

# **SOLAR ENERGY**

**Dan Mugisidi**



Redaksi:  
EduCenter Indonesia  
Jl. Bhakti 60A, Depok 16435

ISBN 978-602-52823-2-4



# **SOLAR ENERGY**

### **Sanksi Pelanggaran Pasal 113**

Undang-undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000,00 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
3. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
4. Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

# **SOLAR ENERGY**

**Dan Mugisidi**



Penerbit EduCenter Indonesia

2020

# **SOLAR ENERGY**

Dan Mugisidi

## **Editor:**

Oktarina Heriyani

## **Kontributor**

Abdul Fajar Kallawa

Edwin

Nurul Anisa Fitri

Hudian Nur Sahri

Irfan Nur Fauzi

M. Abdul Bagus P. W.

## **Desainer sampul & Penata isi:**

Bagas Shinugi, shinugi.com

ISBN 978-602-52823-2-4

ISBN :



© Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang

Diterbitkan pertama kali oleh EduCenter Indonesia

Redaksi:

**EduCenter Indonesia**

Jl. Bhakti 60A, Depok16435

*Isi buku sepenuhnya menjadi tanggungjawab penulis.*

Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apa pun (seperti cetakan, fotokopi, mikrofilm, VCD, CD-ROM, dan rekaman suara) tanpa izin tertulis dari pemegang hak cipta/Penerbit.

# Kata Pengantar

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga buku berjudul Solar Energi ini dapat diselesaikan. Terimakasih saya ucapkan kepada pihak-pihak yang telah berkontribusi pada pembuatan buku ini.

Matahari merupakan sumber energi bagi bumi. Angin yang bertiup, ombak yang menderu dan daun-daunan yang tumbuh. Matahari memanaskan air laut sehingga menguap berubah menjadi awan dan jatuh ke bumi dalam bentuk air tawar yang menjadi media kehidupan. Akan tetapi belum semua energi yang berasal dari matahari dimanfaatkan oleh alam, apalagi oleh manusia. Umat manusia berupaya memanfaatkan energi matahari untuk berbagai aktifitas; mulai dari mengeringkan baju, membangkitkan listrik bahkan mengubah air laut menjadi air tawar. Akan tetapi pemanfaatan masih sangat terbatas. Oleh karena itu penulis perlu menulis buku tentang Solar Energi.

Meskipun Buku Solar Energi ini baru membahas topik yang terbatas, diharapkan dapat bermanfaat bagi para pembacanya terutama yang ingin mempelajari mengenai pemanfaatan energi matahari.

Semoga tulisan ini menjadi ilmu yang bermanfaat.

Penulis



# DAFTAR ISI

<b>PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
<b>BAB 1: SODIS (<i>SOLAR WATER DISINFECTION</i>)</b> .....	<b>3</b>
Pendahuluan .....	3
Hasil Uji Laboratorium Proses SODIS .....	5
Bakteri.....	5
Virus.....	5
Protozoa.....	6
Fungi.....	6
Mekanisme Pengendalian Mikro Organisme Oleh Sinar Matahari .....	6
Pengaruh Kekeruhan Air.....	6
Pengaruh Sinar Ultra Violet.....	6
Pengaruh Temperatur.....	7
Cara Melakukan SODIS .....	7
Kelebihan dan Kekurangan SODIS .....	7
Kriteria Botol SODIS .....	8
Alat dan Bahan .....	10
Cara Pembuatan .....	10
Kesimpulan .....	11
Soal .....	12
<b>BAB 2: <i>SOLAR TOWER</i></b> .....	<b>13</b>
Pendahuluan .....	13
Jenis Pembangkit Listrik Tenaga Surya .....	13

<i>Parabolic Trough</i> .....	14
<i>Solar Tower</i> .....	15
<i>Solar Dishes</i> .....	17
Prinsip Kerja <i>Solar Tower</i> .....	19
Komposisi <i>Solar Tower Parabolic</i> .....	22
Pengaplikasian Komersil <i>Solar Tower</i> .....	24
PS 10 dan PS 20 .....	24
STJ.....	25
Garam Cair sebagai Penyimpan Panas.....	27
Kontrol <i>Solar Tower</i> .....	28
Soal .....	30
<b>BAB 3: PENDINGIN RUANGAN TENAGA SURYA</b> .....	<b>31</b>
Pendahuluan .....	31
Sistem Fotovoltaik.....	33
Sistem Kolektor Panas Matahari.....	36
Koefisien Kinerja .....	38
Kelebihan Pendingin Tenaga Matahari .....	41
Pengaplikasian Pendingin Ruangan.....	41
Contoh Latihan.....	43
Kesimpulan .....	45
Soal .....	46
<b>BAB 4: SOLAR WATER HEATER</b> .....	<b>47</b>
Pendahuluan .....	47
Klasifikasi .....	47
Tipe Kolektor.....	47
Tipe Tangki Kolektor.....	48
<i>Pool Collector</i> .....	49
Kolektor Plat Datar.....	49
Kolektor Tabung Vakum.....	50
Kolektor Terkonsentrasi .....	51
<i>Direct and Indirect systems</i> .....	53
<i>Active and Passive Systems</i> .....	53
Keuntungan dan Kerugian.....	55
Model Matematika .....	55
Keseimbangan Energi pada Kolektor Surya .....	55
Keseimbangan Energi pada Penyimpan Air .....	59

Perkembangan Teknologi <i>Solar Water Heater</i> .....	61
Pengaplikasian <i>Solar Water Heater</i> .....	62
Contoh soal .....	64
Soal .....	66
<b>BAB 5: HEAT STORAGE</b> .....	<b>67</b>
Pendahuluan .....	67
Definisi <i>Heat Storage</i> .....	68
<i>Latent Heat Storage</i> (Penyimpan Panas Laten) .....	69
<i>Sensible Heat Storage</i> (Penyimpan Panas Sensibel) .....	71
<i>Thermo-Chemical Storage</i> (Termokimia Penyimpanan) .....	72
Prinsip Kerja <i>Heat Storage</i> .....	73
<i>Phase Change Material</i> (Material Pengubah Fase) .....	75
Parafin .....	78
<i>Eutectic</i> .....	80
Charging dan Discharging .....	81
Kalor Tersimpan Sesaat .....	82
Kapasitas Energi Tersimpan .....	83
Efisiensi Pengumpulan Kolektif .....	84
Efisiensi Tangki <i>Heat Storage</i> .....	85
Soal .....	85
<b>BAB 6: SOLAR CELL</b> .....	<b>87</b>
Pendahuluan .....	87
Definisi <i>Solar Cell</i> .....	88
Klasifikasi <i>Solar Cell</i> .....	89
<i>Silicon Based Solar Cell</i> .....	90
<i>Advanced Solar Cell</i> .....	91
Struktur Dasar <i>Solar Cell</i> .....	91
Substrat .....	92
Material Semikonduktor .....	92
Kontak Metal .....	93
Lapisan Antireflektif .....	93
Enkapsulasi .....	93
Prinsip Kerja .....	93
Sistem Instalasi .....	94
Rangkaian Seri .....	94
Rangkaian Paralel .....	95

