

**SKRIPSI**

**PENGARUH DEBIT ALIRAN TERHADAP KINERJA  
*SOLAR WATER HEATER***

**Disusun dan diajukan oleh**

**I GUSTI MADE ANDIKA YUDHA  
D211 16 512**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**2023**

**LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**

**PENGARUH DEBIT ALIRAN TERHADAP KINERJA  
SOLAR WATER HEATER**

Disusun dan diajukan oleh

**I GUSTI MADE ANDIKA YUDHA  
D211 16 512**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian

Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Mesin Fakultas  
Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 07 Agustus 2023

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



**Prof. Dr. Eng. Ir. Jalaluddin, ST., MT.**

NIP. 19720825 200003 1 001

Pembimbing Pendamping,



**Dr. Muhammad Syahid, ST., MT.**

NIP. 19770707 200501 1 001

Ketua Program Studi,



**Prof. Dr. Eng. Ir. Jalaluddin, ST., MT.**

NIP. 19720825 200003 001

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : I GUSTI MADE ANDIKA YUDHA

NIM : D21116512

Program Studi : Teknik Mesin

Jenjang : S-1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul :

“PENGARUH DEBIT ALIRAN TERHADAP KINERJA SOLAR WATER  
HEATER”

Adalah karya tulisan 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 mempertanggungjawabkan 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.

Makassar, 7 Agustus 2023



Yang membuat Pernyataan,

I GUSTI MADE ANDIKA YUDHA

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT, yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya agar saya selaku penulis dapat menyelesaikan penelitian dan skripsi ini yang menjadi salah satu syarat kelulusan di Departemen Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin dan salawat serta salam kita sampaikan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW yang telah membawa umat islam ke kehidupan yang lebih beradab.

Saya 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 penelitian dan skripsi ini telah selesai.

Oleh karena ini dengan penuh rasa hormat dan tulus saya selaku penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Bapak Prof. Dr.Eng.Ir.Jalaluddin Haddada, ST, MT selaku pembimbing pertama dan Bapak Dr. Muhammad Syahid, ST,MT selaku pembimbing kedua, yang telah memberikan sangat banyak pelajaran berharga bagi saya, yang tidak bisa ternilai harganya dengan apapun, meluangkan waktu dan tenaganya dan juga memberikan motivasi dan ide-ide kepada saya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini.

Tak lupa secara khusus penulis haturkan ucapan terima kasih kepada Ayahanda sekaligus motivasi hidup saya I Gusti Ketut Markadeya yang telah memberikan sangat banyak pelajaran berharga kepada saya dan Ni Ketut Daniati yang telah merawat saya tanpa lelah dari kecil hingga saat ini, dan memberikan semangat serta dukungan yang tidak ada habisnya kepada saya, dan juga kepada kakak saya Gusti Ngurah Wira Yudha yang telah memberikan dukungan dan semangat kepada saya, serta keluarga besar yang namanya tidak bisa disebutkan satu persatu yang selalu ada memberikan dukungan kepada saya.

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

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc. selaku Rektor Universitas Hasanuddin beserta stafnya.
2. Bapak Prof. Dr. Eng.Ir.Jalaluddin,ST,MT selaku Ketua Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin.
3. Seluruh dosen penguji, bapak Dr, Eng, Ir Andi Amijoyo Mochtar, ST,M.Sc, dan bapak Asriadi Sakka.,ST.,M.Eng yang telah memberikan masukan untuk menyempurnakan skripsi saya.
4. Seluruh staf administrasi Departemen Teknik Mesin yang membantu mengurus dan memudahkan perjalanan berkas menuju Rektorat.
5. Orang Tua beserta saudara-saudari saya yang selalu memberikan dukungan berupa semangat dan motivasi untuk menyelesaikan tugas akhir.
6. Aulia Fatimah yang telah menemani dan memberikan dukungan berupa semangat, motivasi, serta inspirasi untuk terus berjuang menyelesaikan tugas akhir.
7. Seluruh teman-teman mahasiswa Jurusan Mesin khususnya Angkatan 16 Comprezor. Terima kasih atas bantuan dan dukungannya serta semangat yang diberikan.
8. Teman-Teman seperjuangan di Labolatorium Energi Terbarukan yang setia menemani selama masa masa pengambilan data dan penulisan tugas akhir.
9. Tim Anggota Riset di laboratorium Energi Terbarukan, (Bapak D r . Muhammad Hasan Basri, ST.MT dan Muh. Anis Ilahi R, ST.MT)
10. Kanda-kanda Senior serta Adik-adik yang telah memberi bantuan selama proses perkuliahan maupun masukan dalam menyelesaikan tugas akhir.
11. Semua pihak yang tidak sempat disebutkan namanya satu per satu.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 keritikan dan saran yang membangun untuk memperbaiki

skripsi ini kedepanya, agar berguna bagi pembaca nantinya.

Makassar, Agustus 2023

Penulis

## ABSTRAK

**I GUSTI MADE ANDIKA YUDHA**, *Pengaruh Debit Aliran Terhadap Kinerja Solar Water Heater* (dibimbing oleh Prof. Dr. Eng. Ir. Jalaluddin. S.T., M.T dan Dr. Muhammad Syahid, S.T., M.T)

Penggunaan energy fosil secara terus menerus akan berdampak serius bagi lingkungan. Hal tersebut dapat diatasi dengan mengembangkan sumber energi terbarukan yang dapat menggantikan energi fosil dan tidak habis pakai dengan memanfaatkan sumber energy alternative disekitar kita. Berbagai macam penelitian dilakukan untuk mengembangkan komponen yang dapat meningkatkan performa termal pemanas air tenaga surya, salah satunya adalah dengan memodifikasi Pelat absorber dari kolektor surya. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode simula sinumerik, yaitu suatu metode yang digunakan dengan asumsikan percobaan pada komputasi numeric untuk menguji pengaruh penggunaan *Phase Change Material (Paraffin Wax)* sebagai *Thermal Storage* terhadap efisiensi kolektor solar water heater parameter *flow rate* yaitu 7, 10, dan 12 liter/jam. Hasil penelitian menunjukkan perbandingan efisiensi iantara Pelat kolektor standar dengan variasi ketebalan *Phase Change Material*. Dimana nilai efisiensi pada laju aliran 7 L/Jam yang dicapai sebesar 60,6%, untuk laju aliran 10 L/Jam nilai efisiensi yang dicapai sebesar 61,9% , dan nilai efisiensi pada laju aliran 12 L/Jam nilai yang dicapa isebesar 60,4%.

