraffin menggunakan sistem yang biasanya memiliki siklus beku-leleh yang sangat panjang. Sifat termal dari beberapa tingkatan campuran paraffin tidak benar-benar murni [35] ditunjukkan pada tabel 5.

Tabel 5. Sifat fisik Beberapa Jenis Paraffin [31]

Paraffin ^a	Kisaran Titik Beku (°C)	Panas Campuran (kJ/kg)
6106	42-44	189
P116 ^c	45-48	210
5838	48-50	189
6035	58-60	189
6403	62-64	189
6499	66-68	189

Titik leleh dari kenaikan alkana dengan menaikkan jumlah atom karbon. Sebagian dari beberapa karakteristik umum paraffin seperti pelelehan kongruen dan sifat nukleasi yang baik. Paraffin menunjukkan sifat yang tidak diinginkan seperti : konduktivitas termal yang rendah, tidak cocok dengan bahan yang mengandung plastik, dan mudah terbakar. Semua efek yang tidak diinginkan sebagiannya dapat dieliminasi dengan sedikit memodifikasi lilin dan penyimpanannya.

B. *Non Paraffin*

PCM dari bahan non paraffin merupakan PCM yang banyak ditemui dengan variasi sifat yang cukup banyak. Masing – masing bahan ini mempunyai karakteristik / sifat khusus tidak seperti paraffin yang mempunyai sifat hampir sama. Jenis ini merupakan kategori terbanyak dari PCM. Diantara bahan – bahan non paraffin tersebut yang paling banyak adalah jenis ester, asam lemak, alkohol dan jenis – jenis glikol [35] & [36]. Kelompok ini sering kali dibedakan

menjadi kelompok asam lemak dan organik non paraffin lain. Bahan – bahan ini umumnya mudah menyala dan tidak boleh dibiarkan pada temperatur tinggi, dekat nyala dan bahan pengoksidasi. Penjelasan mengenai PCM non paraffin dan PCM asam lemak dapat dilihat pada tabel 6 dan 7 berikut.

Tabel 6. Titik leleh dan panas peleburan laten beberapa non paraffin [31]

Material	Titik leleh (°C)	Panas laten (kJ/kg)
Formic acid	7,8	247
Caprilic acid	16,3	149
Glycerin	17,9	198,7
α-Lactic acid	26	184
Methyl palmitat	29	205
phenol	41	120
Bee wax	61,8	177
Gyolic acid	63	109
Azobenzene	67,1	121
Acrylic acid	68,0	115
glutaric acid	97,5	156
Catechol	104,3	207
Quenon	115	171
Benzoic acid	124	167
benzamide	127,2	169,4
oxalate	54,3	178
Alpha naphthol	96	163

Tabel 7. Titik leleh dan panas peleburan laten beberapa asam lemak [31]

Material	Titik leleh (°C)	Panas laten (kJ/kg)
Acetic acid	16,7	184
Poly ethylene glycol	20-25	146
Capric acid	36	152
Eladic acid	47	218
Lauric acid	49	178
Pentadecanoic acid	52,5	178
Tristearin	56	190
Mirystic acid	58	199
Palmatic acid	55	163
Stearic acid	69,4	199
acetamide	81	141

2.2.2 PCM Non Organik

PCM non organik diklasifikasikan sebagai hidrat garam (*salt hydrate*) dan logam (*metallic*). PCM jenis ini tidak terlalu dingin dan panas peleburan tidak akan berkurang selama bersirkulasi.

A. Hidrat Garam

Hidrat garam dapat dilihat sebagai campuran garam anorganik dengan air membentuk padatan kristal tertentu dari formula umum $AB.nH_2O$. Perubahan bentuk padat-cair dari hidrat garam merupakan sebuah proses dehidrasi dari hidrasi garam. Hidrat-hidrat garam biasanya meleleh menjadi sebuah hidrat garam dengan mol yang sangat kecil. Pada titik lelehnya, Kristal-kristal hidrat terpecah menjadi garam anhidrat dan air atau ke dalam hidrat yang lebih rendah dan air. Penjelasan mengenai titik leleh dan panas peleburan laten beberapa jenis hidrat garam dapat kita lihat pada tabel 8 berikut.