Efisiensi Sel Surya .....	96
Perkembangan Teknologi.....	96
Soal .....	97
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>98</b>

# PENDAHULUAN

Penyebab utama perubahan iklim global yang diterima secara umum dan akan meningkatkan emisi gas rumah kaca (GRK) adalah penggunaan bahan bakar fosil. Kekhawatiran tentang efek pemanasan global dan menurunnya persediaan cadangan minyak bumi menyebabkan tingginya minat terhadap energi terbarukan, misalnya energi angin dan matahari.

Matahari memberi bumi jumlah energi yang mengejutkan. Cukup untuk menggerakkan samudera dan pergerakan atmosfer, membuat penguapan dan kondensasi yang membawa air tawar ke daratan dan mendorong aliran sungai. Bahkan, menyebabkan terjadinya badai dan topan yang memporandakan alam dan membentuk daratan. Gempa yang menghantam San Francisco pada tahun 1906 dengan kekuatan 7,8 SR dan mengeluarkan energi sebesar  $10^{17}$  joule, sama dengan jumlah energi yang diberikan matahari ke bumi dalam satu detik.

Pasokan energi dari matahari dapat dimanfaatkan untuk begitu banyak keperluan. Sinar matahari dapat menghasilkan bahan bakar kimia melalui fotosintesis alami berwarna hijau tanaman atau fotosintesis buatan dalam sistem rekayasa manusia. Sinar matahari juga dapat dikonversi menjadi listrik dengan membangkitkan elektron dalam sel surya. Sinar matahari yang terkonsentrasi atau tidak terkonsentrasi dapat menghasilkan panas untuk penggunaan langsung atau konversi lebih lanjut ke listrik. Paling tidak, ada tiga kelompok besar penggunaan matahari sebagai sumber energi, yaitu; listrik, panas, dan penyimpanannya. Oleh karena besarnya manfaat

energi matahari dalam kehidupan, maka energi matahari dijadikan sebagai satu mata kuliah khusus di dalam kelompok ilmu energi terbarukan.

Buku ini dimaksudkan sebagai buku ajar dalam mata kuliah *Solar Energi*. Meski demikian, buku ini belum mencakup seluruh aspek yang dibutuhkan dalam memanfaatkan energi matahari. Pembahasan di dalam buku ini meliputi:

1. SODIS
2. Menara Matahari
3. Pendingin Ruangan dengan Tenaga Surya
4. Pemanas Air
5. Penyimpan Panas
6. Sel Surya

Buku ini masih membutuhkan penyempurnaan, baik dalam materi maupun dalam penulisannya. Oleh karena itu, perbaikan akan terus dilakukan agar dapat mengikuti perkembangan dalam memanfaatkan penggerak kehidupan yang diberikan oleh Allah SWT. dalam bentuk energi matahari.

# BAB 1

## SODIS (*Solar Water Disinfection*)

### Pendahuluan

*Solar water disinfection* (SODIS) adalah teknologi sederhana dan murah untuk mendapatkan air minum yang aman bagi setiap orang [1]. SODIS sangat diperlukan untuk mengurangi penyakit yang ditularkan melalui air. Sekitar 6 juta kematian pertahun disebabkan oleh penyakit yang ditularkan melalui air, antara lain diare [2] SODIS bekerja dengan cara memaparkan air yang tidak diolah di dalam botol plastik ke matahari [3] untuk mendapatkan UV-A (320-405 nm). Gambar 1 menunjukkan pemanfaatan SODIS.



Gambar 1.1. Pemanfaatan SODIS  
Sumber: [4]

SODIS dimulai oleh Eawag/Sandec yang merupakan lembaga penelitian terkemuka di Swiss. Program ini kemudian dikembangkan di Indonesia bersama dengan Yayasan Dian Desa [5]



*Gambar 1.2. Antusias masyarakat terhadap SODIS  
Sumber : [4]*

Proses SODIS merupakan pemanfaatan kombinasi sinar ultra violet dan panas sinar matahari yang menyebabkan meningkatnya kematian mikroorganisme di dalam air. Uji lapangan memperlihatkan sinergi tersebut secara efektif mampu mematikan bakteri *Eschericia Coli* [6].

## Hasil Uji Laboratorium Proses SODIS

### Bakteri

Bakteri yang menularkan patogen melalui air serta indikasinya menjadi topik utama penelitian laboratorium tentang kemanjuran fungsi SODIS. *Escherichia coli* (*E. Coli*) adalah jenis bakteri yang paling sering dipelajari. Bakteri telah terbukti dapat didesinfeksi oleh matahari setelah 6 jam lama pemaparan dengan kondisi lapangan yang sesuai [7].

### Virus

Ketahanan disinfeksi matahari berbeda pada setiap spesiesnya. *Bacteriophage f<sub>2</sub>* dan *bovine rotavirus* diketahui tidak aktif selama 3 jam pemaparan sinar matahari penuh. Virus *polio* diketahui tidak aktif selama kurang dari 6 jam pemaparan sinar matahari; berbeda dengan virus *ensefalomiokarditis* yang membutuhkan 12,5 jam lama pemaparan sinar matahari. Dapat dikatakan bahwa patogen virus tersebut paling resistan terhadap SODIS [7].

### Protozoa

Patogen protozoa seperti *Giardia lamblia*, *Cryptocidium spp*, dan *amuba* lebih tahan terhadap SODIS dibandingkan bakteri. Virus dapat tidak aktif jika suhu dinaikkan ke atas 40 dan pemaparan sinar matahari selama 6 jam – 12 jam [7].