Kata Kunci: Kolektor Surya, Efisiensi, *Phase Change Material*, *Paraffin Wax*, *Thermal Energy Storage*.

## **ABSTRACT**

*I GUSTI MADE ANDIKA YUDHA, Effect of Flow Discharge on Solar Water Heater Performance (supervised by Prof. Dr. Eng. Ir. Jalaluddin. S.T., M.T and Dr. Muhammad Syahid, S.T., M.T)*

*The continuous use of fossil energy will have a serious impact on the environment. This can be overcome by developing renewable energy sources that can replace fossil energy and are not used up by utilizing alternative energy sources around us. Various studies have been carried out to develop components that can improve the thermal performance of solar water heaters, one of which is by modifying the absorber plate of the solar collector. The method used in this study is the sinumeric simula method, which is a method that is used with the assumption of experiments on numerical computations to test the effect of using Phase Change Material (Paraffin Wax) as Thermal Storage on the efficiency of solar water heater collector flow rate parameters namely 7, 10, and 12 liters/hour. The results of the study show a comparison of efficiency between standard collector plates with variations in the thickness of the Phase Change Material. Where the efficiency value at a flow rate of 7 L/hour is 60.6%, for a flow rate of 10 L/hour the efficiency value is 61.9%, and the efficiency value at a flow rate of 12 L/hour is 60.4%.*

*Keywords: Solar Collector, Efficiency, Phase Change Material, Paraffin Wax, Thermal Energy Storage.*

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI .....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
KATA PENGANTAR .....	iii
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	ix
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL .....	xii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
Latar Belakang .....	1
Rumusan Masalah.....	2
Tujuan Penelitian .....	2
Batasan Masalah .....	2
Manfaat Penelitian .....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
Sistem Pemanas Air Tenaga Matahari .....	4
Kolektor Surya .....	5
Penyimpan Energi Termal ( <i>Thermal Energy Storage, TES</i> ) .....	8
<i>Computational Fluid Dynamic (CFD)</i> .....	10
Perpindahan Panas .....	14
Formulasi Keseimbangan Energi pada <i>Solar Thermal Collector</i> .....	13
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	21
Waktu dan Tempat Penelitian .....	21
Peralatan dan Bahan yang digunakan .....	24
Tahapan pengambilan data simulasi Numerik.....	24
Variabel Penelitian.....	47
Flowchart penelitian.....	48
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	47
Analisis Hasil Pengujian Eksperimental .....	47
Pembahasan.....	56
BAB V PENUTUP.....	60
Kesimpulan .....	60
Saran .....	60
DAFTAR PUSTAKA .....	62

## DAFTAR GAMBAR

1. Skema sistem pemanas air tenaga matahari <i>thermosifon</i> .....	4
2. Kolektor pelat datar.....	6
3. <i>Evacuated Tube Collector (ETC)</i> .....	7
4. <i>Concentrating Collectors</i> .....	8
5. Klasifikasi penyimpan energy termal.....	9
6. Proses dari <i>CFD</i> .....	9
7. Jenis mesh.....	12
8. Contoh hasil <i>meshin</i> .....	13
9. Contoh hasil <i>post processor</i> .....	14
10. . Konduksi pada dinding dengan tebal $\Delta x$ dan luas A.....	15
11. Konveksi paksa dan konveksi bebas.....	16
12. Perpindahan panas radiasi antara dua permukaan.....	17
13. Gambar 13 Jala-jala termal.....	19
14. Komputer yang Dilengkapi <i>Software</i> yang diperlukan.....	21
15. Gambar logo software Autodesk Fusion 360.....	22
16. Gambar logo <i>software</i> Ansys 18.1.....	22
17. Desain Alat dengan Ketebalan Termal Storage 7mm .....	23
18. Objek penelitian pemanas air tenaga matahari 1 Pipa tanpa PCM storage.....	23
19. Skema Gambar SWH dengan PCM Storage yang Disimulasikan.....	24
20. Hasil Mesh dan Jumlah Cell Pelat Absorber Dengan PCM storage.....	24
21. Hasil Mesh dan Jumlah Cell Pelat Absorber tanpa PCM storage.....	25
22. Detail Mesh yang Digunakan Untuk Simulasi.....	26
23. Tampilan Proses Set-Up pada <i>Software</i> Ansys.....	26
24. Tampilan Proses Set-Up pada <i>Software</i> Ansys.....	27

25. Tampilan Tahapan General.....	28
26. Tampilan Tahapan Pengaktifan Persamaan Energi.....	29
27. Tampilan Tahapan Pemilihan Jenis Aliran.....	30
28. Tampilan Tahapan Radiation Model.....	31
29. Tampilan Tahapan Pengaktifan Solidifikasi dan Pelelehan.....	31
30. Tampilan Sifat-sifat Air.....	32
31. Tampilan Sifat-sifat Udara.....	33
32. Tampilan Sifat-sifat Tembaga.....	33
33. Tampilan Sifat-sifat Steel.....	34
34. Tampilan Sifat-sifat Kaca.....	34
35. Tampilan <i>Cell Zone Conditions</i> untuk Part Air.....	35
36. Tampilan Bagian <i>Boundary Conditions</i> .....	36
37. Tampilan Bagian <i>Boundary Conditions</i> Untuk Part Kaca.....	37
38. Tampilan <i>Reference Values</i> .....	38
39. Tampilan Perintah <i>Solution Methodes</i> .....	39
40. Tampilan Perintah <i>Solution Controls</i> .....	40
41. Tampilan Perintah <i>Solution Initialization</i> .....	41
42. Tampilan Perintah <i>Run Calculation</i> .....	42
43. Tampilan Perintah Mengolah Data oleh <i>Software</i> .....	42
44. Flowchart penelitian.....	45
45. Grafik Perbandingan Temperatur <i>Inlet</i> dan <i>Outlet</i> .....	55
46. Grafik Perbandingan efisiensi terhadap variasi laju aliran.....	56

