

**ANALISIS PEMANAS AIR TENAGA MATAHARI DENGAN
MODIFIKASI PLAT ABSORBER TERINTEGRASI TERMAL
STORAGE**

M. ANIS ILAHI RAHMADHANI

D022201007



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2022**

**ANALISIS PEMANAS AIR TENAGA MATAHARI DENGAN MODIFIKASI
PLAT ABSORBER TERINTEGRASI TERMAL STORAGE**

Tesis

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar magister

Program Studi Teknik Mesin

Disusun dan diajukan oleh

M. ANIS ILAHI RAHMADHANI

D022201007

Kepada

PROGRAM MAGISTER TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2022

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS PEMANAS AIR TENAGA MATAHARI DENGAN MODIFIKASI PLAT ABSORBER TERINTEGRASI TERMAL STORAGE

Disusun dan diajukan oleh

M. ANIS ILAHI RAHMADHANI

D022201007

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Magister Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin

pada tanggal 10 Januari 2023


dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui
Komisi Penasehat,

Pembimbing Utama

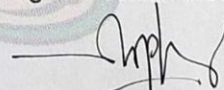
Pembimbing Pendamping


Prof. Dr. Eng. Jalalluddin. ST., MT
NIP. 19720825200031001


Dr. Eng. Andi Amijoyo Mochtar, ST., M.SC
NIP. 197602162010121002


Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin

Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT
NIP. 197309262000121002

Ketua Program Studi
Magister Teknik Mesin

Dr. Eng. Novriany Amaliyah, ST., MT
NIP. 197911122008122002

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini ;

Nama : M. Anis Ilahi Rahmadhani
Nomor mahasiswa : D022201007
Program studi : Teknik Mesin / Energi Terbarukan

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, 20 Desember 2022



Yang menyatakan

M. Anis Ilahi Rahmadhani
D022201007

Ucapan Terima Kasih

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini yang berjudul "Analisis Pemanas Air Tenaga Matahari Dengan Modifikasi Plat Absorber Terintegrasi Termal Storage". Penyusunan Tesis ini merupakan salah satu syarat dalam menyelesaikan studi untuk memperoleh gelar Magister pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar. Penulis menyadari dalam menyelesaikan Tesis 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 telah selesai.

Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat dan tulus penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Bapak Prof.Dr. Eng. Jalaluddin Haddada, ST., MT selaku pembimbing pertama dan Bapak Dr. Eng. Andi Amijoyo Mochtar, ST., M.SC selaku pembimbing kedua, yang telah memberikan sangat banyak pelajaran berharga bagi penulis, yang tidak bisa ternilai harganya dengan apapun, meluangkan waktu dan tenaganya, dan juga memberikan motivasi dan ide-ide kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas akhir ini. Ucapan terima kasih juga saya ucapkan kepada pimpinan Universitas Hasanuddin dan Sekolah Pascasarjana Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program magister serta para dosen dan rekan-rekan dalam tim penelitian.

Akhirnya, kepada kedua orang tua tercinta saya mengucapkan limpah terima kasih dan sembah sujud atas doa, pengorbanan dan memotivasi mereka selama saya menempuh pendidikan. Kepada Ayahanda sekaligus motivasi hidup Muhammad Zabir yang telah memberikan sangat banyak pelajaran berharga dan Ibunda Masdiati Haddada yang telah merawat penulis tanpa lelah dari kecil hingga saat ini, dan memberikan semangat serta dukungan yang tidak ada habisnya, dan juga kepada adik Nur Azizah Zabir yang telah memberikan dukungan dan semangat. Penghargaan yang besar juga saya sampaikan kepada keluarga besar Radiator2014 atas motivasi dan dukungan yang tak ternilai.

Hormat saya,
Penulis,

M. Anis Ilahi Rahmadhani

ABSTRAK

M. ANIS ILAHI RAHMADHANI. **Analisis Pemanas Air Tenaga Matahari Dengan Modifikasi Plat Absorber Terintegrasi Termal Storage** (dibimbing oleh Prof. Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT dan Dr. Eng. Andi Amijoyo Mochtar, ST., M.SC)

Pemanas air tenaga matahari (SWH) adalah peralatan yang memanfaatkan energi matahari sebagai sumber energinya dan telah banyak digunakan di berbagai negara di dunia. Penelitian ini berfokus untuk menyelidiki kinerja SWH dengan simulasi numerik yang terintegrasi paraffin-wax (lilin) sebagai material berubah fasa (PCM) ke dalam kolektor pelat absorber di bagian bawah sebagai penyimpan panas. Kinerja termal sistem SWH menggunakan pelat penyerap dengan PCM sebagai penyimpan energi panas disajikan dalam penelitian ini. Pada pengujian ini terdapat 4 variasi model yang diuji, yaitu a) pelat datar standar (SFP), b) pelat datar standar dengan ketebalan penyimpanan PCM 10mm (SFP+PCM 10mm), c) pelat datar standar dengan ketebalan penyimpanan PCM 7mm (SFP+PCM 7mm), dan d) pelat datar standar dengan ketebalan penyimpanan PCM 4mm (SFP+PCM 4mm), diselidiki secara simulasi numerik. Pertama, sifat material lilin sebagai penyimpanan PCM dianalisis secara analitik. Kemudian setiap model bentuk sistem SWH diasumsikan dan disimulasikan pada tiga variasi radiasi matahari konstan yaitu 400 W/m², 700 W/m², dan 1000 W/m². Simulasi menggunakan perangkat lunak Computational Fluid Dynamic (CFD) pada aplikasi ansys. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kolektor sistem SWH yang menggunakan pelat penyerap dengan penyimpanan PCM memiliki kinerja yang lebih baik. Model dengan ketebalan PCM 10 mm atau SFP+PCM 10 mm memiliki efisiensi paling tinggi dibandingkan model lain dengan nilai efisiensi 65%. Terjadi peningkatan efisiensi sebesar 4% dengan variasi model yang menggunakan thermal storage PCM dibandingkan dengan model yang tidak menggunakan thermal storage PCM.

Kata Kunci: Pemanas air tenaga matahari (SWH), Material berubah fasa (PCM), Paraffin-Wax, Plat datar standar (SFP), Plat datar standar terintegrasi PCM (SFP+PCM).