### Fungi

Beberapa jamur dapat menjadi patogen manusia yang ditularkan melalui air. Jamur *Candida albicans* dapat dilemahkan dalam 6 jam paparan sinar matahari [7].

### Pengaruh Kekeruhan Air

Kekeruhan air dapat mengurangi efisiensi pada SODIS. Air yang akan melakukan SODIS harus memiliki kekeruhan dibawah 30 NTU. Kekeruhan air dapat menjadi parameter tingkat penyerapan dari radiasi matahari [8] pada cuaca panas ataupun

sejuk. Saat cuaca mendung, disinfeksi air dengan matahari menjadi tidak efektif.

### Pengaruh Sinar Ultra Violet

Bakteri dan virus dapat terbunuh dengan penyinaran gelombang pendek. Semakin pendek gelombang semakin efisien untuk membunuh mikroorganisme. Tabel di bawah ini menunjukkan daya tahan mikroorganisme terhadap sinar ultra violet.

Organisme yang diuji	Besarnya sinar ultra violet yang dibutuhkan untuk membunuh mikroorganisme ( $W.h/m^2$ )		
	90 %	99 %	99,90 %
<i>Streptococcus faecalis</i>	8,90	17,80	26,72
<i>Coliform</i>	8,24	16,59	24,74
<i>Escherichia Coli</i>	6,36	12,72	19,08

### Pengaruh Temperatur

Suhu di atas 30°C dapat meningkatkan efektivitas SODIS [8]. Peningkatan suhu menyebabkan sensitifitas mikroorganisme meningkat [9]

### Cara Melakukan SODIS

SODIS bekerja dengan cara memasukkan air yang mengandung bakteri dan virus ke dalam botol *polyethylene terephthalat* (PET) dan kemudian dipaparkan pada matahari secara langsung selama 6 jam [10].

## Kelebihan dan Kekurangan SODIS

### Beberapa kelebihan SODIS

- A. Penerapan yang mudah, sehingga dapat diterima oleh masyarakat [11].
- B. Murah dan sarana yang dibutuhkan mudah didapat.
- C. Hasil proses SODIS yang efektif. Ditunjukkan dengan hilangnya bakteri *E.Coli/ Coli form* dan mikroorganisme lainnya [12].
- D. Meringankan kebutuhan air bebas kuman untuk sehari-hari [13].
- E. Pemanfaatan dalam jangka panjang dapat menghemat sumber daya alam dan ekonomi.

### Beberapa kekurangan SODIS

- A. Tidak dapat diterapkan pada air keruh, tingkat kekeruhan air harus kurang dari 30 NTU [14].
- B. SODIS memerlukan sinar matahari. Tidak dapat digunakan saat hujan maupun di tempat yang teduh.
- C. Tidak dapat dilakukan pada kapasitas air yang besar.
- D. Tidak dapat mengubah kualitas kimia air.

### Kriteria Botol SODIS

Setelah tercetusnya SODIS di Swiss, dan pada tahun 1997 di Indonesia, Yayasan Dian Desa bekerja sama dengan EAWAG/SANDEC untuk memperkenalkan SODIS [15]. Botol plastik dipilih untuk SODIS karena botol plastik memiliki ketebalan yang tipis dan berwarna transparan sehingga memudahkan masuknya sinar matahari dan menyebabkan panasnya mudah menyebar. Botol plastik mudah dicat dan intensitas matahari yang diserap sesuai dengan kapasitas airnya.

Akan tetapi, SODIS tidak dapat dilanjutkan karena pemakaian botol plastik yang dipanaskan secara terus-menerus dapat menyebabkan terurainya kandungan kimia pada botol sehingga dapat mencemari air [16].

Akhirnya, program SODIS tidak berjalan sesuai dengan keinginan. Program yang seharusnya membantu masyarakat untuk mendapatkan air minum bersih, malah menghasilkan air minum yang tercemar bahan kimia yang berasal dari botol plastik.



*Gambar 1. 7 Botol yang digunakan untuk SODIS  
Sumber: [4]*

Oleh karena hal tersebut maka kriteria botol yang dapat digunakan untuk SODIS, yaitu botol yang terbuat dari kaca dan berwarna transparan. Botol harus bersih dan sekelilingnya tidak tertutup apapun. Bila akan menggunakan botol plastik, harus menggunakan botol plastik berlabel 2 HDPE (*high density polyethylene*). HDPE merupakan bahan plastik yang aman digunakan karena mampu mencegah reaksi kimia antara isi di dalamnya dan botol kemasan.

## Alat dan Bahan

### Alat dan bahan yang digunakan

#### A. Alat

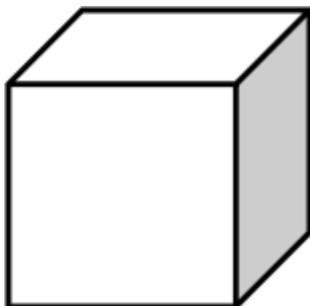
- 1) Pemotong kaca yang berfungsi untuk memotong kaca.
- 2) Penggaris berfungsi untuk mengukur kaca yang akan dipotong.
- 3) Spidol berfungsi untuk menandakan bagian-bagian yang akan dipotong.
- 4) Kuas berfungsi untuk mengecat dasar wadah.
- 5) Lem kaca berfungsi untuk menyambung kaca.

#### B. Bahan

- 1) Kaca 10 cm x 10 cm
- 2) Cat hitam
- 3) Pipa

### Cara Pembuatan

Cara membuat wadah SODIS dengan kapasitas 1 liter/hari adalah dengan membuat kubus kaca yang diberi pipa di bagian atas untuk memasukkan air dan mengeluarkan air, seperti di bawah ini.

