

**SKRIPSI**

**ANALISIS EFISIENSI TERMAL KINERJA PEMANAS AIR  
TENAGA MATAHARI MENGGUNAKAN *EVACUATED TUBE  
COLLECTOR* (ETC) DENGAN PENAMBAHAN *PHASE  
CHANGE MATERIAL* (PCM)**

**Disusun dan diajukan oleh :**

**ACHMADANI ASWIN  
D021191026**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK  
FAKULTAS TEKNIK DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2023**

## LEMBAR PENGESAHAN

### ANALISIS EFISIENSI TERMAL KINERJA PEMANAS AIR TENAGA MATAHARI MENGGUNAKAN *EVACUATED TUBE COLLECTOR (ETC)* DENGAN PENAMBAHAN *PHASE CHANGE MATERIAL (PCM)*

Disusun dan diajukan oleh

**ACHMADANI ASWIN**  
**D021191026**

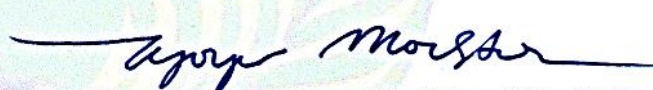
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka  
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Mesin  
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin  
Pada tanggal: **19 DECEMBER 2013**  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,

  
Prof. Dr. Eng. Ir. Jalaluddin, S.T., M.T  
NIP. 19720825 200003 1 001

  
Dr. Eng. Andi Amijoyo Mochtar, S.T., M.Sc  
NIP. 19760216 201012 1 002

Ketua Program Studi,

  
Prof. Dr. Eng. Ir. Jalaluddin, S.T., M.T  
NIP. 19720825 200003 1 001

## PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : ACHMADANI ASWIN  
NIM : D021191026  
Program Studi : Teknik Mesin  
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul :

*“ANALISIS EFISIENSI TERMAL KINERJA PEMANAS AIR TENAGA  
MATAHARI MENGGUNAKAN EVACUATED TUBE COLLECTOR (ETC)  
DENGAN PENAMBAHAN PHASE CHANGE MATERIAL (PCM)”*

Adalah karya tulis saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.


Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggung jawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 20 Desember 2023

Yang Menyatakan,

  
ACHMADANI ASWIN

## ABSTRAK

**ACHMADANI ASWIN.** *Analisis Efisiensi Termal Kinerja Pemanas Air Tenaga Matahari Menggunakan Evacuated Tube Collector (ETC) Dengan Penambahan Phase Change Material (PCM)* (dibimbing oleh Jalaluddin dan Andi Amijoyo Mochtar)

Potensi energi terbarukan sangatlah melimpah di Indonesia salah satunya energi matahari atau energi surya. Potensi energi matahari yang dimiliki Indonesia berkisar antara 4,8 kWh/m<sup>2</sup>. Potensi yang dimiliki dapat dimanfaatkan menjadi pemanas air tenaga matahari. Adapun kolektor yang digunakan adalah *Flat plate collector* (FPC), *evacuated tube collector* (ETC) dan *parabolic trough collector* (PTC) dan dalam penelitian ini yang digunakan adalah ETC. Berbagai macam penelitian telah banyak dilakukan untuk meningkatkan efisiensi termal dari ETC, salah satunya adalah penambahan *phase change material* (PCM) sebagai *thermal storage* dan memodifikasi bentuk sirip pada ETC. Konfigurasi penambahan PCM pada ETC yang digunakan adalah *filled u-tube* dengan bagian ½ dari kolektor yang terisi oleh PCM. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental. Eksperimen dilakukan untuk menguji perbandingan antara ETC standar dan ETC dengan penambahan PCM yang diuji selama 240 menit dengan masing-masing dilakukan tiga kali pengujian sebagai validasi data. Intensitas cahaya dan laju aliran konstan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi ETC dengan penambahan PCM lebih tinggi dibandingkan ETC standar. ETC dengan penambahan PCM memiliki efisiensi sebesar 63%, 63% dan 64% sedangkan ETC standar memiliki efisiensi sebesar 52%, 54% dan 54%. Sebagai kesimpulan ETC yang diberikan penambahan PCM dapat meningkatkan efisiensi sebesar 10% karena PCM dapat berperan sebagai penyimpan termal yang diserap dan mengurangi kehilangan panas pada kolektor.

Kata Kunci : Pemanas air tenaga matahari, ETC, PCM, Efisiensi.

## **ABSTRACT**

**ACHMADANI ASWIN.** *Analysis of Thermal Efficiency of Solar Water Heater Performance Using Evacuated Tube Collector (ETC) with the Addition of Phase Change Material (PCM)* (mentored by Jalaluddin and Andi Amijoyo Mochtar)

The potential of renewable energy is very abundant in Indonesia, one of which is solar energy or solar energy. Indonesia's solar energy potential ranges from 4.8 kWh/m<sup>2</sup>. Its potential can be utilized as a solar water heater. The collectors used are *Flat plate collector (FPC)*, *evacuated tube collector (ETC)* and *parabolic thorough collector (PTC)* and in this study the *ETC* used. Various kinds of research have been carried out to improve the thermal efficiency of ETC, one of which is the addition of *phase change material (PCM)* as *thermal storage* and modifying the shape of fins on ETC. Configuration of addition PCM to ETC is filled U-tube with a half of part collector was filled by PCM. The method used in this study is an experimental method. Experiments were conducted to test the comparison between standard ETC and ETC with the addition of PCM were experiment for 240 minutes with three tests each conducted as data validation. Light intensity and flow rate are constant. The results showed that the efficiency of ETC with the addition of PCM was higher than standard ETC. ETC with the addition of PCM has efficiencies of 63%, 63% and 64% while standard ETC has efficiencies of 52%, 54% and 54%. In conclusion, the addition of PCM can increase efficiency by 10% because PCM can act as an absorbed thermal storage and reduce heat loss in collectors.

Keywords : Solar water heater, ETC, PCM, Efficiency.

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	ii
ABSTRAK.....	iii
<i>ABSTRACT</i> .....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR SINGKATAN ARTI SIMBOL.....	viii
DAFTAR LAMPIRAN.....	x
KATA PENGANTAR.....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1.Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Manfaat Penelitian.....	4
1.5. Ruang Lingkup.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Sistem Pemanas Air Tenaga Matahari .....	6
2.2. Kolektor Pemanas air tenaga matahari.....	10
2.3. <i>Evacuated Tube Collector</i> (ETC).....	12
2.4. ETC tipe U-tube.....	15
2.5. Perpindahan Panas.....	15
2.6. <i>Phase Change Material</i> (PCM).....	18
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	23
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian.....	23
3.2. Variabel Penelitian.....	23
3.3. Bahan Uji.....	23
3.4. Teknik Pengumpulan Data.....	27
3.5. Teknik Analisis.....	28
3.6. Diagram Alir Penelitian.....	31
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	32
4.1. Analisis Hasil Pengujian Eksperimental.....	32
4.2. Pembahasan.....	37
BAB 5 PENUTUP.....	44
5.1. Kesimpulan.....	44
5.2. Saran.....	44
DAFTAR PUSTAKA.....	46

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. <i>Evacuated tube collector (ETC)</i> .....	2
Gambar 2. Pemanas air tenaga matahari sederhana.....	6
Gambar 3. <i>Open – loop active system</i> .....	7
Gambar 4. <i>Closed – loop active system</i> .....	8
Gambar 5. <i>Closed – loop active system</i> .....	9
Gambar 6. Sistem termosifon .....	10
Gambar 7. Kolektor plat datar.....	11
Gambar 8. Kolektor parabola majemuk stasioner.....	11
Gambar 9. <i>Evacuated Tube Collector</i> .....	12
Gambar 10. Variasi tipe ETC.....	13
Gambar 11. <i>Simplified geometry of a single evacuated tube</i> .....	14
Gambar 12. Sistematika ETC dengan tipe <i>U-tube</i> .....	15
Gambar 13. Skema diagram <i>U-tube</i> .....	15
Gambar 14. Konsep Konduksi.....	16
Gambar 15. Konsep Konveksi.....	17
Gambar 16. Konsep Radiasi.....	17
Gambar 17. Jaringan termal ETC.....	18
Gambar 18. Klasifikasi PCM.....	18
Gambar 19. Variasi tipe PCM yang dengan penambahan pada ETC.....	20
Gambar 20. <i>Schematic diagram of the ETSC integrated with Ne-PCM</i> .....	21
Gambar 21. Dimensi <i>Evacuated Tube Collector (ETC)</i> tipe <i>U-tube</i> .....	24
Gambar 22. Gambar susunan <i>Evacuated Tube Collector (ETC)</i> yang akan diuji.	25
Gambar 23. Gambar ETC standar yang diuji.....	25
Gambar 24. Gambar ETC dengan penambahan PCM yang diuji.....	26
Gambar 25. Desain kolektor ETC yang akan diuji.....	26
Gambar 26. <i>Schematic diagram of the experimental setup</i> .....	27
Gambar 27. Skema bagian pengukuran data.....	27
Gambar 28. Gambar alat <i>Principle of Solar Thermal Energy</i> .....	29
Gambar 29. Diagram Alir Penelitian.....	31
Gambar 30. Temperatur inlet dan outlet pada kolektor.....	37
Gambar 31. Energi kalor yang diserap antara ETC standar dan ETC dengan penambahan PCM.....	38
Gambar 32. Grafik perbandingan efisiensi kolektor pada ETC standar dan ETC dengan penambahan PCM .....	39
Gambar 33. Grafik Temperatur pelat absorber.....	41
Gambar 34. Grafik Temperatur PCM.....	42
Gambar 35. Grafik Intensitas cahaya.....	43