## DAFTAR LAMPIRAN

1. Tabel sifat-sifat udara pada tekanan 1 atm.....	61
2. Sifat-sifat air jenuh.....	62

## DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

<b>Simbol</b>	<b>Keterangan</b>	<b>Satuan</b>
$R_m$	Iluminasi dari Material komposit bawah	$W/m^2$
$R_c$	Iluminasi dari Custom	$W/m^2$
$V$	Laju Aliran Massa	$kg/s$
$V_w$	Kecepatan Angin	$m/s$
$\rho$	Densitas Air	$kg/m^3$
$C_p$	Kalor Spesifik Udara	$kJ/kg.K$
$A_c$	Luas Kolektor	$m^2$
$T_p$	Temperatur Pelat Absorber	$^{\circ}C, K$
$T_{am}$	Temperatur Udara Luar Material Komposit	$^{\circ}C, K$
$T_{ac}$	Temperatur Udara Luar Custom	$^{\circ}C, K$
$T_{in}$	Temperatur Air Masuk	$^{\circ}C, K$
$T_{out}$	Temperatur Air Keluar	$^{\circ}C, K$
$T_{kd}$	Temperatur Kaca dalam	$^{\circ}C, K$
$T_{kl}$	Temperatur Kaca luar	$^{\circ}C, K$
$T_{isl}$	Temperatur Isolator	$^{\circ}C, K$
$T_{mk}$	Temperatur Material komposit bawah	$^{\circ}C, K$
$T_{c-luar}$	Temperatur Kaca Luar	$^{\circ}C, K$
$T_{c-dalam}$	Temperatur Kaca Dalam	$^{\circ}C, K$
$\nu$	Visikositas Kinematik	$m^2/s$
$D_h$	Diameter Hidrolis	$M$
$\Sigma$	konstanta Stefan-Boltzman = $5,6697 \times 10^{-8}$	$W/m^2.K^4$
$h_{cp-c}$	Koefisien Konveksi Penutup-Udara Luar	$W/m^2.K$
$h_{rc-a}$	Koefisien Radiasi Pelat-Penutup	$W/m^2.K$
$H_f$	Koefisien Konveksi Pelat ke Air	$W/m^2.K$
$R_{k1}$	Tahanan Termal dari Material komposit bawah ke Isolator	$W/m^2.K$
$R_{k2}$	Tahanan Termal dari Pelat ke Material komposit bawah	$W/m^2.K$
$K_m$	Konduktivitas Termal Material komposit	$W.m.K$

## **BAB I PENDAHULUAN**

### Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang mendapat pancaran sinar matahari sepanjang tahun dikarenakan letak geografisnya yang berada di garis khatulistiwa. Energi matahari merupakan salah satu bentuk energi alternatif yang dapat dimanfaatkan sebagai pengganti bahan bakar fosil yang mana ketersediaannya semakin menipis. Energi matahari merupakan sumber energy yang tidak terbatas dan bersifat terus-menerus, sehingga telah banyak negara di belahan dunia yang memanfaatkannya menjadi energi panas atau listrik untuk memenuhi kebutuhan energi manusia.

Salah satu pengaplikasian pemanfaatan energi matahari yang semakin umum dikota-kota besar adalah sebagai pemanas air (water heater). Salah satu kebutuhan yang semakin perlu ntuk dipenuhi oleh masyarakat perkotaan adalah ketersediaan akan air panas untuk keperluan sanitasi. Sedangkan pada hotel dan rumah sakit, ketersediaan sistem pemanas air sebagai sarana untuk sanitasi telah menjadi salah satu kriteria penting yang dipersyaratkan oleh pengunjung atau pasien.

Untuk memanfaatkan energi matahari menjadi pemanas maka dibuat Solar Water Heater dengan pembangkit tenaga surya tipe parabola silinder. Kelemahan water heater tenaga surya adalah kehilangan panas akibat perbedaan suhu lingkungan dengan suhu didalam tangki penyimpanan, yang dimana waktu

Pemanasan dilakukan di siang hari dan akan digunakan pada malam hari dan pagi hari. Selain masalah kehilangan panas pada tangki penyimpanan, kehilangan panas juga terjadi di konstruksi perpipaan solar water heater nya. Apabila kehilangan panas lebih banyak daripada panas yang dihasilkan maka waktu pemanasan air akan semakin lama yang bisa terjadi kemungkinan air tidak akan mencapai temperatur yang telah ditargetkan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka akan dilakukan penelitian dengan judul:”**PENGARUH DEBIT ALIRAN TERHADAP KINERJA SOLAR WATER HEATER**”

## **1.2 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana membangun model geometri *solar water heater*?
2. Bagaimana pengaruh variasi kecepatan air terhadap efisiensi *solar water heater*?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah di atas maka penelitian ini memiliki tujuan antara lain:

1. Membuat model geometri solar water heater untuk simulasi numeric
2. Menentukan efisiensi solar water heater dengan variasi kecepatan air

## **1.4 Batasan Masalah**

Adapun yang menjadi batasan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Pemodelan geometri yang disimulasikan berbentuk potongan simetri dari bentuk aslinya yang masing-masing terdiri dari satu pelat absorber dengan satu pipa.
2. Intensitas radiasi matahari di asumsikan konstan yakni  $1000 \text{ w/m}^2$ .
3. Variasi debit aliran air 7L/h, 10L/h, dan 12 L/h.