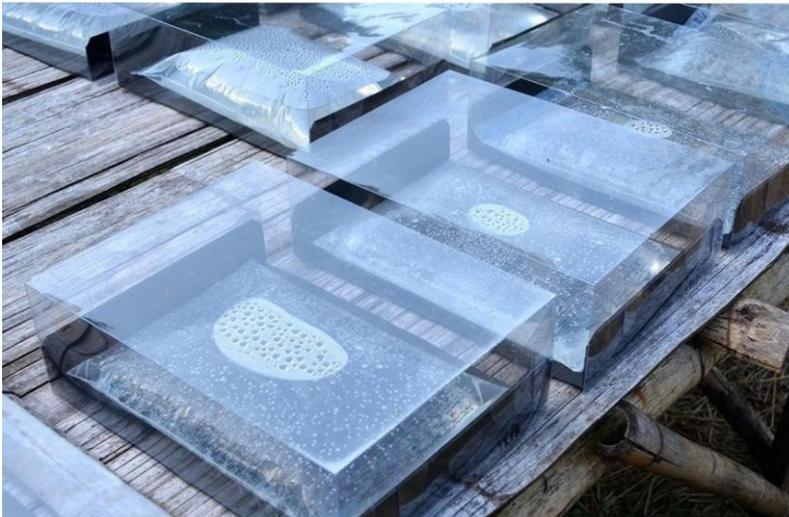


Gambar 1.8. Desain wadah SODIS

Ukuran kubus adalah 10 cm x 10 cm dapat dibuktikan dengan perhitungan di bawah ini:

$$\begin{aligned} \text{volume} &= \text{sisi} \times \text{sisi} \times \text{sisi} \\ \text{volume} &= 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} = 1000 \text{ cm}^3 = 1 \text{ liter} \end{aligned}$$

Air yang digunakan harus di bawah 30 NTU. Pada dasar wadah dilapisi cat berwarna hitam, hal ini bertujuan untuk menangkap panas matahari. Sinar matahari memanaskan air selama 6 jam. Selama 6 jam penyinaran, sinar matahari akan mendesinfektan air dari mikroba-mikroba yang terkandung di dalamnya. Oleh karena itu, air tidak boleh terlalu keruh karena akan mengganggu proses desinfektan. Setelah proses penjemuran selama 6 jam, air dapat dikonsumsi.



Gambar 1. 9 SODIS dengan desain wadah berbentuk kotak.  
Sumber : [4]

## Kesimpulan

Banyak hal yang perlu diperhatikan pada saat melakukan SODIS, seperti tingkat kekeruhan air yang tidak boleh lebih dari 30 NTU dan wadah air yang dipakai harus transparan. Selain itu, tidak semua wadah plastik dapat dipakai secara berulang dikarenakan dapat menimbulkan pencemaran kimia pada air. Oleh karena itu, SODIS masih harus dikembangkan lebih jauh lagi.

## Soal

1. Di mana sajakah area yang tepat untuk menggunakan SODIS?
2. Apakah yang menyebabkan sinar matahari dapat digunakan untuk menghilangkan bakteri dan jamur pada air?
3. Apakah syarat yang dibutuhkan untuk mendesinfektan air dengan sinar matahari?
4. Berapakah volume air maksimal yang dapat didesinfektan dengan menggunakan SODIS?
5. Apabila ada 30 keluarga dalam sebuah desa dan setiap keluarga beranggotakan 4 orang, bagaimanakah cara yang terbaik untuk menyediakan air minum dengan cara SODIS?



# **BAB 2**

## **SOLAR TOWER**

### **Pendahuluan**

Kekurangan energi dan polusi lingkungan adalah masalah yang memengaruhi kehidupan masyarakat dan membatasi perkembangan masyarakat secara serius. Oleh karena itu, banyak negara di dunia berlomba mengembangkan penelitian tentang penerapan energi surya. Menghasilkan listrik melalui tenaga surya adalah cara yang efektif untuk memecahkan masalah energi, sumber daya, dan lingkungan [17].

Energi panas matahari adalah sumber energi yang strategis di seluruh dunia. Banyak pembangkit energi listrik hingga Gigawatt seperti ini sedang dibangun. Ada berbagai teknologi yang bersaing mengenai konsentrator, media perpindahan panas, dan siklus daya. Sistem surya yang terfokus dapat digunakan untuk reaksi kimia. Misalnya hidrogen, peleburan logam yang membutuhkan suhu tinggi, dan produksi senyawa kimia lainnya [18].

### **Jenis Pembangkit Listrik Tenaga Surya**

Pembangkit listrik tenaga surya menggunakan matahari sebagai sumber panas dan dapat memanfaatkan inframerah dan sebagian kecil dari spektrum yang terlihat. Energi ini diserap dan digunakan untuk menaikkan suhu fluida transfer panas [19].

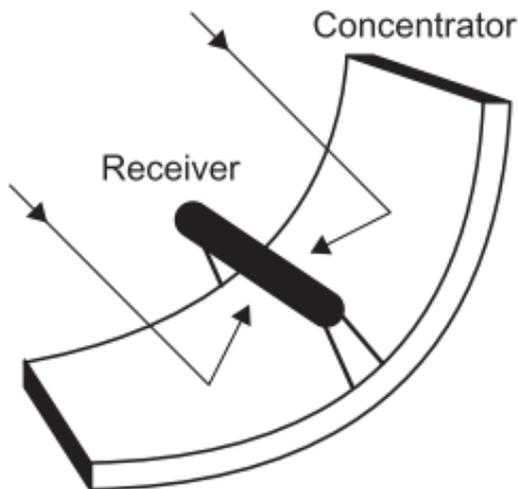
Radiasi matahari ketika mencapai bumi dengan intensitas yang relatif rendah harus dikonsentrasikan untuk menjadi

sumber panas yang efektif. Pembangkit listrik tenaga surya menggunakan cermin yang dapat memusatkan cahaya matahari sehingga efektif untuk pembangkit listrik tenaga surya. Ada tiga jenis pembangkit listrik tenaga surya yang umum digunakan, jenis keempat menggunakan lensa *Fresnel* yang mendekati reflektor palung, yaitu: [19]

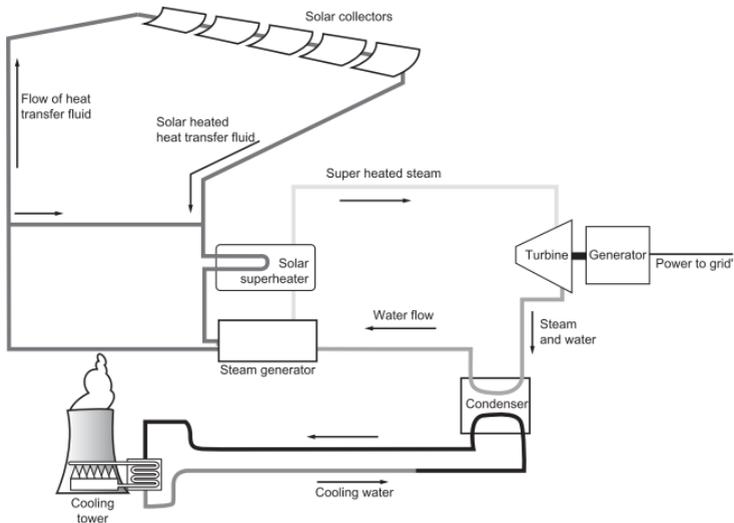
- A. *parabolic trough*
- B. *solar tower*
- C. *solar dishes*
- D. *Fresnel reflector*

### Parabolic Trough

Parabola adalah bentuk ideal untuk reflektor surya karena memusatkan semua cahaya dari matahari pada satu titik yang disebut pemfokusan. Parabola lengkap berbentuk lingkaran yang membentuk dasar untuk sistem piringan matahari [19].