**DAFTAR TABEL**

Tabel 1. <i>Thermophysical properties of PCM dan nano-PCM.</i> .....	19
----------------------------------------------------------------------	----



## DAFTAR SINGKATAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
$\theta$	Derajat kemiringan
%	Presentase
$V_w$	Kecepatan Angin
$\dot{m}$	Laju Aliran Massa
$C_p$	Panas Spesifik
$A_c$	Luas permukaan benda
$\dot{V}$	Laju aliran massa
C	Celsius
ETC	Evacuated Tube Collector
ET 202	Energy Thermal Seri 202
FPC	Flat Plate Collector
PCM	Phase Change Material
PTC	Parabolic Through Collector
T	Temperatur
W	Watt
R	Radiation / Radiasi
I	Intensitas Cahaya
L/h	Liter per hour
J	Joule
Liquid	Cairan
Solid	Padatan
SWH	Pemanas air tenaga matahari
g	Percepatan Gravitasi
m	Meter
mm	Milimeter
ICS	Integrasi Collector Storage
kg	Kilogram
S	Radiasi Per Satuan Luas

Qu	Energi yang Berguna
$\eta$	Efisiensi
K	Kelvin
$\alpha$	Absorbsivitas rata-rata
$\varepsilon_p$	Emisivitas pelat absorber
$\varepsilon_c$	Emisivitas kaca
$\tau$	Transmivitas kaca penutup

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Tabel <i>Properties of miscellaneous material</i> .....	49
Lampiran 2. Tabel <i>Properties of insulating material</i> .....	50
Lampiran 3. Tabel <i>Properties of air at 1 atm pressure</i> .....	51
Lampiran 4. Tabel <i>Properties of saturated water</i> .....	52
Lampiran 5. Tabel Pengambilan Data ETC Standar (1).....	53
Lampiran 6. Tabel Pengambilan Data ETC Standar (2).....	55
Lampiran 7. Tabel Pengambilan Data ETC Standar (3).....	57
Lampiran 8. Tabel Pengambilan Data ETC Dengan penambahan PCM (1).....	58
Lampiran 9. Tabel Pengambilan Data ETC Dengan penambahan PCM (2).....	61
Lampiran 10. Tabel Pengambilan Data ETC Dengan penambahan PCM (3).....	63
Lampiran 11. Tabel Hasil Perhitungan ETC Standar (1), (2) dan (3).....	65
Lampiran 12. Tabel Hasil Perhitungan ETC Dengan penambahan PCM (1), (2) dan (3).....	67
Lampiran 13. Dokumentasi.....	69

## KATA PENGANTAR

*Bismillahirrohmanirrohim,*

*Alhamdulillah*, Puji dan Syukur kita panjatkan kepada Allah SWT. Dzat yang hanya kepada-Nya memohon pertolongan karena atas segala pertolongan, rahmat, dan kasih sayang-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“ANALISIS EFISIENSI TERMAL KINERJA PEMANAS AIR TENAGA MATAHARI MENGGUNAKAN *EVACUATED TUBE COLLECTOR (ETC)* DENGAN PENAMBAHAN *PHASE CHANGE MATERIAL (PCM)*”** yang menjadi salah satu syarat kelulusan di Departemen Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad Sallallahu Alaihi Wasallam yang senantiasa menjadi sumber inspirasi dan teladan terbaik bagi umat manusia.

Penulis menyadari dalam menyelesaikan skripsi 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 skripsi dan penelitian ini telah selesai.

Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Jalaluddin, ST, MT selaku Pembimbing pertama dan Bapak Dr. Eng. Andi Amijoyo Mochtar, S.T., M.Sc selaku pembimbing kedua, yang telah memberikan banyak pelajaran berharga bagi penulis yang tidak bisa ternilai, meluangkan waktu dan tenaganya dan juga memberikan motivasi dan ide-ide kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

Tidak Lupa penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Ayahanda Aswin Madong yang senantiasa memberikan dukungan, motivasi, dan semangat kepada penulis dan ibunda Hasmin Rauf yang tanpa lelah dari kecil merawat dengan penuh kasih sayang yang tulus kepada penulis hingga saat ini, dan memberikan dukungan dan semangat yang tiada habisnya kepada penulis, dan juga kepada saudara serta keluarga besar yang namanya tidak dapat disebutkan satu-persatu yang selalu memberikan bantuan serta dukungan kepada penulis.

Pada kesempatan ini penulis juga mengucapkan terima kasih kepada:

1. Yth. Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc. selaku Rektor Universitas Hasanuddin.
2. Yth Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Yth. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Jalaluddin, S.T., M.T. selaku Ketua Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah menyetujui dan menerima tugas akhir penulis.
4. Seluruh dosen Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah mendidik, mengajarkan, dan membagikan ilmu serta pengetahuannya sehingga penulis semakin paham akan bidang ilmu teknik terkhusus pada bidang Teknik mesin
5. Staf Departemen Teknik Mesin, terkhusus Ibu Sita, Kak Yaya, Pak Arham dan juga Pak Mansur yang telah banyak membantu.
6. HMM FT-UH yang menjadi tempat belajar dan bermain selama proses perkuliahan maupun dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
7. UKMT Badminton 09 SMFT-UH yang memberikan pengalaman dan hiburan selama perkuliahan dengan bermain bulutangkis.
8. ART 09 SMFT-UH yang memberikan ilmu dan pengalamannya mengenai ilmu kedirgantaraan dan teknologi robot terbang dan sempat mengikuti KRTI 2021.
9. UKM Bulutangkis Universitas Hasanuddin sebagai tempat belajar dan menghibur diri selama perkuliahan dengan bermain bulutangkis dan bertemu dengan orang-orang baru di Kawasan Unhas Tamalanrea.
10. Annisa Nurul Hasanah Hiyar, S.A.P yang telah menemani dan memberikan dukungan berupa semangat, motivasi, serta inspirasi untuk terus berjuang menyelesaikan tugas akhir.
11. Teman-teman seperjuangan di Laboratorium Energi Terbarukan yang setia menemani selama masa pengambilan data dan penulisan tugas akhir.
12. Saudara-saudara seperjuangan mahasiswa Departemen Teknik Mesin BRUZHLEZZ 2019 yang telah memberi semangat, dukungan, maupun doa dan kerja sama yang sudah dijalani selama ini.

13. Kanda-kanda senior HYDRAULIC<sup>15</sup>, COMPREZZOR<sup>16</sup>, ZYNCROMEZH<sup>17</sup>, dan REACTOR<sup>18</sup> serta adik-adik ZTATOR<sup>20</sup> dan DEZILTER<sup>21</sup> yang telah memberi bantuan selama proses perkuliahan maupun masukan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
14. Teman-teman di tongkrongan Bismillah Cumlaude, Sirkel Paskibra 110 Smapul dan FOXEL.
15. Terakhir, penulis hendak menyapa setiap nama yang tak sempat penulis cantumkan satu per satu, terima kasih atas doa yang senantiasa mengalir tanpa sepengetahuan penulis. Terima kasih sebanyak-banyaknya kepada orang yang turut bersukacita atas keberhasilan penulis menyelesaikan skripsi ini.

Semoga Allah SWT membalas kebaikan kalian semua baik dengan pahala ataupun rejeki. Penulis menyadari skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, sehingga penulis dengan sangat terbuka menerima kritikan dan saran yang membangun agar penulis dapat terus berkembang kedepannya.