Tabel 8. Titik leleh dan panas peleburan laten beberapa hidrat garam [31]

Material	Titik leleh(°C)	Panas laten (kJ/kg)
$K_2HPO_4.6H_2O$	14,0	109
$FeBr_3.6H_2O$	21,0	105
$Mn(NO_3)_2.6H_2O$	25,5	148
$FeBr_3.6H_2O$	27,0	105
$CaCl_2.12H_2O$	29,8	174
$LiNO_3.2H_2O$	30,0	296
$LiNO_3.3H_2O$	30	267
$Na_2O_3.10H_2O$	32,0	241
$Na_2SO_4.10H_2O$	32,4	173
$KFe(SO_4)_2.12H_2O$	33	138
$CaBr_2.6H_2O$	34	124
$LiBr_2.2H_2O$	34	134
$Zn(NO_3)_2.6H_2O$	36,1	223

Hidrat – hidrat garam merupakan jenis PCM yang paling penting dan banyak dipelajari pada sistem penyimpanan energi. Sifat-sifat yang paling menonjol dari PCM jenis ini adalah: panas peleburan laten per-satuan volumenya tinggi, konduktivitas panas relatif tinggi (hampir dua kali paraffin) dan perubahan volume selama meleleh kecil. PCM jenis ini juga tidak terlalu korosif, kompatibel dengan plastik dan hanya beberapa jenis yang beracun. Banyak jenis hidrat garam yang harganya tidak terlalu mahal untuk digunakan sebagai penyimpan panas.

B. Logam (*Metallic*)

Jenis ini juga mencakup logam dengan titik leleh rendah dan campuran

logam. PCM jenis ini belum banyak menjadi perhatian karena sangat berat. Namun, jika volume menjadi perhatian, jenis ini menjadi pilihan karena mempunyai panas peleburan laten per-satuan volume yang tinggi. Disamping itu juga mempunyai konduktivitas panas tinggi sehingga tidak diperlukan tambahan bahan pengisi yang berat. Adapun titik leleh dan panas peleburan laten dari beberapa logam terjabarkan pada tabel 9 berikut.

Tabel 9. Titik leleh dan panas peleburan laten beberapa logam / *metallic* [31]

Material	Titik leleh (°C)	Panas laten (kJ/kg)
Gallium-gallium	29,8	-
Antimony eutectic		
Gallium	30,0	80,3
Cerrolow eutectic	58	90,9
Bi-Cd-In eutectic	61	25
Cerrobend eutectic	70	32,6
Bi-Pb-In eutectic	70	29
Bi-In eutectic	72	25
Bi-Pb-tin eutectic	96	-
Bi-Pb eutectic	125	-

2.2.3 PCM Kombinasi

PCM kombinasi adalah sebuah komposisi dengan lelehan terendah dari dua komponen atau lebih, masing-masing meleleh dan membeku membentuk campuran dari komponen-komponen kristal selama proses kristalisasi [37]. PCM jenis ini hampir selalu meleleh dan membeku tanpa pemisahan karena mereka membeku menjadi sebuah campuran kristal, memberikan sedikit kesempatan pada komponen-komponennya untuk memisahkan diri. Pada saat meleleh kedua komponen mencair secara berurutan dengan pemisahan yang tidak diinginkan. Titik leleh dan panas peleburan laten dari PCM kombinasi dapat kita lihat pada tabel 10 berikut.

Tabel 10. Daftar PCM kombinasi organik – anorganik [31]

Material	Titik leleh (°C)	Panas laten (kJ/kg)
CaCl ₂ .6H ₂ O+CaBr ₂ .6H ₂ O	14,4	140
Triethylethane+water+urea	13,4	160
CaCl ₂ +MgCl ₂ +6H ₂ O	25	95
NH ₃ CONH ₂ + NH ₃ CONH ₂	27	163
Naphtalene+benzoic acid	67	123,4
Freezer salt	-50	325
Freezer salt	-23	330
Freezer salt	-16	330

Dari penjelasan mengenai PCM di atas, dapat kita simpulkan bahwa pemilihan PCM yang tepat untuk penggunaan pemanas air tenaga matahari merupakan metode yang sangat penting untuk dilakukan pada penelitian mengenai pemanas tenaga matahari terkhusus untuk system *thermosifon*. Pernyataan ini sejalan dengan hasil penelitian yang pernah ada yaitu pengintegrasian *paraffin wax* dan air sebagai material penyimpanan kalor yang telah dilakukan secara eksperimental pada pemanas air tenaga matahari jenis *thermosifon* dimana penggunaan PCM tersebut mengindikasikan bahwa alat penukar kalor cukup efektif sehingga memberi keuntungan secara termal [38].