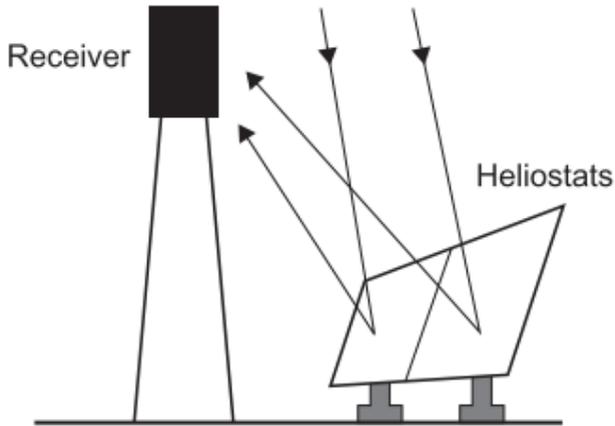
Gambar 2.1. Skema dari *parabolic trough*  
Sumber: [20]



Gambar 2.2. Skema pembangkit listrik tenaga surya parabolic trough  
 Sumber: [20]

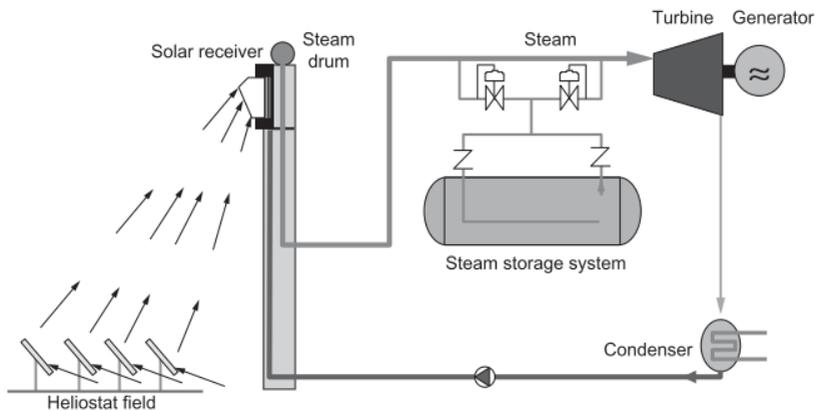
### Solar Tower

*Solar tower* untuk pembangkit listrik tenaga surya menggunakan sistem pengumpulan panas yang tersebar. *Solar tower* memusatkan pengumpulan panas di satu fasilitas pusat yang terletak di bagian atas *tower*. *Tower* diposisikan di tengah kumpulan cermin yang disebut heliostat, yang masing-masing cerminnya dikendalikan untuk mengarahkan sinar matahari agar mencapai penerima surya yang dipasang di menara [19].



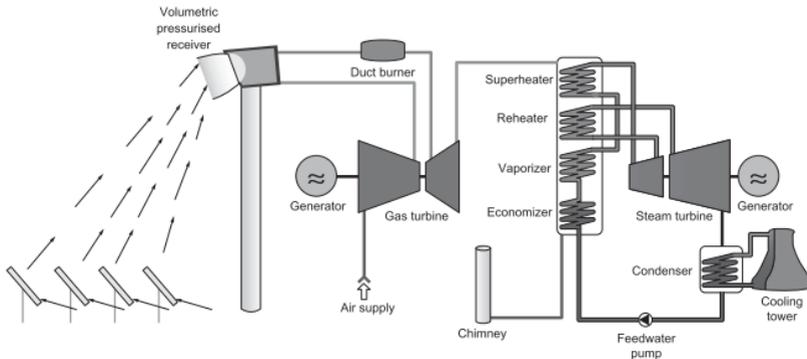
Gambar 2.3. Sistem solar tower  
 Sumber: [20]

Ukuran maksimum pembangkit listrik solar tower ditentukan dari ukuran bidang surya yang akan dibangun. Ketika jarak antara heliostat dan penerima pusat semakin besar, maka efisiensi akan turun. Menara lapangan tunggal terbesar adalah sekitar 200 MW dimana cermin atau heliostat yang digunakan dalam bidang solar tower hampir datar, ini membuatnya lebih murah untuk diproduksi [19].



Gambar 2.4 Skema solar tower dengan sistem direct steam dan head storage  
 Sumber: [20]

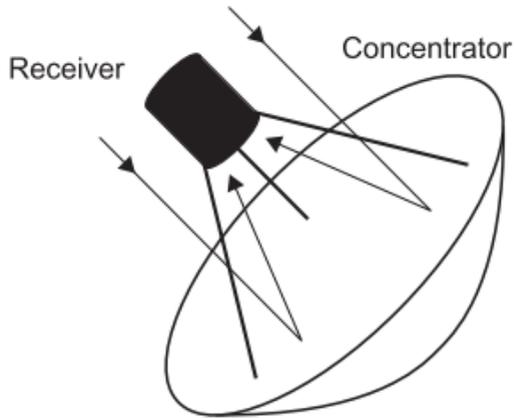
Desain ini berpotensi memberikan kinerja yang lebih baik dengan menggunakan udara sebagai fluida transfer panas. Ini adalah dasar dari penerima *volumetric*. Tower dibangun dari keramik dan mampu memanaskan udara hingga 1000°C. Dalam sistem udara yang paling sederhana, udara dilewatkan melalui penukar panas yang menghasilkan uap untuk menggerakkan turbin [19].