Gowa, 20 Desember 2023

Penulis

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

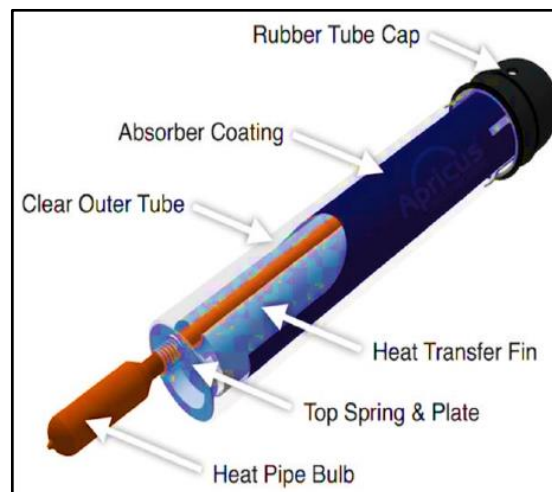
Energi terbarukan merupakan sumber energi yang ramah lingkungan dan dapat diperbaharui mengingat saat ini orang-orang masih menggunakan energi yang berasal dari bahan bakar fosil yang telah menipis dan diprediksi suatu saat akan habis. Energi yang berasal dari bahan bakar fosil juga memiliki dampak kurang baik terhadap lingkungan yang dapat mengakibatkan polusi dan pencemaran lingkungan sehingga menyebabkan terjadinya pemanasan global (*global warming*). Sehingga pengembangan energi terbarukan diharapkan mampu menjadi solusi krisis energi di Indonesia.

Potensi energi terbarukan di Indonesia yang telah dimanfaatkan saat ini antara lain biomassa, panas bumi, energi matahari, energi air, energi angin, energi samudra, *hydro power*. Potensi energi tersebut sangatlah melimpah di Indonesia salah satunya energi matahari atau energi surya. Energi matahari saat ini sudah diaplikasikan di Indonesia mengingat Indonesia merupakan negara yang beriklim tropis. Potensi energi matahari yang dimiliki Indonesia berkisar antara 4,8 kWh/m<sup>2</sup>. Potensi energi matahari yang dimiliki dapat dimanfaatkan menjadi energi panas pada pengaplikasian pemanas air tenaga matahari dengan menggunakan kolektor sebagai penyerap dan pengumpul panas. Energi panas yang diserap ditransfer ke air dari kolektor dengan menerapkan prinsip perpindahan panas (Gede Widayana, 2012).

Pemanas air tenaga matahari merupakan salah satu pemanfaatan energi matahari dalam kehidupan sehari-hari. Air panas yang dihasilkan dapat dimanfaatkan untuk kehidupan sehari-hari, mulai dari keperluan rumah tangga hingga keperluan industri. Pemanas air tenaga matahari yang menggunakan matahari sebagai media yang memanaskan air dianggap merupakan cara yang lebih mudah dan murah jika dibandingkan dengan menggunakan energi listrik ataupun membeli bahan bakar gas ataupun bahan bakar minyak. Pemanas air tenaga matahari merupakan cara yang efektif dan efisien dalam memanaskan air karena hanya melalui pancaran tenaga matahari/sinar matahari langsung kita dapat memperoleh air panas. Pemanas air tenaga matahari telah banyak digunakan di

negara-negara maju seperti Jepang dan Amerika. Adapun jenis kolektor yang biasa digunakan adalah *Flat plate collector* (FPC), *evacuated tube collector* (ETC) dan *parabolic thorough collector* (PTC) dan dalam penelitian ini yang digunakan adalah ETC.

ETC merupakan cara pemanfaatan pemanas air tenaga matahari dengan menggunakan tabung yang dievakuasi yang terdiri atas beberapa lapisan seperti pada gambar 1. Sejauh ini, ETC adalah kolektor termal matahari yang paling banyak digunakan di pasar karena kerugian konvektif yang lebih sedikit. Berbagai macam jenis konstruksi dari ETC seperti (*heat pipe, thermosiphon, U-Tube*) digunakan oleh peneliti yang berbeda. Alhasil telah bermunculan ide-ide inovatif dalam meningkatkan efisiensi kinerja seperti teknik modifikasi geometris yang berbeda seperti mengintegrasikan reflektor dan sirip pipa panas dengan penambahan digunakan oleh berbagai peneliti untuk peningkatan kinerja termal (Amit Kumar, 2021).



Gambar 1. *Evacuated tube collector* (ETC)

Sumber : Amit Kumar, 2021.

Tingginya efisiensi termal dan relatif harganya yang murah menjadi alasan utama kenapa saat ini ETC sangat dominan dipasaran. Efisiensi yang lebih tinggi dapat dicapai oleh ETC karena sensitif terhadap arah sinar matahari. Bentuk silinder ETC memungkinkan untuk menyerap sinar matahari secara langsung dan difusi. Dengan kemampuan seperti itu memungkinkan ETC memiliki efisiensi yang lebih baik (M. Aramesh, 2020).



Pemanfaatan ETC pada pemanas air tenaga matahari saat ini telah menghasilkan berbagai inovasi untuk meningkatkan efisiensi dalam penggunaannya. Salah satunya yang umum digunakan pada kolektor pemanas air tenaga matahari adalah penambahan *Phase change material* (PCM).

PCM sebagai inovasi terhadap ETC mampu menghasilkan karakteristik yang diinginkan oleh spesifikasi alat. Di antara spesifikasi itu adalah kemampuan PCM berperan sebagai penyimpanan isothermal dan mengurangi kehilangan panas. Perpindahan panas isothermal ini membuat PCM mampu mereduksi fluktuasi temperatur *outlet* dari sistem energi panas dalam dimana PCM digunakan. Oleh karena itu PCM sangat baik sebagai penyimpanan energi panas matahari (M. Aramesh, 2020).

Untuk lebih mengetahui efisiensi kinerja termal dari pemanas air tenaga matahari dengan ETC, maka dilakukan penelitian dengan judul “**ANALISIS EFISIENSI TERMAL KINERJA PEMANAS AIR TENAGA MATAHARI MENGGUNAKAN *EVACUATED TUBE COLLECTOR* (ETC) DENGAN PENAMBAHAN PCM *PHASE CHANGE MATERIAL* (PCM)**”. Pada penelitian ini dilakukan penambahan PCM pada bagian dalam dari ETC yang dapat meningkatkan performa dari pemanas air tenaga matahari karena PCM mampu dengan baik menyimpan energi panas matahari sehingga panas yang terbuang/*losses* dapat diminimalisirkan sehingga berpengaruh pada peningkatan efisiensi kinerja termal dari ETC.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang di atas, beberapa permasalahan yang muncul dapat dirumuskan sebagai berikut :

1. Bagaimana proses perancangan dan pembuatan pemanas air tenaga matahari ETC dengan penambahan PCM ?
2. Bagaimana pengaruh penggunaan PCM yang dengan penambahan pada ETC terhadap efisiensi pemanas air tenaga matahari ?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang di atas, diperoleh beberapa tujuan dari penelitian, yakni :

1. Untuk membuat rancang bangun sistem pemanas air tenaga matahari ETC dengan penambahan PCM.
2. Menganalisis pengaruh penambahan PCM terhadap efisiensi pemanas air tenaga matahari ETC.

### 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah :

a. Bagi Penulis

1. Sebagai syarat untuk menyelesaikan studi dan mendapatkan gelar Sarjana Teknik Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. Dapat mengaplikasikan ilmu dan keterampilan yang diperoleh pada masa kuliah.

b. Bagi Universitas

1. Dapat menjadi referensi untuk penelitian dan pengembangan *water heater* dengan *evacuated tube collector*.
2. Dapat menjadi bahan referensi bagi generasi mendatang dalam pembuatan dan penyusunan tugas akhir.

c. Bagi Industri

1. Sebagai bahan referensi bagi industri yang bergerak di bidang pemanfaatan energi matahari khususnya pemanas air tenaga matahari dengan *evacuated tube collector*

### 1.5 Ruang Lingkup

Dalam penelitian kali ini, batasan masalahnya adalah :

1. Jenis ETC yang digunakan adalah ETC dengan tipe *U-tube*.
2. Jumlah ETC yang digunakan sebanyak 3 buah.

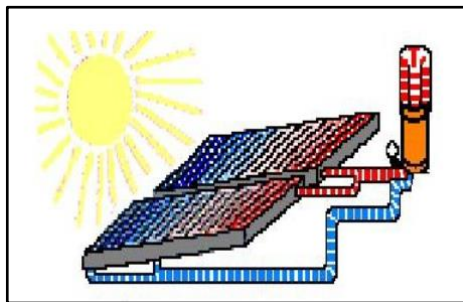
3. Laju aliran konstan.
4. Kemiringan kolektor pada sudut  $10^\circ$ .
5. Sistem sirkulasi yang digunakan adalah *open loop*.
6. Jenis konfigurasi PCM adalah *filled U-tube ETC*.
7. Material PCM yang digunakan adalah organik paraffin.
8. Penelitian dilakukan secara eksperimental.