ABSTRACT

M. ANIS ILAHI RAHMADHANI. **Analysis Of Solar Water Heater With Modification Absorber Plate Integrated Thermal Storage** (dibimbing oleh Prof. Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT dan Dr. Eng. Andi Amijoyo Mochtar, ST., M.SC)

A solar water heater (SWH) is equipment that utilizes solar energy as its energy source and has been widely used in various countries worldwide. This work focus on investigating the performance of SWH numerical simulation by integrating phase change material (PCM) paraffin wax into an absorber plate collector at the bottom as thermal storage. The thermal performance of an SWH system using an absorber plate with PCM as thermal energy storage is presented in this study. There are 4 (four) variations used on the numerical simulation, namely : a) standard flat plate (SFP), b) standard flat plate with PCM storage thickness 10mm (SFP+PCM 10mm), c) standard flat plate with PCM storage thickness 7mm (SFP+PCM 7mm), and d) standard flat plate with PCM storage thickness 4mm (SFP+PCM 4mm). First, the material properties of paraffin wax as PCM storage were analyzed analytically. Then, every shape model of SWH systems was imported and simulated at three variations of constant solar radiation i.e 400 W/m², 700 W/m², and 1000 W/m². The simulation uses computational fluid dynamic (CFD) at ansys software. The results showed that the SWH system collector which uses an absorber plate with PCM storage had a better performance. The models using thickness of 10 mm PCM or SFP+PCM 10 mm have the highest efficiency compared to other models with an efficiency value of 65%. There is a 4% increase in efficiency with variations in models that use PCM thermal storage compared to models that do not use PCM thermal storage.

Keywords: Solar Water Heater (SWH), Phase Change Material (PCM), Paraffin-Wax, Standard Flat Plate (SFP), Standard Flat Plate With PCM Storage (SFP+PCM).

DAFTAR ISI

	Halaman
SAMPUL	i
PERNYATAAN PENGAJUAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Sistem Pemanas Air Tenaga Matahari	5
2.2 PCM dan Composite Thermal Storage	9
2.3 Tahapan Perhitungan Efisiensi Kolektor	13
2.4 <i>Computational Fluid Dynamic</i> (CFD)	20

BAB III METODE PENELITIAN	26
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	26
3.2 Objek Penelitian	26
3.3 Pendalaman Penelitian	29
3.4 Diagram Alir Penelitian	50
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	52
4.1 Temperatur Pelat Absorber	52
4.2 Temperatur Air Inlet dan Outlet	59
4.3 Temperatur Phase Change Material (PCM)	68
4.4 Kolektor Efisiensi	73
4.5 Validasi Eksperimental dan Simulasi	82
BAB V PENUTUP	84
5.1 Kesimpulan	84
5.2 Saran	85
REFERENSI	86
LAMPIRAN	91

DAFTAR GAMBAR

No. Urut	Halaman
1. Skema sistem pemanas air tenaga matahari <i>thermosifon</i>	5
2. Grafik pelat datar yang diletakkan pada posisi horizontal.....	8
3. Pelat <i>absorber</i> berbentuk-V	8
4. Ilustrasi rangkaian tahanan termal pada kolektor	17
5. Urutan material kolektor	17
6. Proses dari <i>CFD</i>	20
7. Jenis Mesh	23
8. Contoh hasil meshing	23
9. Contoh hasil post processor	24
10. Satu Set Komputer yang Dilengkapi <i>Software</i> yang diperlukan.....	26
11. Gambar logo software Autodesk Fusion 360	27
12. Gambar logo <i>software</i> Ansys 18.1	27
13. Objek penelitian pemanas air tenaga matahari 1 Pipa tanpa PCM storage	28
14. Objek penelitian pemanas air tenaga matahari 1 Pipa tanpa PCM storage	28
15. Skema Instalasi Pengujian Eksperimental Termal Storage Alumina-Aluminium.....	29
16. Desain Alat dengan Ketebalan Termal Storage 7mm pada Pengujian Eksperimental Alumina-Aluminium	29
17. Skema Instalasi Pengujian Eksperimental PCM Storage Paraffin-Wax	31
18. Desain Alat dengan Ketebalan PCM Storage 16.5 mm pada Pengujian Eksperimental Paraffin-Wax	31
19. Skema Gambar SWH tanpa PCM Storage yang Akan Disimulasikan	32
20. Skema Gambar SWH dengan PCM Storage yang Akan Disimulasikan	32

21. Variasi ketebaln PCM	32
22. Hasil Mesh dan Jumlah Cell Pelat Absorber Dengan PCM storage	34
23. Hasil Mesh dan Jumlah Cell Absorber Pelat Tanpa PCM storage.	34
24. Detail Mesh yang Digunakan Untuk Simulasi.....	34
25. Tampilan Proses Set-Up pada Software Ansys.....	35
26. Tampilan Tahapan General	36
27. Tampilan Tahapan Pengaktifan Persamaan Energi	37
28. Tampilan Tahapan Pemilihan Jenis Aliran	38
29. Tampilan Tahapan Radiation Model	39
30. Tampilan Tahapan Pengaktifan Solidifikasi dan Pelelehan	39
31. Tampilan Sifat-sifat Air	40
32. Tampilan Sifat-sifat Udara	40
33. Tampilan Sifat-sifat Tembaga	41
34. Tampilan Sifat-sifat Steel	41
35. Tampilan Sifat-sifat Paraffin	42
36. Tampilan Sifat-sifat Kaca	42
37. Tampilan Cell Zone Conditions untuk Part Air	43
38. Tampilan Bagian Boundary Conditions	44
39. Tampilan Bagian Boundary Conditions Untuk Part Kaca	44
40. Tampilan Reference Values.....	45
41. Tampilan Perintah Solution Methodes	47
42. Tampilan Perintah Solution Controls	48
43. Tampilan Perintah Solution Initialization	48
44. Tampilan Perintah Run Calculation	49
45. Tampilan Perintah Mengolah Data oleh Software	50
46. Diagram Alir Penelitian	51
47. Grafik Perbandingan Variasi Intensitas Matahari Terhadap Temperatur Pelat Kolektor	54
48. Kontur Temperatur Plat Kolektor tanpa PCM Storage.....	55
49. Kontur Temperatur Plat Kolektor dengan Tebal PCM Storage 4mm	57