Gambar 2.5. Skema sistem *receiver solar tower* udara volumetrik bertekanan  
 Sumber: [21]

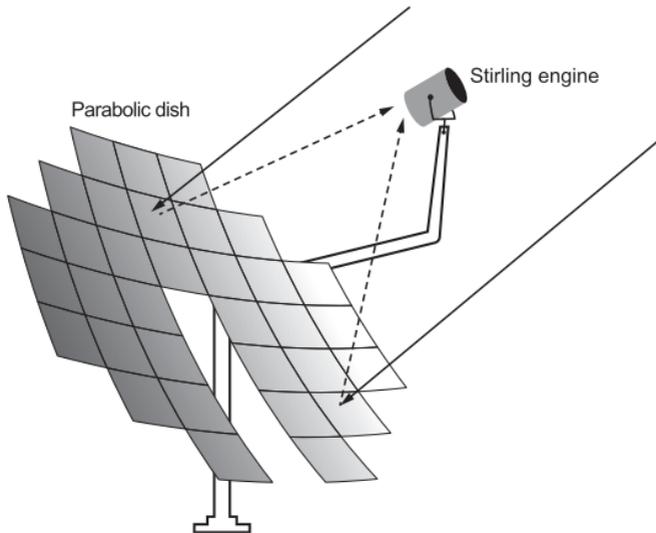
## Solar Dishes

Pembangkit listrik tenaga surya biasanya merupakan reflektor parabola tunggal yang mirip dengan antena satelit, tetapi dengan mesin panas sebagai penerima gelombang mikro sebagai fokusnya. Piringan dan mesinnya dibangun sebagai satu unit, dipasang pada kerangka yang memungkinkannya melacak matahari saat melintasi langit. Sebagian besar unit tenaga surya adalah 25 kW meskipun yang lebih besar telah dibangun. Dikerjakan secara tunggal, mereka dapat menyediakan unit catu daya mandiri. Namun, mereka juga dapat digunakan dalam jumlah yang lebih besar untuk menyediakan kapasitas produksi yang lebih tinggi [19].



Gambar 2.6. Skema dari unit *solar dish*  
Sumber: *Power Generation Technologies*

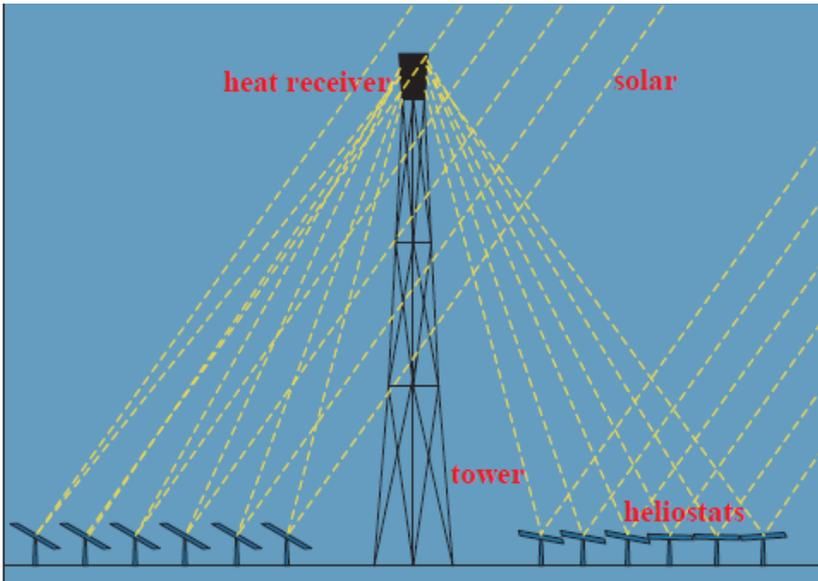
Seperti jenis pembangkit listrik tenaga surya lainnya, reflektor untuk *solar dish* umumnya terbuat dari kaca cermin. Namun, satu reflektor kaca berdiameter 10 m akan sangat mahal sehingga biasanya terbuat dari berbagai elemen kecil yang disusun menjadi piringan besar. Reflektor plastik dan aluminium juga telah diuji serta teknik baru dimana membran plastik tipis ditarik kencang di atas ring dan kemudian dideformasi dengan menerapkan vakum parsial disatu sisi [19].



Gambar 2- 7 sistem tenaga solar dish praktis dengan cermin berpenampang  
Sumber: [20]

### **Prinsip Kerja *Solar Tower***

Sistem pembangkit listrik tenaga *solar tower* dapat mengubah energi matahari menjadi energi listrik [17]. Melalui kumpulan heliostat yang dapat secara mandiri melacak matahari, sistem ini mengkonsentrasikan sinar matahari ke penerima panas yang dipasang di bagian atas menara. Suhu penerima panas naik dan memanaskan media transfer panas yang digunakan memanaskan air untuk menghasilkan uap panas atau gas panas yang dapat mendorong generator menghasilkan listrik. Sistem menara pembangkit listrik tenaga surya terdiri dari sistem pengumpulan energi surya dan sistem turbo-generator, sehingga efisiensi pembangkit listriknya adalah produk dari efisiensi pengumpulan panas dan efisiensi mesin panas [22]



Gambar 2.8 sistem menara pembangkit listrik tenaga surya.  
Sumber: [22]

$$\eta_c = \eta_0 - \frac{h'(T_r - T_a)}{C.Ia} - \frac{\epsilon \sigma B(T_r^4 - T_a^4)}{C.Ia} \quad (1)$$

Dalam persamaan ini,  $T_r$  adalah suhu operasi penerima panas,  $T_a$  adalah suhu sekitar, dan unitnya adalah K.  $Ia$  adalah matahari langsung  $h'$  adalah koefisien perpindahan panas komperehensif dari radiasi konveksi, unitnya adalah  $W/m^2$ .  $\eta_0$  adalah efisiensi optik heliostat dan konduksi panas dari penerima panas, unit  $W/(m^2.K)$  adalah rasio konsentrasi sistem.  $\epsilon$  adalah emisivitas permukaan dari penerima panas,  $\sigma B = 5.6696 \times W/(m^2.K^4)$ , yang merupakan konstanta Stephen-Boltzman [17].