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Sistem Pemanas Air Tenaga Matahari

Pemanfaatan energi matahari dapat digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti pada sistem pemanas air pada gambar 2. Dalam sistem pemanas air, panas matahari berperan sebagai sumber panas dan kolektor sebagai pengumpul panas yang berfungsi untuk mengumpulkan panas matahari serta memperbesar temperatur dari panas matahari yang di dalamnya terdapat pipa tembaga yang dirancang sedemikian rupa sebagai tempat air mengalir atau bersirkulasi. Pemanas air dengan tenaga matahari dapat digunakan dalam kehidupan sehari-hari seperti mencuci, mandi dan lain sebagainya. Karena menggunakan panas matahari sebagai sumber energinya, maka hasilnya akan bergantung pada keadaan cuaca dalam mempengaruhi radiasi panas matahari yang sampai ke bumi. Panas dari matahari masuk kedalam kolektor melalui kaca yang akan menyebarkan panas tersebut secara merata di dalam kolektor, lalu air yang mengalir melalui pipa tembaga di dalam kolektor akan menyerap panas tersebut, sehingga dihasilkan panas yang sebanding dengan panas yang berada di dalam kolektor (S. Sidopekso, 2011).



Gambar 2. Pemanas air tenaga matahari sederhana

Sumber : S. Sidopekso, 2011

Pemanas tenaga matahari atau *solar water heater* adalah alat pengumpul panas dari energi matahari yang digunakan untuk memanaskan fluida. Pemanas ini menggunakan kolektor matahari sebagai komponen utamanya. Menurut *Duffie & Beckman* pada alat penukar kalor berfungsi untuk yang mengubah energi radiasi menjadi energi panas. Menurut standard *ASHRAE* definisi kolektor matahari adalah alat yang didesain untuk menyerap radiasi matahari dan mentransfer energi tersebut ke fluida yang kolektor matahari tersebut. (Rianda, 2017).

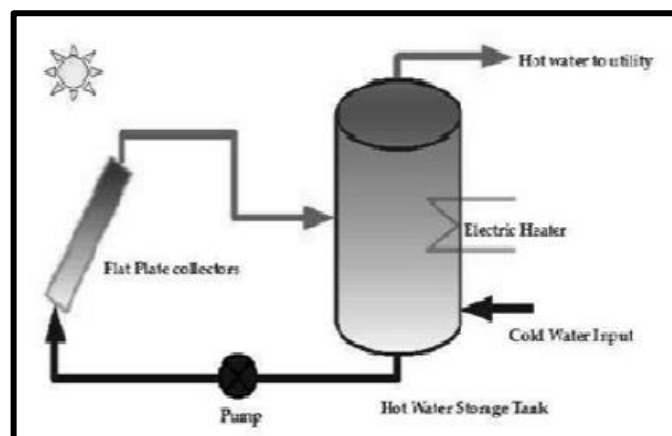
Adapun jenis sistem pemanas air antara lain :

### 2.1.1. Sistem pemanas air matahari aktif

Sistem pemanas air matahari aktif menggunakan pompa listrik, katup, dan pengontrol untuk mensirkulasikan aliran air atau fluida perpindahan panas lainnya melalui kolektor. Jadi, sistem Aktif juga disebut sistem sirkulasi paksa dan dapat langsung atau tidak langsung. Sistem aktif dibagi lagi menjadi dua kategori:

#### 1. Sistem sirkulasi langsung (Open – loop system)

Sistem ini mengedarkan air dari tangki penyimpanan ke kolektor matahari dan mengembalikannya lagi dengan bantuan pompa. Dalam metode ini, energi panas dari matahari ditransfer ke sirkulasi air minum langsung melalui kolektor dan tangki. Itulah sebabnya disebut sistem sirkulasi langsung atau sistem loop terbuka. *Anti-freeze* dapat digunakan dalam sistem ini. Ini juga menggunakan berbagai pengontrol untuk merasakan temperatur yang diperlukan mengenai menyalakan dan mematikan pompa ketika diperlukan dan memiliki satu atau lebih kolektor yang dipasang di atap dan tangki penyimpanan yang terletak sesuai di gedung (Kalogirou, 2004).

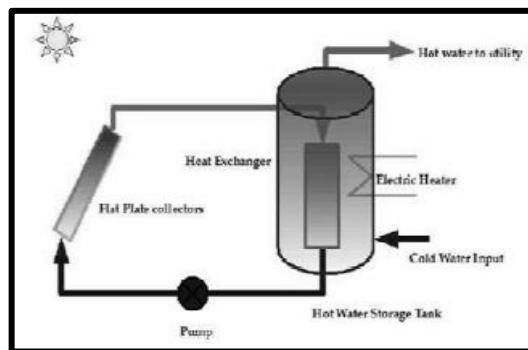


Gambar 3. *Open – loop active system*  
Sumber : Patel et al., 2012

#### 2. Sistem sirkulasi tidak langsung (Closed – loop system)

Sistem ini cocok untuk negara-negara yang lebih dingin, di mana kondisi pembekuan dapat terjadi. Cairan kerja dan penukar panas telah membutuhkan fitur tersebut. Dengan cara ini, panas dari matahari ditransfer

ke larutan fluida kerja dan mengedarkan cairan kerja ini dari kolektor ke tangki penyimpanan, dan penukar panas mentransfer panas dari fluida kerja ke air tangki penyimpanan sebelum mengembalikannya lagi dengan bantuan pompa. Biasanya, penukar panas berdinding ganda diperlukan ketika menggunakan cairan kerja beracun. Perpindahan panas terjadi dalam siklus loop tertutup; itulah sebabnya disebut sistem sirkulasi tidak langsung atau sistem loop tertutup. Loop ini termasuk kolektor, pipa penghubung, pompa, tangki ekspansi, penukar panas, dan pengontrol. Perlu diingat bahwa koil penukar panas harus ditempatkan di bagian bawah tangki penyimpanan untuk mengubah panas secara akurat (Kalogirou, 2004).

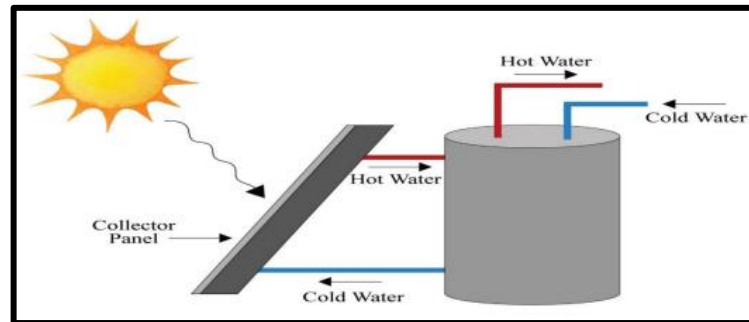


Gambar 4. *Closed – loop active system*  
Sumber : Patel et al., 2012.

### 2.1.2. Sistem pemanas air tenaga matahari pasif

Sistem pasif hanya mengalirkan air atau fluida perpindahan panas dengan konveksi alami antara kolektor dan tangki penyimpanan yang ditinggikan (di atas kolektor). Prinsipnya sederhana, karena cairan memanaskan kepadatannya berkurang. Cairan menjadi lebih ringan dan naik ke atas kolektor di mana ia ditarik ke tangki penyimpanan. Cairan yang telah mendingin di kaki tangki penyimpanan kemudian mengalir kembali ke kolektor. Sistem pasif bisa lebih efisien daripada sistem aktif, tetapi juga bisa kurang efisien. Sistem thermosiphon adalah contoh terbaik dari sistem pasif (Patel et al., 2012).