50. Kontur Temperatur Plat Kolektor dengan Tebal PCM Storage 7mm	58
51. Kontur Temperatur Plat Kolektor dengan Tebal PCM Storage 10mm	60
52. Grafik Perbandingan Variasi Intensitas Matahari Terhadap Temperatur Inlet & Outlet Kolektor	61
53. Kontur Temperatur Air Dalam Pipa Kolektor tanpa PCM Storage .	63
54. Kontur Temperatur Air Dalam Pipa Kolektor dengan Tebal PCM Storage 4mm	64
55. Kontur Temperatur Air Dalam Pipa Kolektor dengan Tebal PCM Storage 7mm	66
56. Kontur Temperatur Air Dalam Pipa Kolektor dengan Tebal PCM Storage 10mm	67
57. Grafik Perbandingan Variasi Intensitas Matahari Terhadap Temperatur PCM pada Kolektor	69
58. Kontur Temperatur PCM pada Kolektor dengan Tebal PCM Storage 4mm	70
59. Kontur Temperatur PCM pada Kolektor dengan Tebal PCM Storage 7mm	72
60. Kontur Temperatur PCM pada Kolektor dengan Tebal PCM Storage 10mm	73
61. Grafik Perbandingan Variasi Intensitas Matahari Terhadap Efisiensi Kolektor	81
62. Grafik Perbandingan Validasi Hasil Efisiensi antara Eksperimen dan Simulasi Pada Pengujian dengan Intensitas 1000W/m^2	83

DAFTAR TABEL

No. Urut	Halaman
1. Konduktivitas termal beberapa bahan kolektor matahari tertentu....	6
2. Jenis-jenis PCM	10
3. Sifat termofisik paraffin wax	11
4. Titik leleh dan panas peleburan laten beberapa non paraffin	12
5. Nilai efisiensi pada setiap variasi	82

DAFTAR LAMPIRAN

No. Urut	Halaman
1. Tabel sifat-sifat udara pada tekanan 1 atm	91
2. Sifat-sifat air jenuh	92
3. Tabel hasil perhitungan	93
4. Jurnal Publish	94

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemanas air tenaga matahari (SWH) 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 SWH yang ada, maka berbagai penelitian dilakukan. Penelitian sebelumnya merupakan sebuah penelitian eksperimental dari sistem pemanas air tenaga matahari dengan plat absorber berbentuk V, 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 dengan pelat absorber datar[1].

Di sisi lain, temperatur yang tinggi pada permukaan pelat berbentuk V menyebabkan kehilangan panas pada permukaan kolektor menjadi besar pula, sehingga diperlukan suatu penyimpanan energi panas yang mampu memaksimalkan kinerja kolektor surya. Investigasi kinerja secara eksperimental dari penggunaan *phase change material* (PCM) telah dilakukan dan didiskusikan oleh Pisut Thantong [2] pada iklim tropis. Eksperimen telah membuktikan bahwa kolektor yang terintegrasi dengan PCM lebih hemat energi dalam hal pengurangan pengumpulan panas dan penghematan energi. Palacio [3] 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. Saat ini, penggunaan komposisi polimer / bahan berpori PCM sebagai penyimpanan termal ditinjau dan dianalisis oleh Kee [4]. Saddegh [5] juga telah

membandingkan perilaku termal dalam sistem penyimpanan energi *shell-and-tube* vertikal dan horizontal menggunakan PCM. Begitu pula dengan Shalaby [6] yang telah melakukan percobaan pemanas air tenaga matahari yang terintegrasi dengan *shell and finned-tube system* penyimpanan panas laten, dan hasilnya menunjukkan bahwa efisiensi harian tertinggi sebesar 65% dicapai ketika konfigurasi penggabungan PCM dan tangki penyimpanan air digunakan.

Seiring dengan perkembangan zaman, sistem pemanas air tenaga matahari saat ini menggunakan prinsip *thermosyphon*. Eksperimen dan simulasi dari sistem pemanas tenaga matahari telah dipresentasikan oleh Ka-Kui Tse [7] 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 °C, 71.19 °C, dan 69.46 °C [8]. Garnier [9] 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 [10] 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.

Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa pengembangan SWH penting dilakukan dengan simulasi numerik dengan analisa *computational fluid dynamic* (CFD) dan membandingkan dengan pengujian *experimental*

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 *thermal energy storage* (TES) dengan sistem *thermosyphon* diteliti secara Simulasi Numerik. Berdasarkan uraian latar belakang di atas maka dilakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh permodelan dan penggunaan penyimpanan PCM pada sistem pemanas air tenaga matahari dengan judul: ***Analisis Pemanas Air Tenaga Matahari Dengan Modifikasi Plat Absorber Terintegrasi Termal Storage.***

1.2 Rumusan Masalah

Adapun yang akan menjadi rumusan masalah penelitian ini adalah :

1. Bagaimana model termal *storage* yang efektif pada sistem pemanas air tenaga matahari ?
2. Bagaimana pengaruh PCM *storage* terhadap performa pemanas air tenaga matahari ?
3. Bagaimana perbandingan efisiensi antara sistem pemanas air tenaga matahari konvensional tanpa termal *storage* dan sistem pemanas air tenaga matahari yang menggunakan termal *storage* ?

1.3 Tujuan penelitian

Adapun yang akan menjadi tujuan penelitian ini adalah :

1. Menganalisa model termal *storage* terhadap pemanas air tenaga matahari.
2. Menganalisa performa PCM *storage* terhadap pemanas air tenaga matahari.
3. Menghitung perbandingan efisiensi antara sistem pemanas air tenaga matahari tanpa termal *storage* dan sistem pemanas air tenaga matahari yang menggunakan termal *storage*.

1.4 Batasan Masalah

Adapun yang akan menjadi Batasan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Pemodelan geometri yang disimulasikan berbentuk potongan simetri dari bentuk aslinya yang masing-masing terdiri dari satu buah pipa, satu buah pelat absorber tanpa PCM *storage*, atau dengan PCM *storage*.
2. Intensitas radiasi matahari di asumsikan konstan yakni 400, 700, dan 1000w/m².

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun yang akan menjadi manfaat penelitian ini ialah :

1. Menghasilkan simulasi numerik sebuah sistem pemanas air tenaga matahari dengan modifikasi pelat absorber yang dilengkapi thermal *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* secara simulasi numerik.
3. Memberikan penjelasan pengaruh penggunaan thermal *storage* pada unjuk kerja pemanas air tenaga matahari secara simulasi numerik.
4. Sebagai referensi desain untuk aplikasi nyata pemanfaatan teknologi untuk kepentingan masyarakat luas.