Efisiensi mesin panas dapat dinyatakan sebagai [17]:

$$\eta_t = 1 - \frac{2Ta}{Tr+Ta} \quad (2)$$

Jadi efisiensinya adalah [17]:

$$\eta = \eta_c \cdot \eta_t = \left[ \eta \frac{h'(Tr-Ta)}{C \cdot Ia} - \frac{\varepsilon \sigma B(T^4_r - T^4_a)}{C \cdot Ia} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{2Ta}{Tr+Ta} \right] \quad (3)$$

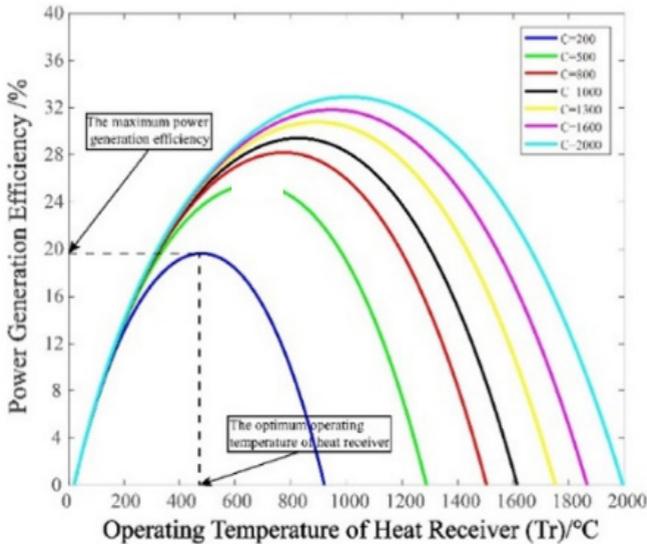
Dari persamaan (3) dapat dilihat bahwa efisiensi pembangkit listrik yang relevan, yaitu  $I_d$ ,  $\eta_d$ ,  $C$ ,  $h'$ ,  $T_r$  dan  $T_d$ , di mana  $I_d$ ,  $\eta_d$ ,  $h'$ ,  $T_a$  dikonfirmasi, pembangkit listrik efisiensi bervariasi dengan suhu operasi penerima panas dan rasio konsentrasi sistem.

Gambar 2.9 menunjukkan efek rasio konsentrasi yang berbeda pada daya efisiensi sistem. Dapat dilihat bahwa ketika suhu, operasi dari penerima panas meningkat, efisiensi mesin panas juga meningkat, sementara efisiensi pengumpulan panas menurun. Oleh karena itu, efisiensi pembangkit daya sistem akan memiliki titik ekstrem.

### ***Komposisi Solar Tower Parabolic***

Konsentrasi rasio (C) sistem sama dengan rasio irradiansi permukaan penerima panas ( $I_p$ ), hingga irradiansi permukaan heliostat ( $I_a$ ) :

$$C = \frac{I_r}{I_a} = \frac{E2/Sr}{E1/Sh} \quad (4)$$



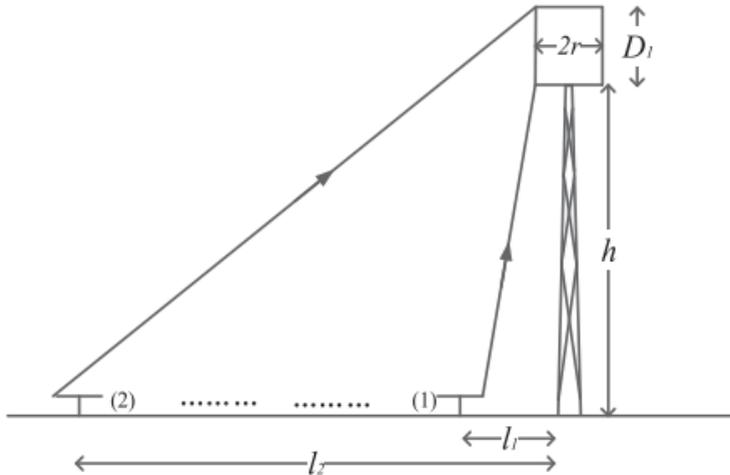
Gambar 2.9. Pengaruh rasio konsentrasi pada efisiensi pembangkit  
 Sumber: [22]

Dalam persamaan (1),  $E_2$  dan  $E_1$  adalah total energi matahari pada panas permukaan penerima panas dan energi matahari total pada permukaan heliostat. Masing-masing,  $S_r$  dan  $S_h$  adalah permukaan penerima panas dan total luas heliostat, jadi anggap  $S_h$  sebagai konstanta. Secara teori, tidak ada kerugian, jadi  $E_2 = E_1$ , (bahkan ada kerugian refleksi, kehilangan efek kosinus, kehilangan *shading* dan *blocking*). Didefinisikan sebagai rasio luas total heliostat dan luas permukaan penerima panas, kemudian persamaan (4) dapat disederhanakan sebagai:

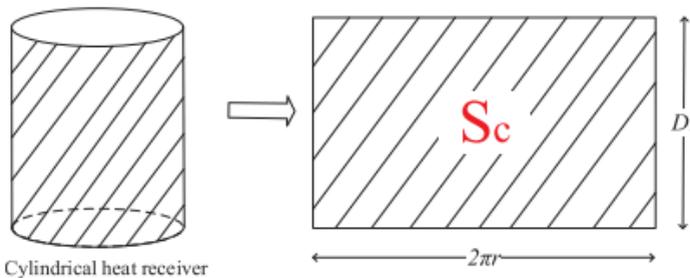
$$C = \frac{S_h}{S_r} \tag{5}$$

Diagram sederhana menara pembangkit listrik tenaga surya ditunjukkan pada gambar 2.10. tidak ada heliostat di area pusat dekat dengan menara. Memang benar bahwa sebagian besar bidang heliostat dari sistem pembangkit listrik tenaga surya menara tidak secara rotasi simultan, tetapi dalam makalah ini, kami menganggap bahwa bidang heliostat idealnya berputar

simetris secara rotasi. Oleh karena itu, kita dapat menganggap bidang heliostat sebagai sumber cahaya annular; karena bentuk heliostat adalah simetris secara rotasi, dimungkinkan untuk menyederhanakan bidang heliostat dan hanya menahan heliostat dalam satu arah.