Berikut penjelasan mengenai sistem yang termasuk dalam sistem pemanas air tenaga matahari pasif :



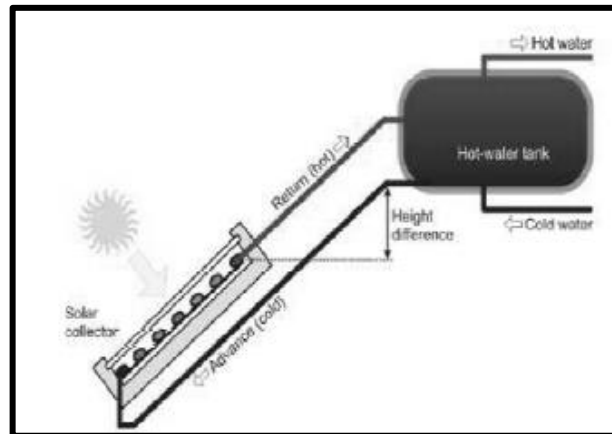
Gambar 5. Closed – loop active system  
Sumber : Kalogirou, 2004.

### 1. Integrasi – Collector Storage (ICS) system

Integrasi – Collector Storage system atau ICS system adalah salah satu jenis sistem pemanas air matahari pasif yang paling populer. Dalam sistem ini, kolektor dianggap sebagai sistem penyimpanan air panas. Ketika kolektor dipanaskan oleh matahari, air dingin dari luar mengalir secara progresif melalui kolektor dan dipanaskan. Akhirnya, air panas dari atas ditarik ke tangki penyimpanan untuk penggunaan lebih lanjut, dan di bagian bawah, air pengganti mengalir terus menerus. Pompa dan pengontrol tidak digunakan dalam sistem sederhana ini, tetapi katup perlindungan beku tipe flush diperlukan di perpipaan atas dekat kolektor untuk melindungi dari pembekuan (Kalogirou, 2004).

### 2. Sistem Termosiphon

Sistem termosiphon relatif lebih rumit daripada sistem penyimpanan kolektor integral. Dalam sistem ini, pompa dan pengontrol yang beredar tidak digunakan. Air dingin mengalir langsung ke tangki yang dipasang pada kolektor, dipanaskan dari kolektor, dan mengembang sedikit dan menjadi lebih ringan daripada air dingin tangki. Karena gravitasi dan air yang disebutkan di atas properti, air dingin mendorong air panas melalui outlet kolektor dan menyimpan air panas ke bagian atas tangki. Air panas ini kemudian mengalir dari tangki atas ke tangki cadangan, dipasang di permukaan tanah setiap kali permintaan air panas diperlukan di gedung (Kalogirou, 2004).



Gambar 6. Sistem termosifon

Sumber : Patel et al., 2012

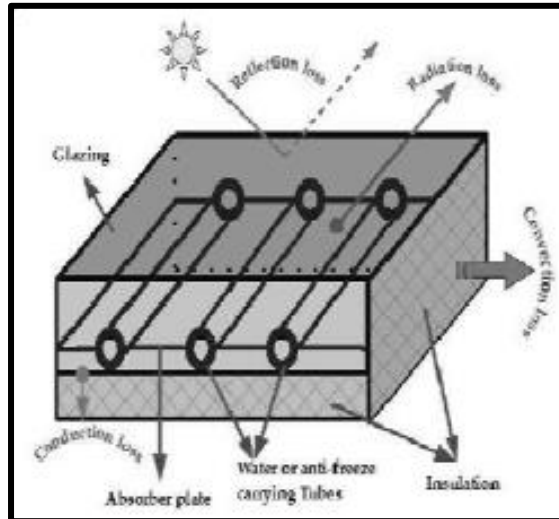
## 2.2 Kolektor pemanas air tenaga matahari

Pemanfaatan energi matahari menjadi pemanas air perlu memerlukan beberapa komponen agar dapat berjalan dengan efektif. Salah satunya adalah kolektor. Kolektor merupakan bagian terpenting karena berperan sebagai absorber atau penerima panas dari matahari yang kemudian akan disalurkan dengan perpindahan panas secara konveksi ke air. Oleh karena itu kolektor merupakan bagian terpenting dalam perancangan pemanas air tenaga matahari. Adapun jenis kolektor yang biasa digunakan pada pemanas air tenaga matahari adalah *Flat plate collector* (FPC), *evacuated tube collector* (ETC) dan *Parabollic through collector* (PTC). Adapun penjelasan FPC dan PTC sebagai berikut :

### a. *Flat plate collector*

Kolektor pelat datar digunakan secara luas untuk aplikasi pemanas air domestik. Ini sederhana dalam desain dan tidak memiliki bagian yang bergerak sehingga membutuhkan sedikit perawatan. Ini adalah kotak terisolasi dan tahan cuaca yang berisi pelat penyerap gelap di bawah satu atau lebih penutup transparan. Mereka mengumpulkan radiasi langsung dan difus. Kesederhanaan mereka dalam konstruksi mengurangi biaya awal dan pemeliharaan sistem. Gambaran yang lebih rinci tentang sistem ini menarik dan disajikan di bagian berikut (Patel et al., 2012).



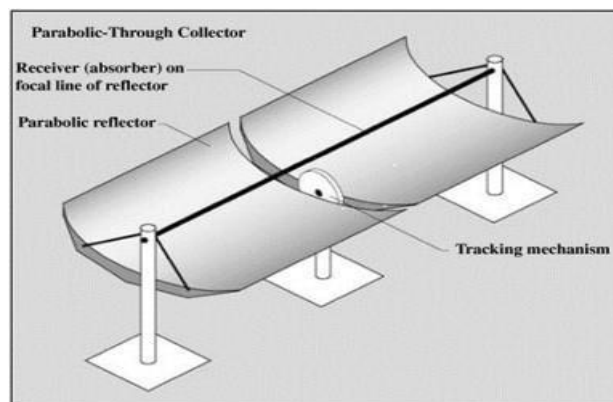


Gambar 7. Kolektor pelat datar

Sumber : Patel et al., 2012

b. *Parabolic through collector (PTC)*

Kolektor parabola majemuk stasioner, *stationary compound parabolic collectors (CPC)* merupakan jenis kolektor yang memiliki kemampuan dalam merefleksikan semua radiasi yang datang ke absorber tanpa batasan. Pergerakan konsentrator dibantu oleh reflektor pada dua sisi dari parabola saling berhadapan untuk mengatasi permasalahan orientasi arah matahari. Penggunaan multi reflektor memungkinkan radiasi apapun yang masuk dengan sudut terima, maka absorber yang terletak di bagian bawah akan mudah menyerap kalor dengan konfigurasi yang bervariasi (Kaligirou, 2004).



Gambar 8. Kolektor parabola majemuk stasioner

Sumber : Kaligirou, 2004.

### 2.3 *Evacuated Tube Collector (ETC)*

*Evacuated Tube Collector* (ETC) merupakan salah satu jenis kolektor yang dapat digunakan untuk memanfaatkan radiasi cahaya matahari yang digunakan untuk memanaskan air. Berdasarkan penelitian M.A. Sabiha 2015, ETC memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan *Flat Plate Collector (FPC)* dikarenakan ETC mampu mengumpulkan radiasi secara langsung dan radiasi difusi secara bersamaan. Selain memiliki performa termal yang baik, ETC juga memiliki instalasi yang mudah. ETC juga mampu beroperasi pada aplikasi temperatur tinggi lainnya seperti pemanas gas instan. Pada sebuah penelitian yang dilakukan oleh M.A. Sabiha 2015, membandingkan kinerja FPC dan pipa panas ETC untuk sistem pemanas air domestik. Dengan serupa kondisi lingkungan, efisiensi kolektor ditemukan menjadi 46,1% dan 60,7% dan efisiensi sistem ditemukan 37,9% dan 50,3% untuk FPC dan pipa panas ETC, masing-masing.

Prinsip kerja ETC pada dasarnya terdiri dari komponen utama ETC berupa tabung kaca dengan ruang vakum di dalamnya, absorber sebagai penyerap termal dalam bentuk pelat di dalam tabung kaca yang akan mengumpulkan panas dari cahaya matahari. Dalam inovasinya ditambahkan sirip yang dibentuk khusus yang difungsikan untuk mempercepat perpindahan panas dari pelat absorber ke pipa tembaga yang dialiri air. Perpindahan panas secara konduksi dari pelat absorber ke sirip dan ke pipa terjadi, kemudian dari pipa tembaga panas berpindah secara konveksi ke air yang mengalir pada pipa (M. Aramesh, 2020).