## **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat yang diharapkan penulis dari penelitian ini adalah sebagaiberikut:

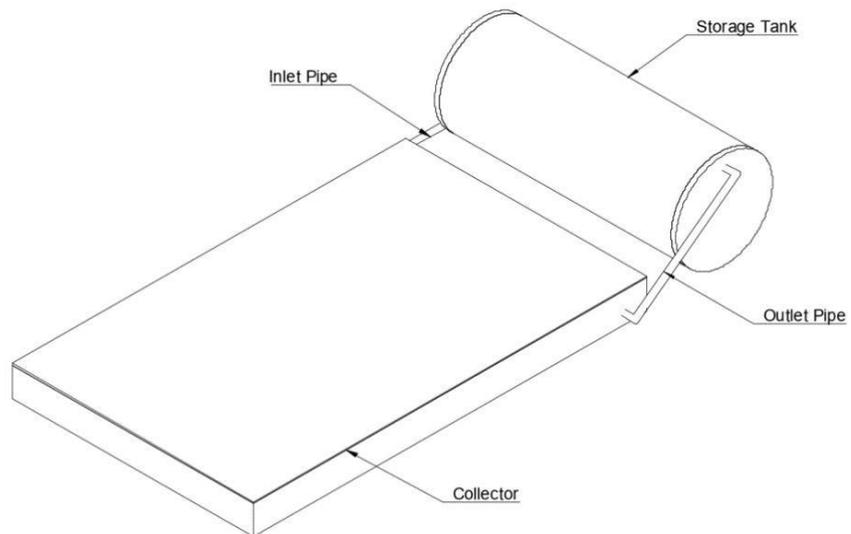
1. Menghasilkan simulasi numeric sebuah sistem pemanas air tenaga matahari dengan modifikasi pelat absorber yang dilengkapi thermal storage.
2. Memberikan penjelasan bagaimana pengaruh penyerapan panas, kehilangan energy panas ke permukaan dan perpindahan energy panas ke fluida kerja serta penyimpanan energy panas pada storage secara simulasi numerik
3. Memberikan penjelasan pengaruh penggunaan thermal storage pada unjuk kerja pemanas air tenaga matahari secara simulasi numeric. Sebagai referensi desain untuk aplikasi nyata pemanfaatan teknologi untuk kepentingan masyarakat luas.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Sistem Surya Pemanas Air

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 [10]. 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 selembar bahan konduktif termal yang disebut pelat penyerap (*absorber*) yang kepadanya menempel pipa-pipa pembawa cairan (air) atau biasa disebut pipa pemanas (*riser pipe*). *Absorber* ini terbuat dari lembaran metal tipis dan permukaannya dibuat berwarna hitam untuk memaksimalkan penyerapan radiasi matahari. Menurut teori yang ada, benda hitam adalah penyerap radiasi yang baik. Penghitaman bisa dilakukan dengan pengecatan warna hitam sebagai cara yang paling mudah, atau dengan metoda yang lebih canggih dengan proses pelapisan seperti *elektroplating*, *anodizing*, dan lain-lain. Cara pelapisan canggih tersebut, misal dengan *black*

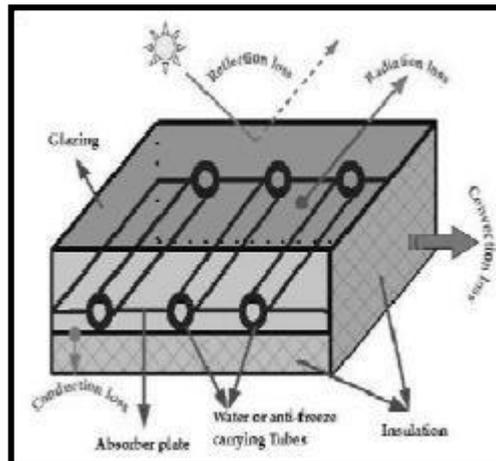
*chrome* atau *black nickel*, dimaksudkan selain untuk meninggikan penyerapan material terhadap radiasi matahari, juga untuk merendahkan emitansinya terhadap gelombang sinar inframerah [4].

## 2.2. Kolektor Surya

Kolektor surya adalah jenis penukar panas khusus yang mengubah energi radiasi matahari menjadi panas. Kolektor surya berbeda dalam beberapa hal dari panas yang lebih konvensional penukar. Yang terakhir biasanya mencapai pertukaran cairan-ke-cairan dengan perpindahan panas yang tinggi dan dengan radiasi sebagai faktor yang tidak penting. Di kolektor surya, transfer energi dari sumber energi radiasi yang jauh ke fluida. Fluks radiasi datang adalah, paling baik, sekitar  $1100 \text{ W/m}^2$  (tanpa konsentrasi optik), dan itu bervariasi. Rentang panjang gelombang adalah dari 0,3 hingga 3 m, yang jauh lebih pendek daripada radiasi yang dipancarkan dari sebagian besar permukaan yang menyerap energi. Dengan demikian, analisis solar kolektor menyajikan masalah unik fluks energi rendah dan variabel dan relative pentingnya radiasi.[3]

### 1. Flat-Plate Collectors (FPC)

Kolektor pelat datar digunakan secara luas untuk rumah tangga aplikasi pemanas air. Sederhana dalam desain dan tidak memiliki bagian yang bergerak sehingga membutuhkan sedikit perawatan. Ini adalah kotak terisolasi dan tahan cuaca yang berisi kegelapan pelat penyerap di bawah satu atau lebih penutup transparan. Mereka mengumpulkan radiasi langsung dan menyebar. Milik mereka kesederhanaan dalam konstruksi mengurangi biaya awal dan pemeliharaan system[2]



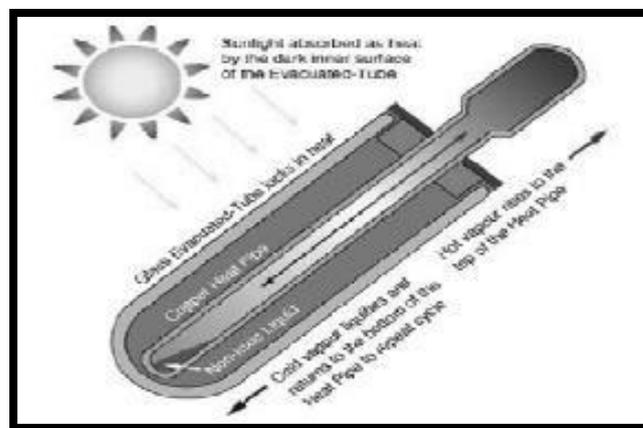
Gambar 2. Kolektor pelat datar [2]

Pada Gambar 2 menunjukkan bahwa ketika radiasi matahari melewati penutup dan mengenai permukaan pelat absorber, maka sebagian besar energi radiasi tersebut akan diserap menjadi energi panas. Kemudian energi panas tersebut dipindahkan ke fluida kerja di dalam pipa, dan disirkulasikan ke tangki penyimpanan. Pipa disambungkan di pelat absorber dengan metode pengelasan. Kedua ujung pipa dihubungkan dengan *header-pipe* dengan diameter yang lebih besar. Efisiensi termal kolektor sangat bergantung pada sifat material, ukuran dan desain, serta perbedaan temperatur kolektor dengan lingkungan. Keunggulan FPC antara lain; desain yang sederhana, biaya yang lebih rendah, umur pakai lebih lama, dan efisiensi termal relatif moderat. Sedangkan kelemahannya antara lain; mudah korosi akibat zat asam, alkalinitas fluida kerja, pembekuan air, endapan debu, uap air pada cover dan kerusakan lainnya[1].