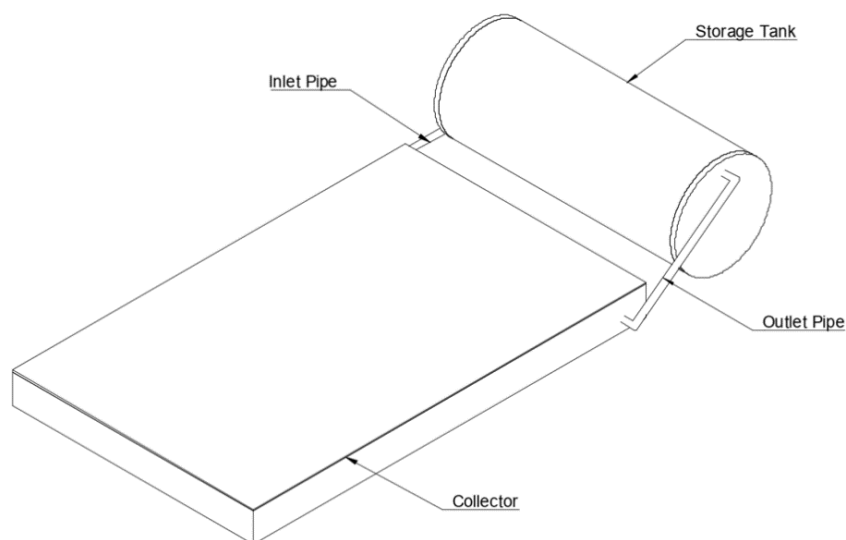
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Pemanas Air Tenaga Matahari

A. Pengertian

Sistem pemanas air tenaga matahari (SWH) 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 [11]. 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 SWH *thermosifon* dapat kita lihat pada **Gambar 1** berikut.



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

Sistem SWH memiliki komponen utama yang terbuat dari selembur 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 [12].

B. Plat Absorber

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.

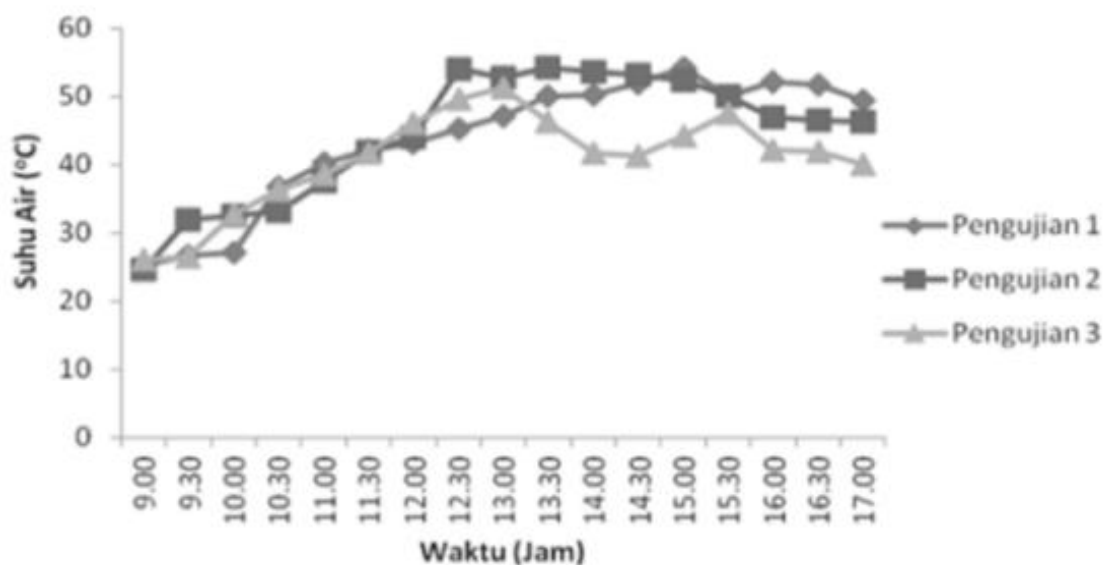
Tabel 1. Konduktivitas termal beberapa bahan kolektor matahari tertentu [13]

Bahan	Konduktivitas termal (k), W/(m.K)
Tembaga	385.0
Alumunium	211.0
Timah putih	66.0
Baja, 1% karbon	45.0
Baja tahan karat	16.0

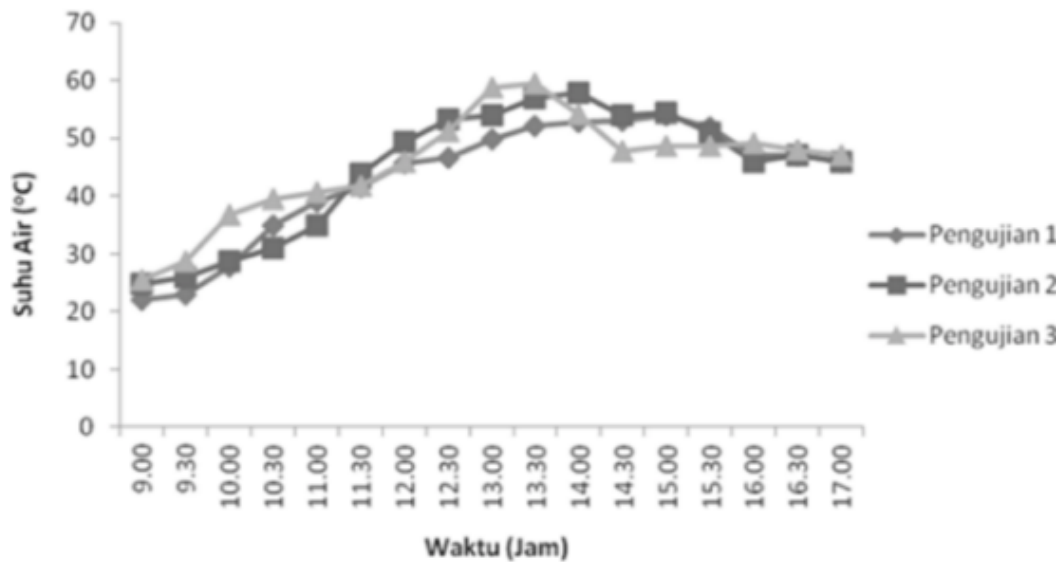
Lembaran kaca transparan digunakan sebagai penutup permukaan kolektor. Penutup kaca ini berfungsi sebagai alat pelindung kolektor dari kerusakan oleh faktor luar (misalnya debu dan hujan), tetapi juga karena sifatnya sebagai penjebak panas atau gelombang inframerah. Seperti diketahui bahwa kaca memiliki 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 [14]. Meskipun demikian masih terdapat