2.5 COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD)

CFD adalah metode penghitungan, memprediksi, dan pendekatan aliran fluida secara numerik dengan bantuan komputer. CFD merupakan metode penghitungan dengan sebuah kontrol dimensi, luas dan volume dengan memanfaatkan bantuan komputasi komputer untuk melakukan perhitungan pada tiap-tiap elemen pembaginya. Prinsipnya adalah suatu ruang yang berisi fluida dilakukan penghitungan dengan membagi model menjadi beberapa bagian, hal ini sering disebut dengan sel, dan prosesnya dinamakan *meshing*. Nantinya, pada setiap titik kontrol akan dilakukan penghitungan oleh aplikasi dengan batasan domain dan *boundary condition* yang telah ditentukan [39].

Penghitungan yang dimaksud berdasar pada persamaan – persamaan konservasi massa, momentum, dan energi [40].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (33)$$

Persamaan 33 merupakan bentuk umum dari persamaan konservasi massa dan valid untuk aliran yang dapat ataupun tidak dapat dimampatkan. Sumber S_m adalah massa yang ditambahkan pada fasa berkelanjutan dari fasa kedua yang tersebar (misalnya karena penguapan dari droplet cair) dan sumber yang ditentukan pengguna. Adapun untuk geometri simetris 2D, persamaan kontinuitas yang diberikan adalah :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r} (\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \quad (34)$$

Dimana x adalah koordinat axial, r adalah koordinat radial, v_x adalah kecepatan axial, dan v_r adalah kecepatan radial. Sementara itu persamaan konservasi momentum dideskripsikan sebagai berikut :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \rho \vec{g} + F \quad (35)$$

Dimana p merupakan tekanan statis dan $\rho \vec{g}$ dan F merupakan gaya gravitasi benda dan gaya eksternal benda masing-masingnya (sebagai contoh, gaya yang muncul dari interaksi dengan fasa yang tersebar). \vec{F} juga termasuk pada sumber yang bergantung pada model lain seperti poros media dan sumber *user-defined*. Sementara itu untuk geometri simetris 2D, persamaan konservasi momentum radial dan axial adalah sebagai berikut :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r v_x) = -\frac{\partial p}{\partial x} + F_x \quad (36), \text{ dan}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r v_r) = -\frac{\partial p}{\partial r} + F_r \quad (37)$$

Dimana
$$\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \quad (38)$$

Persamaan konservasi energi dideksripsikan sebagai berikut :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = -\nabla \cdot (\sum_j h_j J_j) + S_h \quad (39)$$

Analisis kolektor pelat datar dengan menggunakan paket CFD dari CFDRC (Computational Fluid Dynamic Research Corporation) membandingkan dengan data eksperimental, ditemukan bahwa perangkat lunak mampu memprediksi secara akurat kinerja kolektor [41]. Sementara itu, dengan menggunakan FLUENT sebagai program CFD, sebuah pemanas air tenaga matahari dapat disimulasikan kinerjanya secara akurat [42].

Seperti dengan persamaan yang telah disebutkan pada bagian 2.3 di atas bahwa, koefisien perpindahan panas pada bagian atas kolektor (U_t) dimana penggabungan antara konveksi dan efek radiasi dihitung secara akurat menggunakan metode persamaan yang diusulkan oleh Samdarshi dan Mullick [43] berikut, dengan asumsi bahwa temperatur pelat (T_p), temperatur lingkungan (T_a), dan koefisien perpindahan panas konveksi pada penutup atas (h_w) diketahui.

$$U_t^{-1} = [(h_{rpg} + h_{cpg})^{-1} + (h_{rga} + h_w)^{-1} + \frac{L_g}{k_g}]^{-1} \quad (40)$$