## 2. *Evacuated Tube Collector (ETC)*

*Evacuated Tube Collector (ETC)* terdiri dari deretan tabung kaca transparan paralel. Setiap tabung terdiri dari tabung kaca luar dan tabung dalam, atau penyerap, ditutupi dengan lapisan selektif yang menyerap matahari energi dengan baik tetapi menghambat kehilangan panas radiasi. Udaranya ditarik (dievakuasi) dari ruang

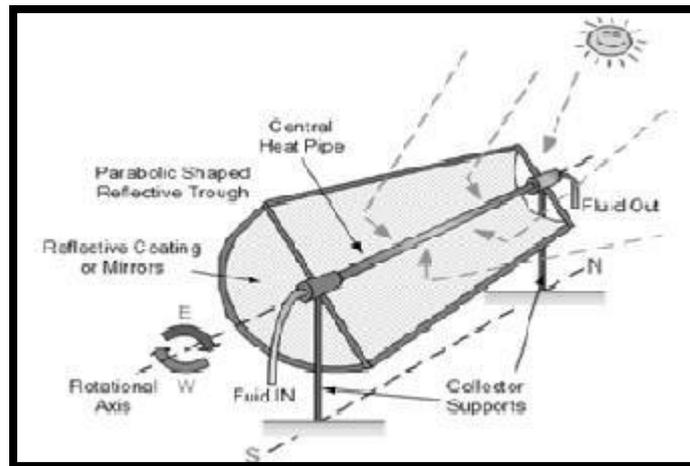
antara tabung untuk membentuk ruang hampa, yang menghilangkan konduktif dan kehilangan panas konvektif. Mereka paling cocok untuk suhu lingkungan yang sangat dingin atau dalam situasi dari cahaya redup secara konsisten. Mereka juga digunakan di aplikasi industri, di mana suhu air tinggi atau uap perlu dihasilkan di tempat mereka berada lebih hemat biaya. Dapat kita lihat pada Gambar 3 dibawah merupakan cara kerja dari *Evacuated Tube Collector (ETC)*. [2]



**Gambar 3** *Evacuated Tube Collector (ETC)* [2]

### 3. *Concentrating Collectors*

*Concentrating Collectors* menggunakan permukaan cermin untuk memusatkan energi matahari pada penyerap yang disebut penerima. Suatu fluida perpindahan panas mengalir melalui penerima dan menyerap panas. Kolektor ini mencapai suhu yang jauh lebih tinggi daripada kolektor pelat datar dan pengumpul tabung vakum, tetapi mereka hanya dapat melakukannya ketika sinar matahari langsung tersedia. Namun, konsentrator hanya dapat memfokuskan radiasi matahari langsung, dengan hasil bahwa kinerja mereka buruk hSari berkabut atau berawan. Dapat kita lihat pada Gambar 4 dibawah merupakan cara kerja dari *Concentrating Collectors*. [2]



**Gambar 4** *Concentrating Collectors* [2]

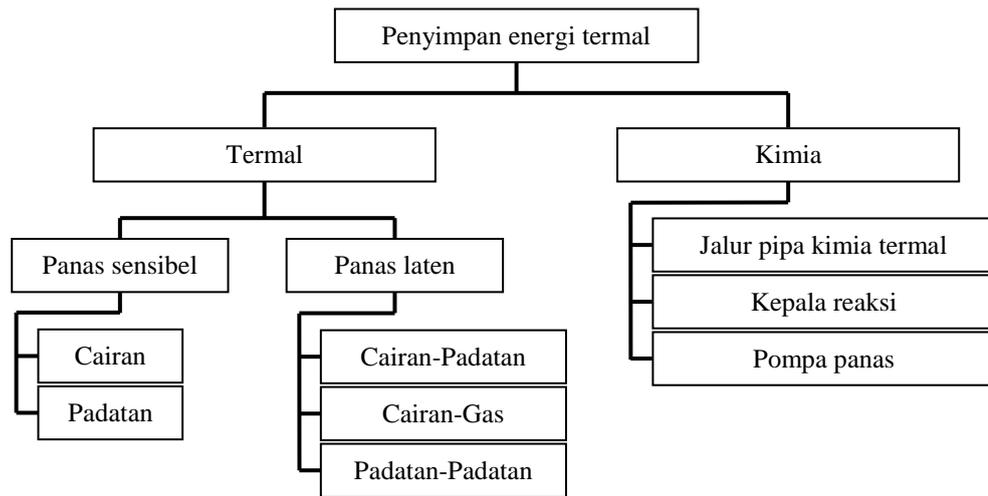
### 2.3. Penyimpan Energi Termal (*Thermal Energy Storage, TES*)

Penggunaan penyimpanan termal, pada awalnya, tidak dapat menyediakan cadangan yang efektif tetapi membantu system stabil secara termal. Akibatnya, penyimpanan termal banyak digunakan pada system termal dengan bantuan matahari. Sejak itu, studi terhadap TES serta kegunaan dan efek dari penyimpanan panas sensibel dan laten pada beragam aplikasi meningkat, yang mengarah ke banyak penelitian [11]

Penyimpanan energy telah menjadi bagian penting dari teknologi system energy terbarukan. Penyimpan energy termal (*thermal energy storage*) (TES) adalah teknologi yang menyimpan energy termal dengan cara memanaskan atau mendinginkan media penyimpanan sehingga energi yang tersimpan tersebut dapat digunakan di lain waktu untuk aplikasi pemanasan, pendinginan atau pembangkit listrik. Sistem TES biasanya digunakan pada bangunan dan proses industri. Kelebihan menggunakan TES sebagai system energy yaitu peningkatan efisiensi secara keseluruhan dan keandalan (*reliability*) yang lebih baik, dan dapat menuju ke penghematan, pengurangan investasi dan biaya operasional, dan lebih sedikit polusi lingkungan (misal: emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>)). Sistem termal matahari dengan upaya efisiensi yang baik, sudah matang di industri dan dapat memanfaatkan sebagian besar energy termal matahari di siang hari. Namun system termal surya tidak memiliki cukup cadangan (termal)

untuk melanjutkan operasi pada saat waktu radiasi sedang rendah atau tidak ada [11]