kerugian panas ke permukaan karena pengaruh konveksi udara yang bergerak di dalam ruang antara pelat absorber dan kaca. Kerugian panas konveksi ini pada kenyataannya justru mengambil porsi yang terbesar sekitar 70 % - 80 % dari total kerugian panas ke permukaan, menyebabkan efisiensi termal kolektor menjadi rendah sekitar 20 % - 40 % [15].

Beberapa penelitian untuk menganalisis unjuk kerja kolektor, modifikasi bentuk pelat absorber dan material kolektor telah dilakukan. Analisis energi dan exergi 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 [16]. 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. Grafik perbandingan meningkatnya performansi kolektor pelat datar yang diletakkan pada posisi kemiringan 22° jika dibandingkan dengan yang diletakkan pada posisi horizontal dapat dilihat pada **Gambar 2** berikut [17].



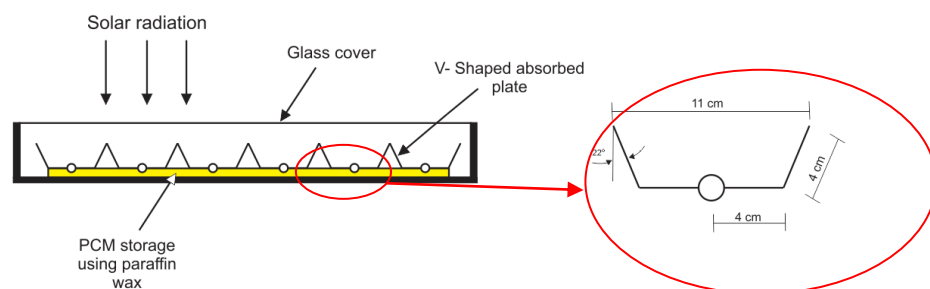
(a)



(b)

Gambar 2: Grafik pelat datar yang diletakkan pada posisi horizontal (a) ; Grafik pelat datar yang diletakkan pada posisi kemiringan 22° (b)

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 [18]. Pelat *absorber* yang digunakan adalah pelat *absorber* berbentuk-V. pelat *absorber* berbentuk-V dapat dilihat pada **Gambar 3** berikut.



Gambar 3. 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 [19] dan dengan dimensi kolektor serta tangki yang lebih kecil [20]. 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 PCM dan *Composite Thermal Storage*

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 [18]. Panas laten merupakan 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[21]:

$$Q = mL_e \quad (1)$$

Dimana: Q : Kalor laten zat (J)

L_e : Kapasitas kalor spesifik laten (J/kg)

m : Massa zat (kg)

PCM diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu organik dan non organik [22]. 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 temperatur yang drastis[22].

$$Q = mC\Delta T \quad (2)$$

Dimana Q : Kalor laten zat (J)

C : Kapasitas kalor spesifik Sensibel (J/kg)

m : Massa zat (kg)

ΔT : Perbedaan temperatur

A. 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*. Seperti yang ditunjukkan **Tabel 2** mengenai jenis-jenis PCM.

Tabel 2. Jenis-Jenis PCM [21]

Jenis PCM	Titik leleh (°C)	Panas peleburan laten (kJ/kg)
Parafin	47,5	232
Azobenzene	67,1	121
Acetic acid	16,7	184
K ₂ HPO ₄ ·6H ₂ O	14	109
Galium	30	80,3
CaCl ₂ ·MgCl ₂ ·6H ₂ O	14,4	140

1) *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 [23]. Pada **Tabel 3** menunjukkan sifat termofisik dari paraffin wax.

Tabel 3. Sifat termofisik paraffin wax [21]

Sifat Termofisik	Nilai	
	Solid	Cair
Densitas, g/cm ³	0,861	0,778
Panas Spesifik,	1900	2300
Titik Leleh, °C	47,5	
Panas Laten,	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 temperaturnya yang sangat luas. 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 [24] 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.

2) *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 [24]. 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 4** berikut.

Tabel 4. Titik leleh dan panas peleburan laten beberapa non paraffin [21]

Material	Titik leleh (°C)	Panas laten (kJ/kg)
Formic acid	7,8	247
Caprylic 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 aci d	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 naphtol	96	163

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 [25].

2.3 Tahapan Perhitungan Efisiensi Kolektor

A. Analisa Perpindahan Panas Konveksi

Adapun koefisien perpindahan panas konveksi yaitu:

- 1) Koefisien Perpindahan Panas Konveksi Antara Kaca Penutup Dan Udara Luar

Koefisien perpindahan panas konveksi oleh kaca penutup transparan terhadap udara luar [26], didasarkan pada hembusan angin di atas penutup transparan sehingga menggunakan persamaan konveksi bebas, dimana :

Bilangan Reynold, Re

$$Re = V \frac{L}{\nu} \quad (3)$$

Dimana:

V = kecepatan angin (m/s)

ν = viskositas kinematik (m^2/s)

L = Panjang karakteristik penutup (m)

Bilangan Nusselt, Nu_u

$$Nu = 0,332 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (4)$$

$$h_w = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad (5)$$

Dimana:

k = koefisien konveksi (W/m.K)

L = Panjang penutup (m)

2) 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 [27] didapatkan dengan persamaan berikut:

Bilangan Nusselt, Nu_u

$$Nu = Nu_{\theta=0^\circ} \left(\frac{Nu_{\theta=90^\circ}}{Nu_{\theta=0^\circ}} \right)^{\theta/\theta_{cr}} (\sin \theta_{cr})^{\theta/4\theta_{cr}} \quad (6)$$

$$Nu_{\theta=0^\circ} = 0,069 Ra_L^{1/3} Pr^{0,074} \quad (7)$$

$$Nu_{\theta=90^\circ} = 0,18 \left(\frac{Pr}{0,2Pr} Ra_L \right)^{0,29} \quad (8)$$