Secara umum, proses penghitungan oleh CFD terbagi atas 3 tahapan:

1) *Preprocessor*

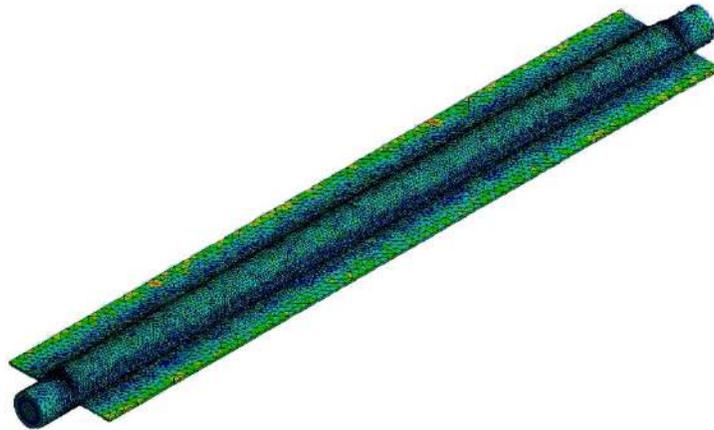
Preprocessor merupakan tahapan awal analisa CFD dimana penentuan masalah, pemodelan awal, dan penginputan data, serta pendefinisian domain dan pendefinisian kondisi batas (*boundary condition*) dilakukan. Dengan mengasumsikan bahwa kolektor merupakan sebuah rangkaian sederhana dari kolektor pelat datar, kondisi batas seharusnya memiliki kedua mekanisme perpindahan panas konveksi dan radiasi, kecuali untuk

permukaan bawah dan depannya [41]. Sementara itu, kondisi batas utama pada pelat kolektor yang dimasukkan adalah intensitas radiasi matahari, temperatur lingkungan, dan laju aliran massa (*flow rate*) air di titik masuk dan keluarnya, adapun dinding sisi bawah dan samping pada sistem diperlakukan adiabatik, yang mana dimaksudkan material terisolasi untuk meminimalisir terjadinya kehilangan panas pada kolektor [44].

Seperti halnya pada simulasi numerik pada penelitian – penelitian yang sudah ada sebelumnya, simulasi numerik pada penelitian ini menggunakan temperatur lingkungan (T_a) dan laju aliran massa air hasil pengambilan data eksperimen. Begitu pula pada permukaan / dinding bawah dan sisi keliling dari kolektor tidak dimasukkan pada kondisi batas karena didefenisikan sebagai isolasi akan tetapi untuk sisi kiri dan kanan pelat *absorber* didefenisikan sebagai dua sisi simetris karena pelat *absorber* yang disimulasikan merupakan potongan satu pipa dari enam pipa pada kolektor yang diuji secara eksperimental.

Selanjutnya pada tahapan *preprocessor* ini, sebuah benda atau model yang akan dianalisa dibagi-bagi dalam jumlah grid tertentu yang terdiri dari sejumlah node N pada setiap volume kontrol, proses ini biasanya dikenal dengan istilah *meshing*. Jumlah total node N dalam grid yang dihasilkan dibatasi oleh kapasitas memori komputer dan waktu operasi CPU [45]. Waktu dan keakuratan simulasi juga bergantung pada ukuran dan jumlah grid. Jumlah grid yang tinggi akan menghasilkan akurasi yang baik begitu pula sebaliknya [44]. Namun, jumlah grid yang tinggi akan membuat waktu yang diperlukan untuk simulasi akan semakin lama sehingga waktu beroperasi CPU juga akan meningkat, begitu juga dengan banyaknya kapasitas memori komputer yang digunakan akan semakin besar. Hal ini membuat proses *meshing* menjadi sebuah tantangan tersendiri dalam melakukan proses simulasi numerik berbasis CFD dikarenakan sangat bergantung pada spesifikasi komputer yang digunakan. Pada gambar 8 di

bawah ini, kita bisa melihat contoh dari hasil proses *meshing* dengan metode CFD.