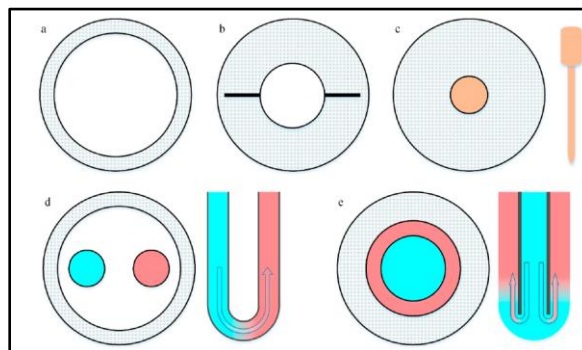


Gambar 9. *Evacuated Tube Collector*

Sumber : Amit Kumar, 2021

Desain dari jenis ETC terdapat pada gambar 10 dimana area titik-titik adalah ruang hampa ruang antara absorber dan bagian luar ETC. Mekanisme dari ETC dimana panas yang diserap dapat hilang dikarenakan proses konveksi, dan vakum bertindak sebagai isolator termal yang kuat dengan mengurangi kehilangan panas karena perpindahan panas konveksi terkhususnya pada banyak kasus untuk dua jenis ETC pertama yaitu *all glass tube* yang dilapisi semua kaca dan *metal-glass tube*. Untuk jenis ETC tipe *heat pipe* jenis panas yang diserap ditransfer dengan mekanisme *thermosyphon*. Tetapi untuk dua desain lainnya, perpindahan panas fluida menjadi hangat saat berlalu melalui tabung. Mekanisme ini juga berlaku untuk ETC *all glass tube* dan ETC *metal-glass tube*. Secara umum, jenis *heat pipe* yang digunakan biasanya diisi dengan air atau etilen glikol sehingga memiliki kinerja yang lebih baik dari desain lainnya (M. Aramesh, 2020).

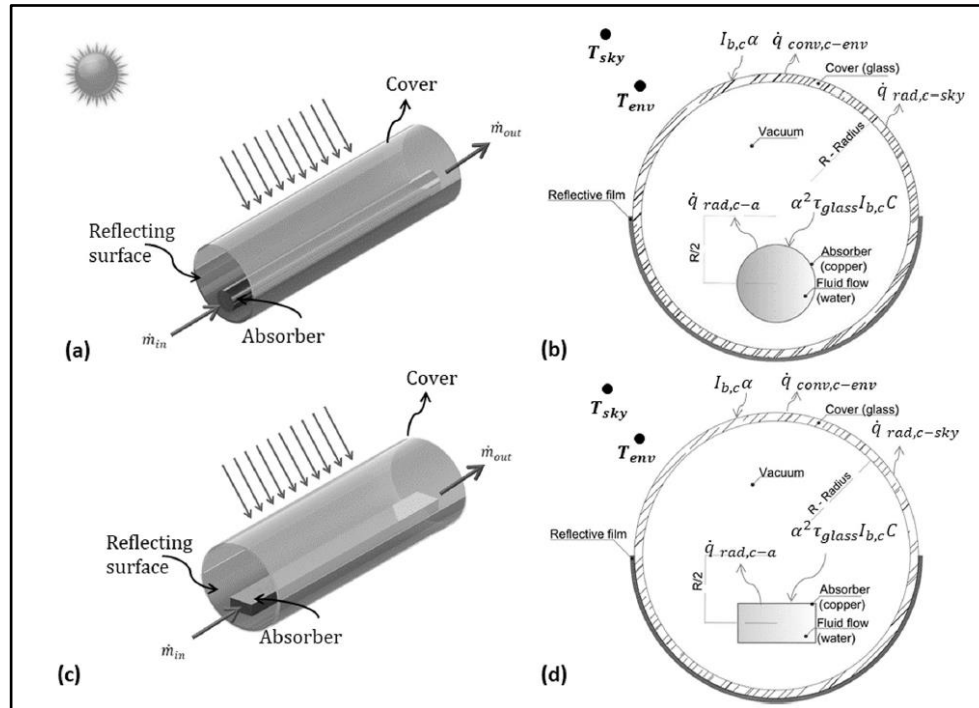
Jenis konstruksi dari ETC dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 10. Variasi tipe ETC. a) *all glass tube* b) *metal-glass tube* c) *heat pipe* d) *U-tube*  
e) *Double Pipe*

Sumber : M. Aramesh, 2020

Dalam desain ETC khususnya absorber yang dimiliki, menggunakan absorber berbentuk tabung atau lingkaran. Hal ini pernah diteliti dalam sebuah penelitian dengan variasi bentuk absorber antara berbentuk lingkaran dan persegi. Hasilnya menunjukkan bahwa absorber berbentuk lingkaran memiliki efisiensi lebih tinggi sebesar 8% dibandingkan berbentuk persegi dalam kondisi dan situasi yang sama (Kamal A.R. Ismail, 2021).



Gambar 11. *Simplified geometry of a single evacuated tube: (a) and (c) evacuated tube circular and rectangular, respectively, (b) and (d) collector cross-section circular and rectangular, respectively.*

Sumber : Kamal A.R. Ismail, 2021

Energi kalor yang dimanfaatkan dari konversi radiasi matahari ditunjukkan pada persamaan :

$$Qu = \dot{m}_{water} C_{p_{water}} \Delta T_{water} \quad (1)$$

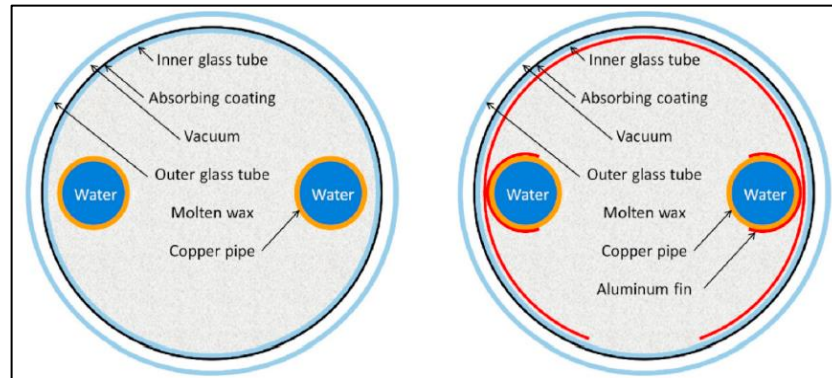
Dimana  $Qu$  : Energi kalor yang dimanfaatkan (kW)  
 $\dot{m}_{water}$  : laju aliran massa air (kg/s)  
 $C_{p_{water}}$ : Panas spesifik air (J/kg°C)  
 $\Delta T_{water}$ : Perbedaan temperatur air (°C)

Efisiensi kolektor dapat dihitung pada persamaan (Salem Argani, 2020) :

$$\eta = \frac{Qu}{A_c I} = \frac{\dot{m}_{water} C_{p_{water}} \Delta T_{water}}{A_c I} \quad (2)$$

Dimana  $\eta$  : Efisiensi kolektor (%)  
 $A_c$  : Area kolektor (m<sup>2</sup>)  
 $I$  : Intensitas radiasi matahari (W/m<sup>2</sup>)

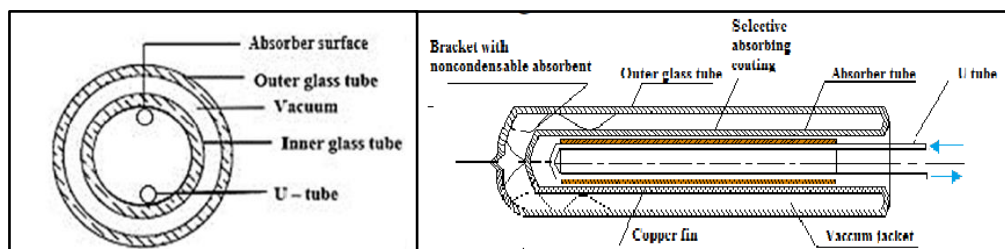
## 2.4 Evacuated Tube Collector (ETC) tipe *U-tube*



Gambar 12. Sistematika ETC dengan tipe *U-tube*

Sumber : M. Aramesh, 2020.

Pada gambar 12 terlihat sistematika ETC dengan tipe *u-tube*. ETC pada dasarnya adalah alat penukar panas yang mentransfer energi dari radiasi matahari ke fluida kerja. Intensitas radiasi matahari pada permukaan kaca luar dari tabung yang dievakuasi dipindahkan ke tabung kaca bagian dalam melalui proses perpindahan panas radiasi dan kemudian panas diserap oleh tabung. Dari tabung, perpindahan panas ke fluida kerja. Pada penelitian B. Kirain Naik, 2018 studi eksperimental untuk menganalisis ketergantungan efisiensi termal pada temperatur udara dan parameter desain tabung. Selanjutnya, mereka juga menyelidiki penyebaran temperatur di seluruh kolektor ETC. Secara eksperimental menyelidiki efek laju aliran fluida kerja, intensitas matahari dan temperatur udara pada kinerja ETC (B. Kiran Naik dkk, 2018).