Dimana:

θ = sudut kemiringan kolektor

θ_{cr} = sudut kritis kemiringan kolektor

Rayleigh Number, R_a

$$R_a = \frac{g\beta' \Delta T L^3}{\nu \alpha} \quad (9)$$

Dimana:

ΔT = Beda temperatur antara pelat dengan penutup (K)

L = Jarak pelat dengan penutup (m)

α = Difusifitas termal (m^2/s)

Sehingga diperoleh:

$$h_{c_{p-c}} = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad (10)$$

Dimana:

L = Panjang karakteristik penutup (m)

3) 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 [27], sehingga:

$$K_{eff} = kNu \quad (11)$$

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:

$$Nu = 0,386 \left(\frac{Pr}{0,861+Pr} \right)^{1/4} (F_{cyl} Ra_L)^{1/4} \quad (12)$$

Dimana:

F_{cyl} = Faktor geometrik untuk silinder konsentrik

$$F_{cyl} = \frac{[\ln(\frac{D_o}{D_i})]}{Lc^3 (D_i^{-\frac{3}{5}} + D_o^{-\frac{3}{5}})^{\frac{5}{5}}} \quad (13)$$

Dimana:

D_o = Diameter luar pipa

D_i = Diameter dalam pipa

B. Analisa Perpindahan Panas Radiasi.

Adapun koefisien perpindahan panas radiasi yaitu:

- 1) Koefisien Perpindahan Panas Radiasi Antara Kaca Penutup Dengan Udara Luar.

Koefisien perpindahan panas radiasi antara kaca penutup terhadap udara luar [28] dapat dihitung dengan persamaan :

$$h_{r_{c-a}} = \varepsilon \frac{\sigma(T_c^4 + T_s^4)}{(T_c - T_s)} \quad (14)$$

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 [28], sehingga dapat dihitung berdasarkan:

$$T_{sky} = 0,0552 \cdot T_a^{1,5} \quad (15)$$

- 2) Koefisien Perpindahan Panas Radiasi Pelat-Penutup

Koefisien perpindahan panas radiasi pelat dengan penutup yaitu:

$$h_{r_{p-c}} = \frac{\sigma(T_p^2 + T_c^2)(T_p + T_c)}{\frac{1-\varepsilon_p}{\varepsilon_p} + \frac{1}{F_{1-2} \cdot A_p} + \frac{1-\varepsilon_c}{\varepsilon_c \cdot A_c}} \quad (16)$$

Dimana:

ε_c = Emisivitas penutup

ε_p = Emisivitas pelat

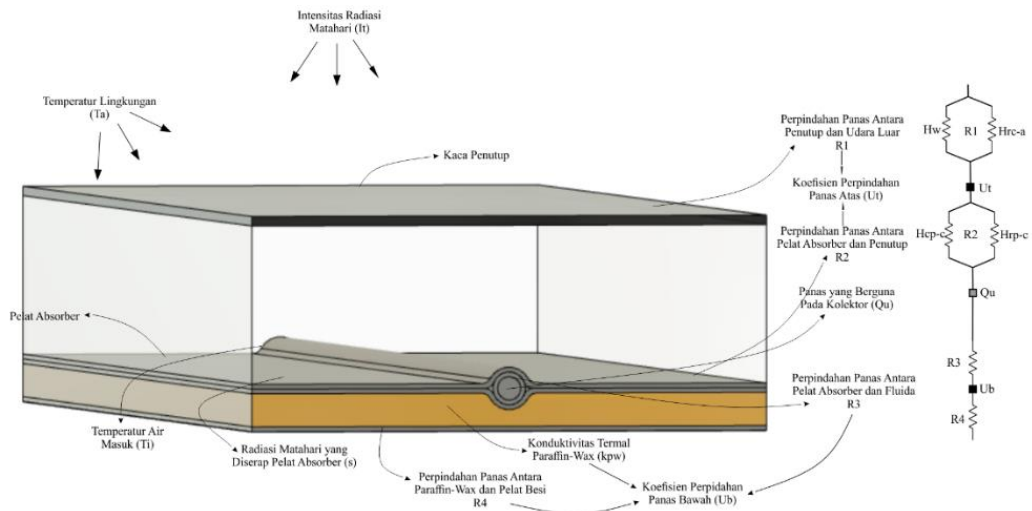
A_p = Luas pelat absorber (m²)

A_c = Luas kaca penutup (m²)

C. Koefisien Perpindahan Panas Kolektor

Koefisien perpindahan panas kolektor yang akan dihitung [27], yaitu :

- 1) Koefisien perpindahan panas bagian atas kolektor atas (U_t) dari rangkaian termal dimana rangkaian termal terdiri dari rangkaian termal 1 (R1) dan rangkaian termal 2 (R2), hal ini biasanya dikenal dengan sebutan tahanan termal seperti terlihat pada **Gambar 4** berikut ini.



Gambar 4. Ilustrasi rangkaian tahanan termal pada kolektor

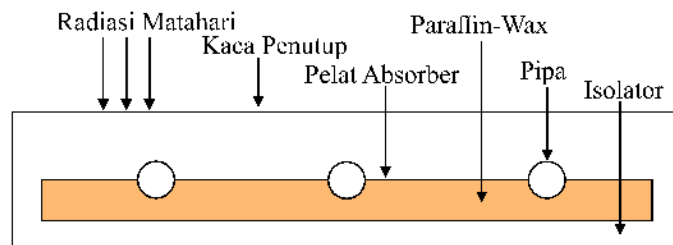
Dari **Gambar 4** terlihat kontak antara rangkaian termal 1 (R1) dengan rangkaian termal 2 (R2), hal ini membuat persamaan untuk mengetahui koefisien perpindahan panas bagian atas kolektor (U_t) adalah sebagai berikut :

$$R_1 = \frac{1}{h_w + h_{rc-a}} \tag{17}$$

$$R_2 = \frac{1}{h_{cp-c} + h_{rp-c}} \tag{18}$$

$$U_t = \frac{1}{(R_1 + R_2)} \tag{19}$$

2) Koefisien Perpindahan Panas Bagian Bawah Kolektor



Gambar 5. Urutan material kolektor

$$U_b = \frac{1}{\left[\frac{L_F}{k_F} + \frac{L_{pw}}{k_{pw}} + \frac{1}{h_f} \right]} \quad (20)$$