Gambar 8. Contoh hasil *meshing*

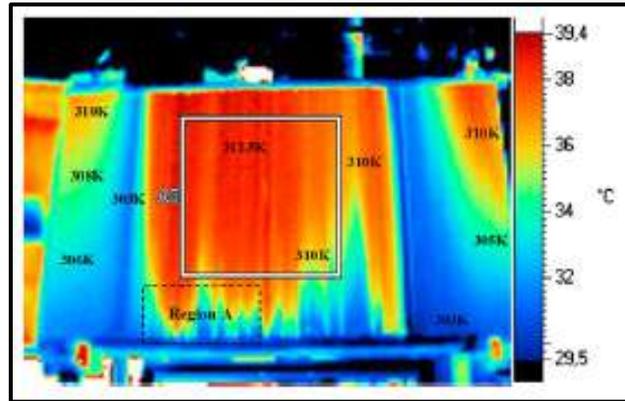
2) *Processor*

Pada tahap ini dilakukan proses penghitungan data-data input dengan persamaan yang terlibat secara iteratif. Artinya penghitungan dilakukan hingga hasil menuju eror terkecil atau sering disebut konvergen. Penghitungan dilakukan secara menyeluruh terhadap volume kontrol dengan proses integrasi persamaan didiskritkan dan dipecahkan secara iteratif untuk setiap volume atur. Hasilnya adalah aproksimasi dari nilai setiap variabel pada titik tertentu dalam domain. Dengan cara ini didapatkan gambaran penuh perilaku aliran yang diinginkan.

3) *Post Processor*

Post processor merupakan hasil perhitungan simulasi yang kemudian diinterpretasikan kedalam bentuk gambar, grafik, atau bahkan animasi dengan pola-pola warna tertentu. Pola warna ini memiliki maknanya masing-masing, misalnya bagian yang bertemperatur tinggi digambarkan dengan

warna kuning hingga merah, dan bagian yang bertemperatur lebih rendah digambarkan dengan warna hijau hingga biru.



Gambar 9. Contoh hasil *post processor*

Hingga saat ini, *software* CFD tidak hanya digunakan oleh *designer* atau analis dengan ilmu dasar mengenai numerik, melainkan setiap orang bisa menggunakannya karena tersedia dan dapat diakses pada laman pencarian internet. *Software* CFD yang umum digunakan diantaranya ANSYS CFX, FLUENT, STAR-CD, FEMLAB, FEATLOW, dan masih banyak lagi seiring dengan perkembangan kebutuhan teknologi.

Dalam setiap pembahasan mengenai CFD, orang-orang akan mempertanyakan mengapa harus menggunakan CFD? Berikut ini adalah beberapa alasannya:

1) Pengetahuan mendalam

Ketika produk yang ingin dibuat tergolong sulit dibuat, ataupun sulit untuk dilakukan riset secara mendalam misalnya disebabkan mahalnya biaya untuk membuat prototipe ataupun melakukan riset, maka analisa CFD akan sangat membantu. Dalam dunia industri, hal ini akan sangat berguna ketika kita akan membuat sebuah produk.

Dengan analisa CFD, kita akan dengan mudah mengetahui dan melihat data-data yang dibutuhkan untuk membuat produk yang efisien, parameter-parameter yang berpengaruh, dan fenomena-fenomena fisika yang terjadi, bahkan lebih mendalam.

2) Pengambilan keputusan

Karena analisa CFD merupakan sarana untuk memprediksi parameter-parameter yang ada dengan kondisi tertentu, maka analisa CFD bisa menjawab pertanyaan “*What If*” dengan cepat. Dengan simulasi CFD kita dapat mengubah parameter yang ada, melihat hasilnya, mengubahnya lagi, hingga diperoleh kondisi yang diinginkan sebelum prototipe dibuat.

Dalam waktu yang tidak terlalu lama, dengan biaya yang tidak terlalu mahal, maka produk yang diinginkan dapat dibuat dengan kualitas yang baik dan memenuhi standar-standar yang ada.

3) Efisiensi

Desain dan analisis yang baik dalam aplikasi industri adalah desain yang memberikan “*design cycle*” yang singkat, biaya tidak mahal, dan waktu yang singkat. CFD bisa menjadi sarana untuk mempersingkat siklus desain produk industri, meningkatkan efisiensi dan ujung-ujungnya meningkatkan keuntungan [45].