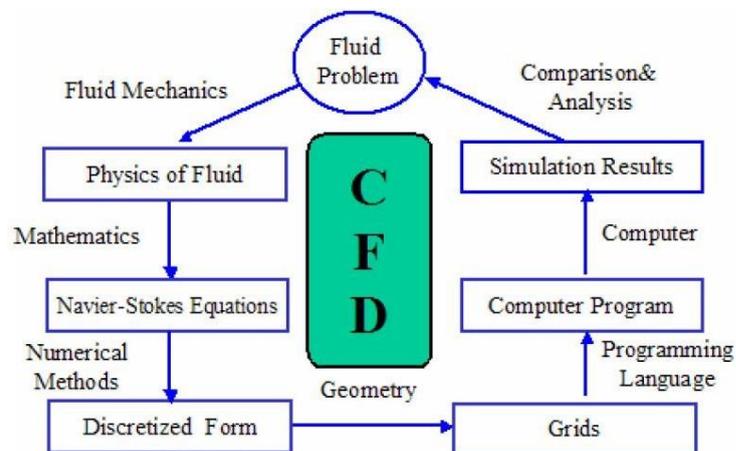
Jenis-jenis penyimpanan energy termal (TES) energy matahari diperlihatkan pada gambar dibawah:



**Gambar 5.** Klasifikasi penyimpanan energy termal [11]

#### 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 [13].

Secara garis besar, proses melakukan simulasi menggunakan software

*CFD* dibagi menjadi 3 proses utama, yaitu:

1) *Preprocessor*

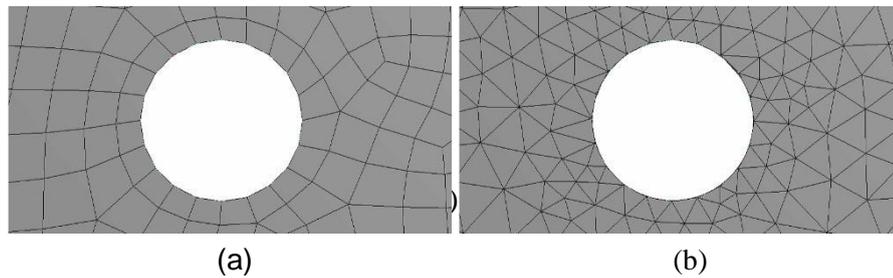
*Preprocessor* merupakan tahapan awal analisa *CFD* dimana penentuan masalah, pemodelan awal, dan penginputan data, serta pendefinisian domain dan pendefinisian kondisi batas (*boundary condition*) dilakukan. Dengan mengasumsikan bahwa kolektor merupakan sebuah rangkaian sederhana dari kolektor pelat datar, kondisi batas seharusnya memiliki kedua mekanisme perpindahan panas konveksi dan radiasi, kecuali untuk permukaan bawah dan depannya [15]. 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 [14]

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 didefinisikan sebagai isolasi akan tetapi untuk sisi kiri dan kanan pelat *absorber* didefinisikan sebagai dua sisi simetris karena pelat *absorber* yang disimulasikan merupakan potongan satu pipa dari tiga pipa pada kolektor yang diuji secara eksperimental.

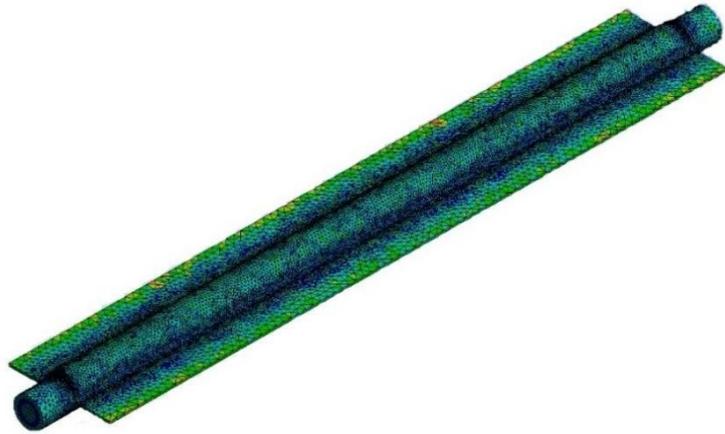
Selanjutnya pada tahapan *preprocessor* ini, sebuah benda atau model yang akan dianalisa dibagi-bagi dalam jumlah grid tertentu yang terdiri dari sejumlah node  $N$  pada setiap volume kontrol, proses ini biasanya dikenal dengan istilah *meshing*. Secara umum bentuk sel dari proses *meshing* dibagi menjadi 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 [20]:

- 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 [16]. Jumlah total node  $N$  dalam grid yang dihasilkan dibatasi oleh kapasitas memori komputer dan waktu operasi CPU [20]. Waktu dan keakuratan simulasi juga bergantung pada ukuran dan jumlah grid. Jumlah grid yang tinggi akan menghasilkan akurasi yang baik begitu pula sebaliknya [15]. 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 [17].