Gambar 13. Skema diagram ETC tipe *U-tube*

Sumber : B. Kiran Naik dkk, 2018.

## 2.5 Perpindahan Panas

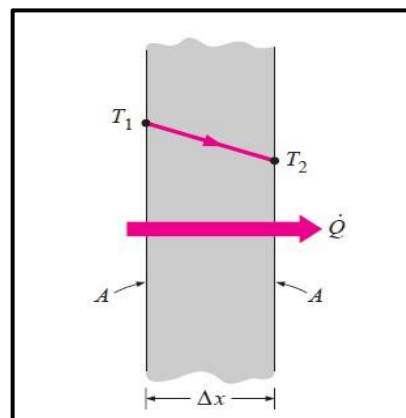
Perpindahan panas didefinisikan sebagai berpindahnya panas dari suhu tinggi ke suhu yang lebih rendah (Kreith,F, 1986). Analisis termodinamika berkaitan

dengan banyaknya perpindahan panas pada suatu sistem, yang selalu terjadi dari temperatur tinggi ke temperatur rendah hingga mencapai titik seimbang (tidak ada perbedaan temperatur).

Perpindahan panas sangat banyak ditemui dalam *Engineering system* ataupun kehidupan sehari-hari. Pada penelitian kali ini perpindahan panas yang terjadi ada 3 yaitu konduksi, konveksi dan radiasi.

### 2.5.1. Konduksi

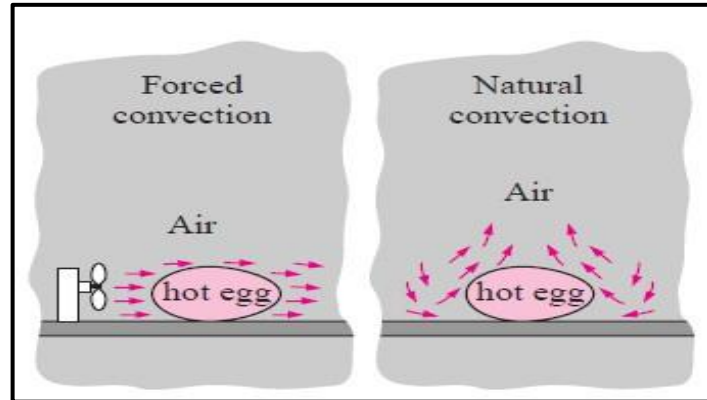
Konduksi adalah perpindahan panas yang terjadi pada satu medium atau pada medium yang berlainan tanpa disertai perpindahan partikel zat. Pada alat *solar water heater* ini perpindahan panas secara konduksi yang terjadi yaitu ketika energi panas pelat kolektor kemudian di pindahkan menuju material komposit aluminium-alumina. Dapat dilihat pada gambar 14 energi yang dipindahkan dari konduksi.



Gambar 14. Konsep Konduksi.  
Sumber : Cengel, 2003

### 2.5.2. Konveksi

Konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi karena partikel zat bersuhu tinggi berpindah tempat ke partikel zat bersuhu lebih rendah. Umumnya konveksi terjadi pada satu medium cair dan gas. Pada alat *solar water heater* ini perpindahan panas konveksi antara kaca penutup dan udara luar, didasarkan pada hembusan angin di atas penutup transparan sehingga menggunakan persamaan konveksi bebas. Jenis perpindahan panas konveksi dapat dilihat pada Gambar 15.

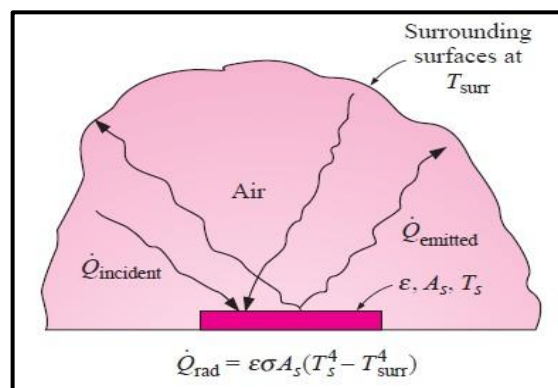


Gambar 15. Konsep Konveksi.  
Sumber : Cengel, 2003.

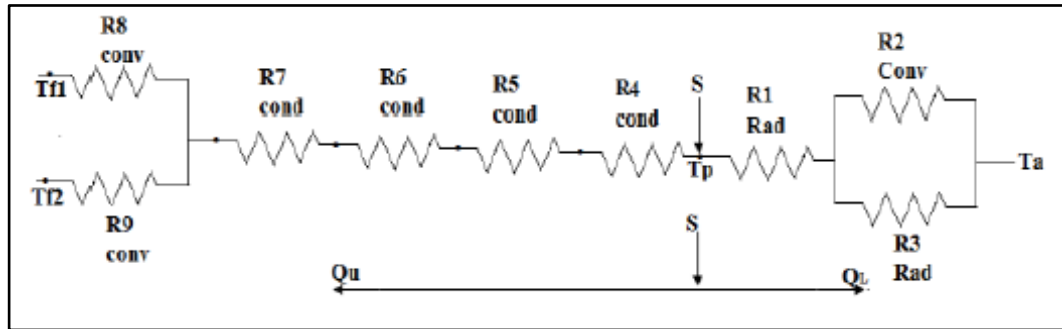
### 2.5.3. Radiasi

Radiasi adalah energi yang dipancarkan oleh material dalam bentuk gelombang elektromagnetik (atau cahaya) yang merupakan perubahan konfigurasi atom atau molekul. Tidak seperti konduksi dan konveksi, perpindahan energi melalui radiasi tidak memerlukan medium perantara untuk berpindah, dapat dilihat pada Gambar 16. Faktanya energi radiasi bergerak lebih cepat dibandingkan konduksi dan konveksi (secepat cahaya) dan tetap dapat bergerak dalam hampa udara, dengan inilah panas dari matahari dapat mencapai bumi.

Radiasi adalah fenomena *volumetric* yang dimana semua benda baik padat cair maupun gas memancarkan dan menyerap radiasi, dan biasanya radiasi dihubungkan dengan benda padat yang buram, misalnya metal, kayu ataupun batu, adapun besarnya radiasi yang dapat diserap oleh suatu benda.



Gambar 16. Konsep Radiasi.  
Sumber : Cengel, 2003.

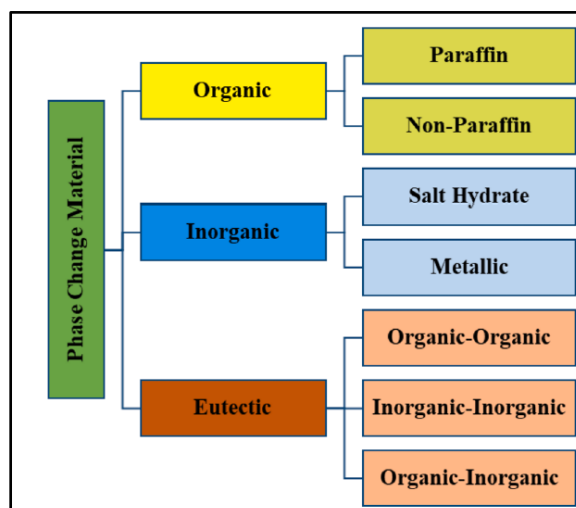


Gambar 17. Jaringan termal ETC

Sumber : Dilip Mishra, 2020.

## 2.6 Phase Change Material (PCM)

Pada gambar 18 terdapat klasifikasi PCM. Konsep dasar penggunaan PCM pada kolektor telah dilakukan sebelumnya dan menunjukkan bahwa penggunaan PCM dalam pemanas air tenaga matahari mengurangi fluktuasi temperatur air sebesar 15% dan mengurangi kehilangan panas sekitar 8.8%. Tetapi masalah penting adalah konduktivitas termal yang rendah dari PCM. Sebuah upaya untuk memecahkan masalah konduktivitas termal rendah menggunakan busa aluminium di dalam kolektor pelat datar. Tapi bagaimanapun permasalahan utama dari penggunaan PCM pada kolektor plat datar adalah signifikannya *heat losses* yang dihasilkan (Piotr Felinski, 2017).