Dimana:

L_F = ketebalan foam / isolasi (m)

L_{pw} = ketebalan paraffin wax (m)

k_F = konduktivitas foam / isolasi (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 :

$$U_L = U_t + U_b \quad (21)$$

D. Efisiensi Kolektor (Teoritis)

Efisiensi kolektor dipengaruhi oleh radiasi matahari yang diserap:

1) 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 :

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k\delta}} \quad (22)$$

$$F = \frac{\tanh[m(W-D_o)/2]}{m(W-D_o)/2} \quad (23)$$

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left[\frac{1}{U_L[D_o+(W-D_o)F]} + \frac{1}{\pi D_i h_{p-f}} \right]} \quad (24)$$

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)

2) 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 :

$$\dot{m} = \frac{-U_L \cdot F' \cdot A_c}{C_p \cdot \ln \left[1 - \frac{U_L \cdot (T_{out} - T_{in})}{S - U_L (T_{in} - T_a)} \right]} \quad (25)$$

$$F'' = \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_c U_L F'} \left[1 - \frac{\frac{S}{U_L} - (T_{f,o} - T_a)}{\frac{S}{U_L} - (T_{f,i} - T_a)} \right] \quad (26)$$

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)

3) Faktor Pelepasan Panas (F_R) [29]:

$$F_R = F' \cdot F'' \quad (27)$$

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

$$q_u = A_c \cdot F_R [S - U_L (T_i - T_a)] \quad (28)$$

Selanjutnya diperoleh efisiensi kolektor (η) dengan persamaan :

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

Dimana :

I_T = intensitas matahari total (W/m²)

4) Kesetimbangan Energi Pada Kolektor

Untuk kondisi *steady*, kinerja sebuah kolektor ditentukan berdasarkan kesetimbangan energi melalui distribusi energi matahari sebagai sumber kalor (*energy gain*), kehilangan termal (*thermal losses*), dan kehilangan optikal (*optical losses*)[30]. Besarnya energi yang berguna kolektor dinyatakan dengan persamaan:

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_{pm} - T_a)] \quad (31)$$

Dimana :

A_c = Luas kolektor (m²)

S = Radiasi cahaya yang diserap per satuan luas (kW/m²)

U_L = Koefisien perpindahan panas (kW/m².K)

T_{pm} = Temperatur rata-rata pelat (K)

T_a = Temperatur ambien (K)

Selain itu, besarnya energi berasal dari fluida kerja melalui perbedaan temperatur masuk dan keluar pada kolektor yaitu :

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_p (T_{f,o} - T_{f,i}) \quad (32)$$

Dimana :

\dot{m} = laju aliran massa (kg/s)

C_p = Panas spesifik air (kJ/kg.K)

T_i = Temperatur air masuk ke kolektor (K)

T_o = Temperatur air keluar dari kolektor (K)

Sedangkan, efisiensi kolektor pada periode waktu yang konstan dapat ditentukan dengan persamaan :

$$\eta = \frac{Q_u}{I_T A_c} \quad (33)$$

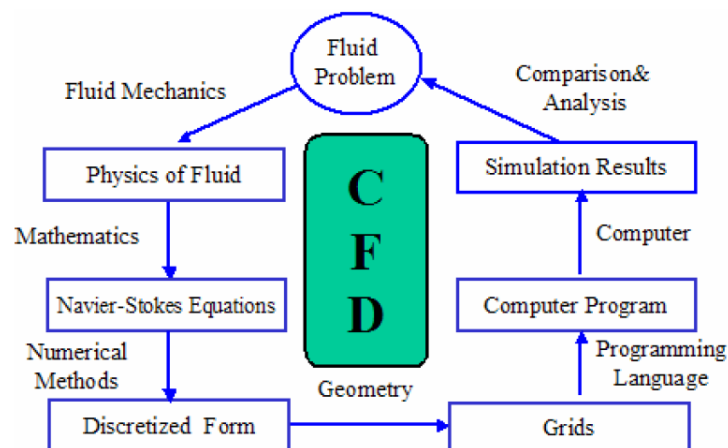
Dimana :

I_T = Intensitas cahaya pada periode waktu yang sama (kW/m²)

Q_u = sumber energi yang berguna (kW)

2.4 Computational Fluid Dynamic (CFD)

CFD adalah simulasi dari sistem fluida menggunakan pemodelan (formulasi matematika dan fisika) dan metode numerik. Pada gambar 6 menunjukkan proses dari CFD.



Gambar 6. Proses dari CFD

Pertama-tama kita memiliki permasalahan fluida. Untuk menyelesaikan masalah ini, kita harus mengetahui properti fisik dari fluida tersebut menggunakan Mekanika Fluida. Kemudian kita bisa menggunakan persamaan matematika untuk menjelaskan properti fisik ini. Persamaan

Navier-Stokes dan pengembangannya menjadi persamaan yang digunakan pada *CFD*. Karena persamaan Navier-Stokes adalah persamaan analisis, manusia bisa memahami dan menyelesaikan persamaan ini pada selembar kertas. Tapi jika kita ingin menyelesaikan persamaan ini menggunakan komputer, kita harus menterjemahkannya kedalam bentuk diskret (terpisah-pisah). Penterjemah itu adalah “Metode Diskritisasi Numerik”, seperti Differensial Hingga, Elemen Hingga, dan Metode Volume Hingga.

Akibatnya, kita juga perlu membagi-bagi keseluruhan “permasalahan” kita menjadi bagian-bagian yang lebih kecil (*meshing*), karena pendiskritan kita bergantung pada bagian-bagian kecil tersebut. Kemudian permasalahan tersebut bisa diselesaikan oleh program setelah melakukan serangkaian perhitungan. Pada akhirnya, kita bisa mendapatkan hasil simulasi, dan bisa membandingkannya dengan hasil eksperimen [31].