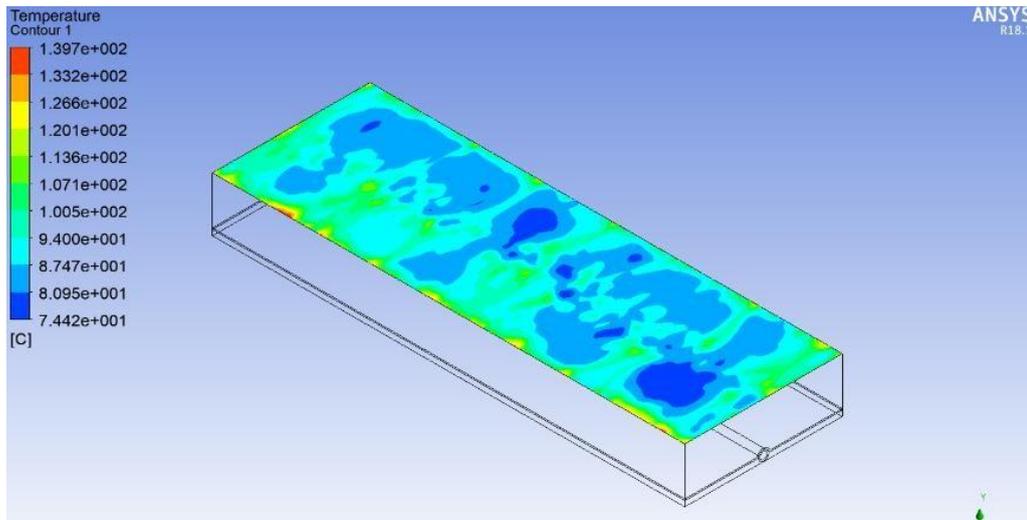
**Gambar 8.** Contoh hasil *meshing*

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** [13].



**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, FEATFLOW, dan masih banyak lagi seiring dengan perkembangan kebutuhan teknologi.

## 2.5. Perpindahan Panas

Perpindahan panas didefinisikan sebagai berpindahnya panas dari suhu tinggi ke suhu yang lebih rendah [8]. Analisis thermodi namika berkaitan dengan banyaknya perpindahan panas pada suatu sistem, yang selalu terjadi dari temperature tinggi ke temperature 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 [8]. Pada alat *solar water heater* ini perpindahan panas secara konduksi yang terjadi yaitu ketika energi panas pelat kolektor kemudian di pindahkan menuju material PCM. Dapat dilihat pada gambar 2.5. Energi yang dipindahkan dari konduksi dapat dituliskan dengan persamaan:

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

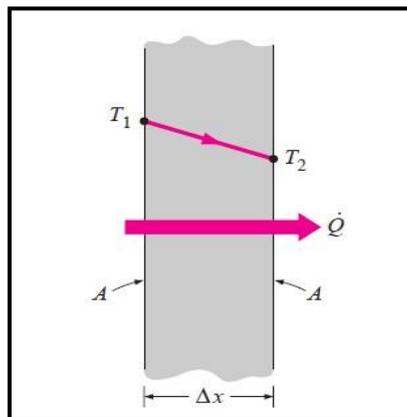
Dimana:

Q: banyaknya energi yang dipindahkan (joule)

k: konduktivitas benda ( $\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$ )

$\Delta T$ : perbedaan temperatur

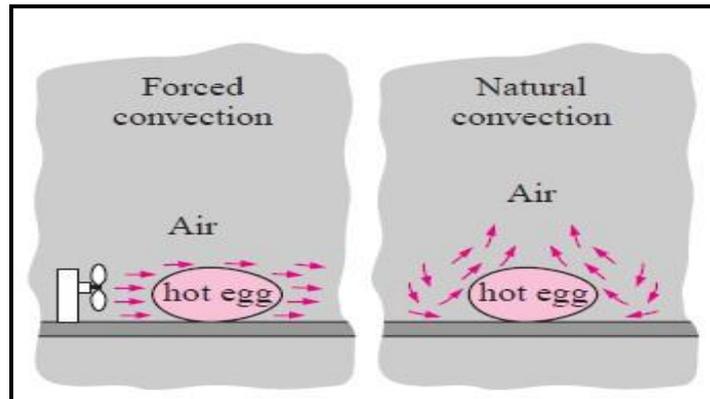
$\Delta x$ : ketebalan benda (m)



Gambar 10. Konduksi pada dinding dengan tebal  $\Delta x$  dan luas A [9]

### 2.5.1 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 [8]. 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 7.



**Gambar 11.** Konveksi paksa dan konveksi bebas [9]

Adapun persamaan untuk menghitung besarnya panas yang terjadi akibat konveksi ialah [9]:

$$Q = hA(T_s - T_\infty) \dots\dots\dots(2)$$

Dimana:

Q: besarnya kalor yang dikonveksikan (joule)

h: koefisien konveksi (W/m<sup>2</sup>·°C)

A: luas permukaan terjadinya konveksi (m<sup>2</sup>)

T<sub>s</sub>: temperature permukaan benda padat (°C)

T<sub>∞</sub>: temperature fluida yang cukup jauh (°C)

### 2.5.3 Radiasi

Radiasi adalah energi yang dipancarkan oleh material dalam bentuk gelombang elektro magnetik (atau cahaya) yang merupakan perbukan konfigurasi atom atau molekul. Tidak seperti konduksi dan konveksi, perpindahan energy melalui radiasi tidak memerlukan medium perantara untuk berpindah, dapat dilihat pada Gambar 8. Faktanya energy radiasi bergerak lebih cepat dibandingkan konduksi dan konveksi (secepat cahaya) dan tetap dapat bergerak dalam hampa udara, dengan ini lah 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 dapat dituliskan dalam persamaan [9]

$$Q = \epsilon \sigma A T_s^4 \dots\dots\dots(3)$$

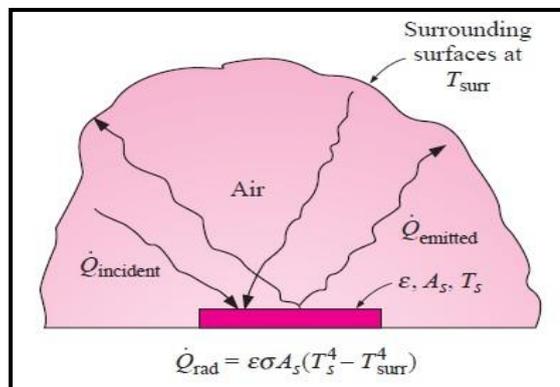
Dimana:

Q: kalor radiasi yang diserap (joule)

$\epsilon$ : emisi vitas benda

$\sigma$ :  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

$T_s$ : temperature permukaan benda (K)