Gambar 18. Klasifikasi PCM

Sumber : Amit Kumar, 2021



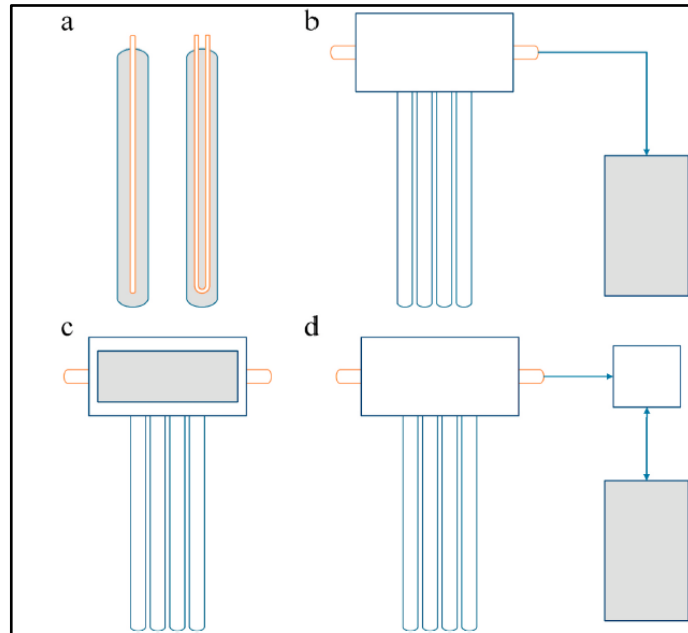
Tabel 1. *Thermophysical properties of PCM dan nano-PCM.*

Thermophysical properties	Samples	
	PCM	Nano-PCM
Melting Point (°C)	60.5	59.6
Solidification Point (°C)	58.8	58.5
Latent Heat, $C_{pL}$ (kJ/kg)	166.7	160.3
Specific Heat, $C_{ps}$ (kJ/kg°C)	1850.0	1838.0
Specific Heat, $C_{pl}$ (kJ/kg°C)	2100.0	2086.0
Thermal Conductivity (W/m°C)	0.172	0.226
Density, $\rho$ (g/m <sup>3</sup> )	908.6	976.5

Sumber : C.L. Saw, 2013

PCM diintegrasikan pada ETC dan eksperimen dilakukan menghasilkan peningkatan efisiensi 26 % dan 66%. Penyimpanan panas laten di ETC menunjukkan peningkatan fungsionalitas dengan pelepasan panas yang tertunda, sehingga menyediakan air panas selama ber jam-jam (Piotr Felinski, 2017).

Penggunaan PCM pada ETC memiliki beberapa jenis tipe dalam penggunaan PCM pada ETC. Yang pertama adalah *filling collector tubes with PCM*, yang kedua adalah *direct connection of ETC with an external PCM unit*, yang ketiga adalah *placing PCM unit inside collector manifold*, dan yang terakhir adalah *indirect connection between ETC and PCM*. Dapat dilihat pada Gambar 19.

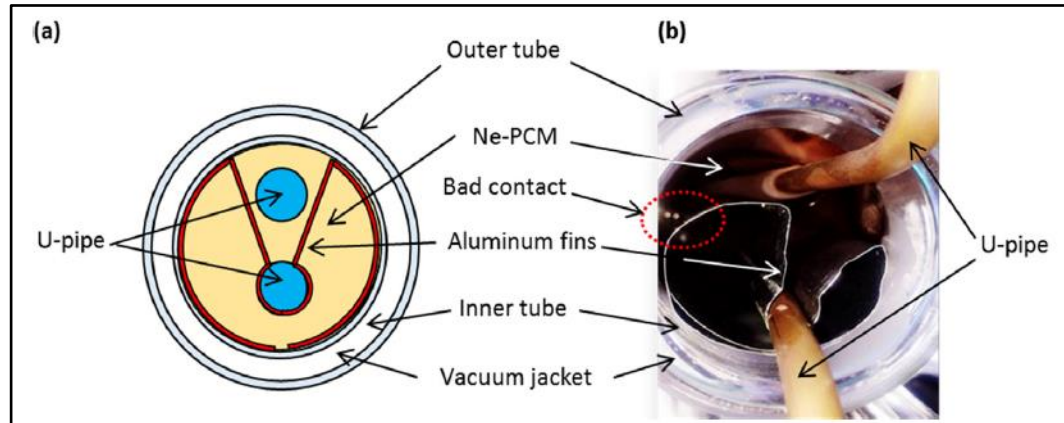


Gambar 19. Variasi tipe PCM yang dengan penambahan pada ETC.

Sumber : M. Aramesh, 2020.

Lilin parafin dapat menjadi bahan perubahan fase yang baik karena karakteristiknya yang memiliki panas laten yang tinggi, pendinginan dapat diabaikan, tekanan uap rendah dalam fase lelehan, kelembaman kimia dan stabilitas. Jumlah atom karbon dalam rantai lilin parafin dengan temperatur leleh antara  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  berkisar antara 18 hingga 50 (C18–C50). Kapasitas panas spesifik lilin parafin panas laten adalah sekitar  $2,1\text{ kJ/kg }^{\circ}\text{C}$ . Entalpi leleh mereka terletak antara  $180$  dan  $230\text{ J/g}$ , yang cukup tinggi untuk bahan organik. Kombinasi kedua nilai ini menghasilkan kepadatan penyimpanan energi yang sangat baik (Abdelwaheb Trigui, 2013).

Dari salah satu penelitian yang telah dilakukan mengenai penambahan PCM sebagai *thermal storage*. Pada penelitian tersebut menggunakan nano-enhanced (Ne-PCM) yang diintegrasikan pada ETC dengan konfigurasi *filled U-tube*. Skema dari diagram ETC dapat dilihat pada gambar 20. Efek yang ditimbulkan dari penambahan PCM dapat meningkatkan efisiensi performa ETC sebesar 32% dibandingkan dengan ETC standar. Dalam penelitian ini jumlah ETC yang digunakan berjumlah 10 ETC. (Salem Algarni dkk, 2020).



Gambar 20. (a) Schematic diagram of the ETSC integrated with Ne-PCM and (b) U-pipe evacuated tube where the fin is not in a complete contact with the evacuated tube.

Sumber : Salem Algarni dkk, 2020.

Persamaan umum perolehan panas berguna di atas dapat dijabarkan lebih lanjut ketiga persamaan ketika melibatkan PCM. Karena PCM adalah bahan perubahan fasa, itu terdiri dari panas sensibel dan panas laten. Persamaannya dapat dilihat pada persamaan 3 : (C.S.Law,2013)

Perolehan panas saat PCM dalam keadaan padat :

$$\text{Heat gain, } Q_u = \frac{m_{PCM} C_{ps PCM} (T_{s2} - T_{s1})}{3600} \quad (3)$$

Dimana :  $m_{PCM}$  : massa PCM (kg)

$C_{ps PCM}$  : Panas spesifik PCM dalam keadaan padat (J/kg°C)

$T_s$  : Temperatur PCM dalam keadaan padat (°C)

Perolehan panas saat PCM dalam keadaan berubah fasa dapat dilihat pada persamaan 4 :

$$\text{Latent heat, } Q_u = \frac{m_{PCM} C_{p Latent PCM}}{3600} \quad (4)$$

Dimana :  $C_{p Latent PCM}$  : Panas laten PCM (J/kg)

Perolehan panas saat PCM dalam keadaan cair dapat dilihat pada persamaan 5 :

$$\text{Heat gain, } Q_u = \frac{m_{PCM} C_{pl PCM} (T_{L2} - T_{L1})}{3600} \quad (5)$$

Dimana :  $C_{pl PCM}$  : Panas spesifik PCM dalam keadan cair (J/kg)

$T_L$  : Temperatur PCM dalam keadaan cair (°C)

Eksperimen tanpa PCM, dengan PCM dan nano-PCM menggunakan cara yang sama persamaan yaitu persamaan 2 untuk memprediksi efisiensi waktu siang hari.

Untuk waktu malam, prediksi efisiensi dapat dilihat pada persamaan 6 dimana perolehan panas oleh air berasal dari pelepasan panas PCM atau nano-PCM.

Efisiensi waktu Siang dan Malam dengan PCM adalah :

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c I_t + \frac{m_{PCM} C_{p PCM} \Delta T_{PCM}}{3600} + \frac{m_{PCM} C_{p Latent PCM}}{3600}} \quad (6)$$

Dimana :  $\Delta T_{PCM}$ : Perbedaan temperatur dari PCM ( $^{\circ}\text{C}$ )

$C_{p PCM}$  : Panas spesifik dari PCM ( $\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$ )