Secara garis besar, proses melakukan simulasi menggunakan software *CFD* dibagi menjadi 3 proses utama, yaitu:

1) *Preprocessor*

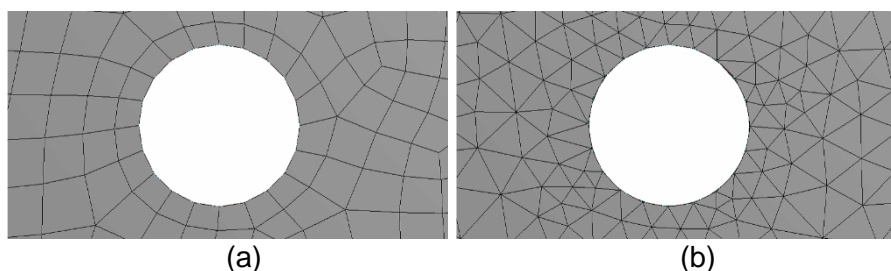
Preprocessor merupakan tahapan awal analisa *CFD* dimana penentuan masalah, pemodelan awal, dan penginputan data, serta pendefinisian domain dan pendefinisian kondisi batas (*boundary condition*) dilakukan. Dengan mengasumsikan bahwa kolektor merupakan sebuah rangkaian sederhana dari kolektor pelat datar, kondisi batas seharusnya memiliki kedua mekanisme perpindahan panas konveksi dan radiasi, kecuali untuk permukaan bawah dan depannya [32]. 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 [31].

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 tiga pipa pada kolektor yang diuji secara eksperimental.

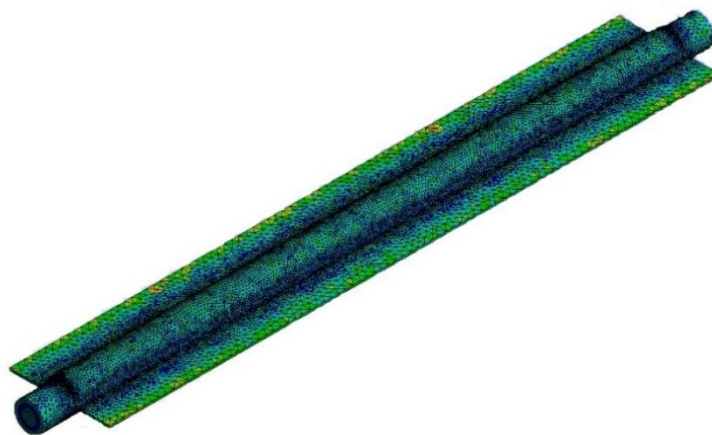
Selanjutnya pada tahapan *preprocessor* ini, sebuah benda atau model yang akan dianalisa dibagi-bagi dalam jumlah grid tertentu yang terdiri dari sejumlah node N pada setiap volume kontrol, proses ini biasanya dikenal dengan istilah *meshing*. Secara umum bentuk sel dari proses *meshing* dibagi menjadi dua jenis, yaitu dua dimensi dan tiga dimensi. Untuk sel dua dimensi terdapat dua jenis bentuk sel yaitu Triangle dan Quadrilateral. Bentuk sel tiga dimensi terbagi kedalam empat jenis, yaitu Tetrahedron, Pyramid, Triangular Prism, Hexahedron. Dalam proses *meshing* terdapat klasifikasi mesh yang terbagi kedalam tiga jenis, yaitu [33]:

- A. *Structured mesh*, adalah *meshing* terstruktur, dapat dikenali dari konektivitas mesh yang teratur dan rapi. Adapun mesh yang biasa menggunakan *structured mesh* adalah Quadrilateral di 2D dan Hexahedra di 3D.
- B. *Unstructured mesh* merupakan mesh yang konektivitas meshnya tidak beraturan. Mesh ini biasanya menggunakan triangle pada 2D dan tetrahedra pada 3D.
- C. Struktur mesh yang ketiga adalah *Hybrid mesh* yang merupakan kombinasi dari *Unstructured mesh* dan *Structured mesh*



Gambar 7. Jenis mesh : (a) hexahedra, (b) tetrahedra

Gambar 7 menampilkan jenis mesh hexahedra dan tetrahedra. Semakin kecil ukuran mesh akan menghasilkan hasil komputasi yang lebih detail dan akurat, namun akan menambah jumlah elemennya, sehingga akan membutuhkan effort komputasi yang lebih tinggi [34]. Jumlah total node N dalam grid yang dihasilkan dibatasi oleh kapasitas memori komputer dan waktu operasi CPU [35]. Waktu dan keakuratan simulasi juga bergantung pada ukuran dan jumlah grid. Jumlah grid yang tinggi akan menghasilkan akurasi yang baik begitu pula sebaliknya [32]. 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 [36].



Gambar 8. Contoh hasil *meshing*

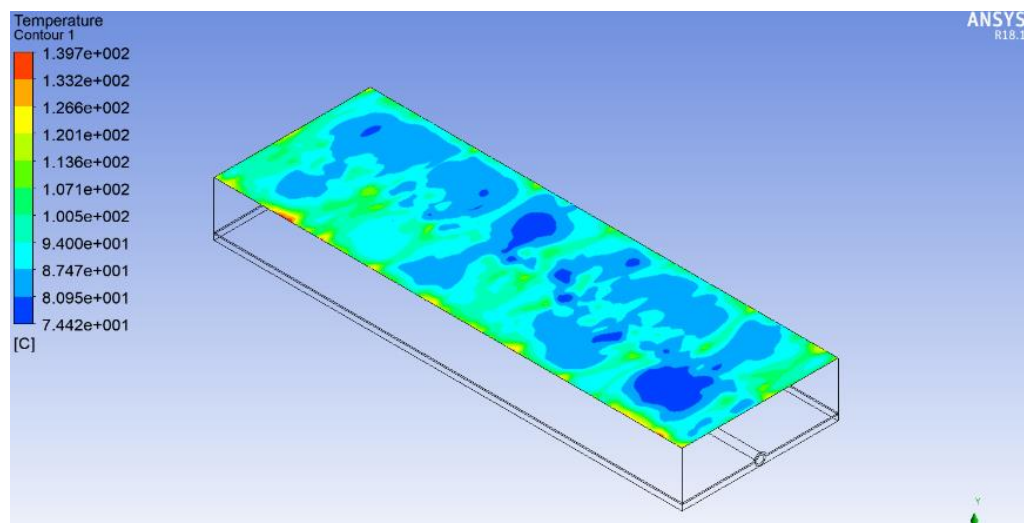
2) Processor

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 seperti **Gambar 9** [31].



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.