**Gambar 12.** Perpindahan panas radiasi antara dua permukaan [9]

## 2.6 Formulasi Kesetimbangan Energi pada *Solar Thermal Collector*

Fungsi kolektor surya yaitu menyerap radiasi matahari yang tersedia secara optimal dan menyediakan panas untuk kebutuhan tertentu. Untuk menentukan besaran efisiensi dari suatu kolektor, maka perlu memperhatikan hubungan efisiensi dengan beberapa variasi kerugian kalor. Adapun tahap perhitungan dalam mencari efisiensi kolektor dan kerugian kalor sebagai berikut:

Analisis Perpindahan Panas

1. Koefisien perpindahan panas konveksi antara kaca penutup dengan udara luar

$$h_w = 0,86 Re^{1/2} Pr^{1/3} \dots\dots\dots(4)$$

Dimana: Re: bilangan Reynolds

Pr : bilangan Prandtl

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

$$h_{r_{c-a}} = \varepsilon_c \sigma (T_c^2 + T_s^2) (T_c + T_s) \dots\dots\dots(5)$$

$$T_s = 0,5552 T_a^{1,5} \dots\dots\dots(6)$$

- Dimana:  $\varepsilon_c$  : emisivitas penutup  
 $\sigma$  : konstanta Stefan-Boltzman ( $5,6697 \times 10^{-8}$ , W/m<sup>2</sup>k<sup>4</sup>)  
 $T_c$  : temperature penutup, K  
 $T_s$  : temperature sky, K  
 $T$  : temperature lingkungan, K

3. Koefisien perpindahan panas konveksi antara pelat absorber dengan kaca penutup

$$h_{c_{p-c}} = \frac{Nu \cdot K}{L} \dots\dots\dots(7)$$

$$Nu = 1 + 1,44 \left[ 1 - \frac{1708(\sin 1,8\beta)^{1,6}}{Ra \cos \beta} \right] \left[ 1 - \frac{1708}{Ra \cos \beta} \right]^+ + \left[ \left( \frac{Ra \cos \beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right] \dots\dots\dots(8)$$

- Dimana: Ra: Bilangan Rayleigh  
 $\beta$  : sudut kemiringan, °  
L : panjang karakteristik penutup,

4. Koefisien perpindahan panas radiasi pelat-penutup

$$h_{r_{p-c}} = \frac{\sigma(T_p^2 + T_c^2)(T_p + T_c)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} \dots\dots\dots(9)$$

- Dimana:  $\varepsilon_c$  : emisivitas cover  
 $\varepsilon_p$  : emisivitas pelat  
 $T_p$  : temperatur pelat  
 $T_c$  : temperature penutup

Koefisien perpindahan panas total kolektor

$$U_t = \left( \frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}} + \frac{1}{h_w + h_{r,c-a}} \right)^{-1} \dots\dots\dots(10)$$

$$U_b = \frac{1}{\frac{L_c}{k_c} + \frac{L_{Al}}{k_{Al}} + \frac{L_s}{k_s} + \frac{L_i}{k_i}} \dots\dots\dots(11)$$

$$U_L = U_t + U_b \dots\dots\dots(12)$$

- Dimana:  $U_t$  : koefisien perpindahan panas bagian atas kolektor atas

- $U_b$ : koefisien perpindahan panas bagian bawah kolektor
- $U_L$ : koefisien perpindahan panas total kolektor
- $L_C$ : ketebalan pelat tembaga penutup material penyimpan panas
- $k_C$ : konduktivitas pelat tembaga penutup material penyimpan panas
- $L_{Al}$ : ketebalan material *Aluminium Foam* dan PCM
- $k_{Al}$ : konduktivitas termal *Aluminium Foam* dan PCM
- $L_S$ : ketebalan pelat besi *casing* material penyimpan panas
- $k_S$ : konduktivitas pelat besi *casing* material penyimpan panas
- $L_i$ : ketebalan isolator
- $k_i$ : konduktivitas termal isolator

Kerugian panas kolektor

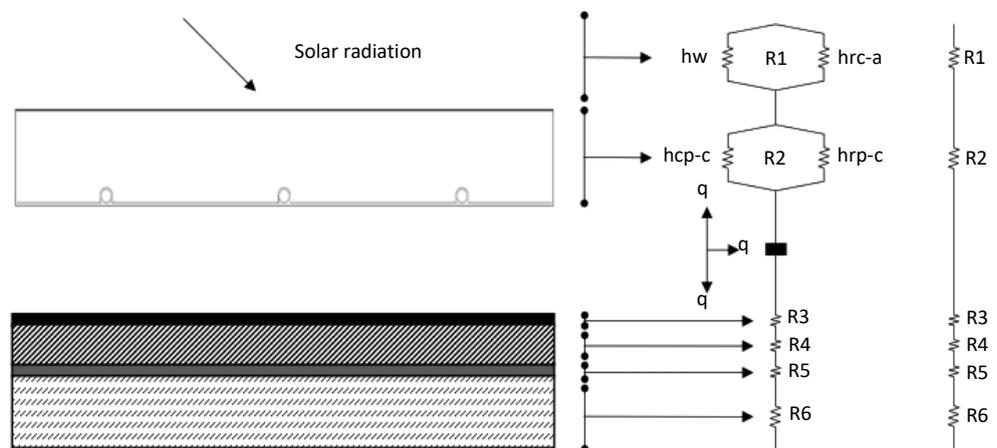
$$Q_{loss} = U_L(T_i - T_a) \dots\dots\dots(13)$$

Dimana:  $U_L$ : koefisien perpindahan panas total kolektor  
 $T_i$ : temperature *inlet*

Efisiensi Kolektor (Teoritis)

$$\eta = \frac{Q_n}{A_c I_T} \dots\dots\dots(14)$$

Dimana:  $I_T$ : intensitas matahari total,  $W/m^2$   
 $A_c$ : luasan absorber,  $m^2$   
 $Q_n$ : panas yang berguna



Gambar 13 Jala-jaala termal

Keterangan :

R1: perpindahan panas antara kaca penutup dan udara luar

R2: perpindahan panas antara kaca penutup dan pelat absorber

R3: perpindahan panas antara fluida kerja dan pelat tembaga penutup material penyimpan panas

R4: perpindahan panas antara pelat tembaga penutup material penyimpan panas dan material *Aluminium Foam* dan PCM

R5: perpindahan panas antara material *Aluminium Foam* dan PCM dan *casing* material penyimpan panas

R6: perpindahan panas antara *casing* material penyimpan panas dan isolator