Gambar 2.10. Sistem menara panas pembangkit listrik tenaga surya tanpa ACPC  
 Sumber: journal homepage: [www.elsevier.com/locate/solener](http://www.elsevier.com/locate/solener)



Gambar 2.11 Tampilan permukaan penerima panas silinder yang dikembangkan  
 Sumber: journal homepage: [www.elsevier.com/locate/solener](http://www.elsevier.com/locate/solener)

Secara umum, penerima panas dalam sistem ini dapat disederhanakan menjadi sebuah silinder dengan ketinggian  $D_1$  dan jari-jari  $r$ . Tampilan yang dikembangkan dari permukaan

penerima panas silinder ditunjukkan pada gambar 2.11 dan luasnya adalah:  $S_c = 2\pi r.D_1$ . dan wilayahnya menurut persamaan (5), rasio konsentrasi sistem ini adalah:

$$C = \frac{S_h}{S_r} = \frac{S_h}{S_c} \quad (6)$$

Dari persamaan (4) dan (6), dapat dilihat bahwa menimbulkan irradiansi permukaan penerima panas dapat meningkatkan rasio konsentrasi sistem, sementara mengurangi luas permukaan penerima panas dapat meningkatkan radiasi permukaan penerima panas ketika energi total tetap tidak berubah.

## **Pengaplikasian Komersil *Solar Tower***

### **PS 10 dan PS 20**

Pabrik Planta Solar 10 (PS10), di Plataforma Solar de Sanlúcar la Mayor (PSSM), telah terhubung ke jaringan sejak Juni 2007; terletak di dekat Seville, Spanyol, dan mulai beroperasi pada tahun 2006. Ini memberikan nominal tenaga kotor 11,5 MWe dan menghasilkan sekitar 24,3 GWh listrik per tahun - cukup untuk memasok 6.000 rumah tangga [18].

Menara surya 10 MW PS10 di Spanyol memiliki bidang 624 heliostat, atau sekitar 60 untuk setiap megawatt kapasitas pembangkit, dan bidang kolektor mencakup area seluas 60 ha, atau 5,5 ha / MW [21].



*Gambar 2.12 Pandangan bird-eye dari PS10  
Sumber: Concentrating Solar Power*

PS20 terletak tepat di sebelah PS10 dan mulai beroperasi pada tahun 2009; menghasilkan tenaga kotor 20 MWe dengan pergantian energi sebesar 50 600 MWh [18]. Ini beroperasi pada kondisi uap yang relatif ringan 250°C dan 40 bar [21].

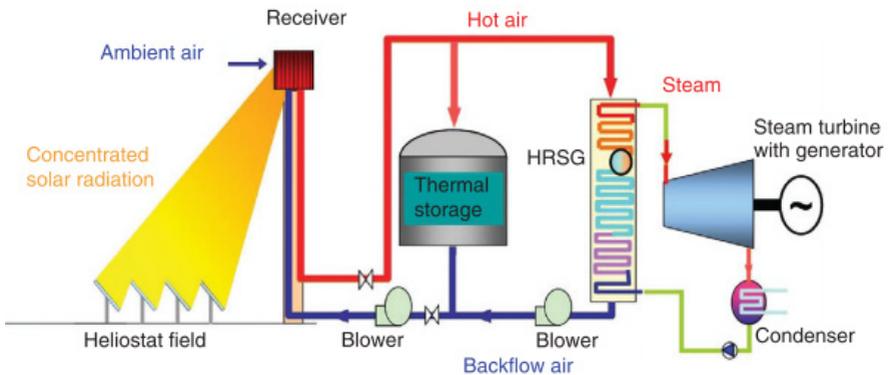
## **STJ**

Pembangunan pembangkit listrik menara surya 1,5 MW dimulai pada 2008 di Jerman. Pembangkit ini beroperasi sejak Desember 2008 dan memulai produksi listrik pada musim semi 2009 [18].

Sistem konsentrator terdiri dari 2150 heliostat penelusur matahari masing-masing sekitar 8 m<sup>2</sup> permukaan reflektif dan memantulkan sinar matahari ke lubang penerima 22 m<sup>2</sup> dalam bentuk segmen miring dari sebuah silinder [18].



Gambar 2.13. Pandangan bird-eye STJ  
 Sumber: Concentrating Solar Power



Gambar 2.14. Diagram skematik dari STJ  
 Sumber: Concentrating Solar Power

## Garam Cair sebagai Penyimpanan Panas

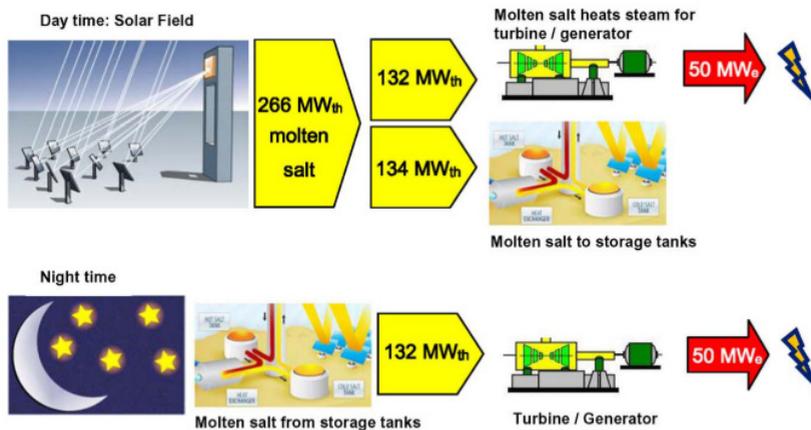
Salah satu karakteristik paling penting dari sistem penyimpanan termal adalah efisiensi penyimpanan yang sangat tinggi.

Dengan efisiensi tahunan sebesar 99% memungkinkan untuk pabrik komersial[23]. Satu-satunya kerugian berasal dari:

- A. kehilangan panas lambat melalui dinding tangki, yang dijaga agar viainsulasi minimum;
- B. proses pertukaran panas antara medium, misalnya garam ke uap untuk menara atau minyak ke garam dan garam ke minyak.

Sistem lain yang telah digunakan di menara surya komersial tanaman melibatkan penggunaan garam cair sebagai cairan transfer panas. Garam cair biasanya merupakan campuran nitrat yang membentuk cairan pada suhu yang dicapai di pabrik menara surya. Biasanya campuran tersebut meliputi 60% natrium nitrat dan 40% kalium nitrat [21].

Misalnya, pertimbangkan *solar tower* yang berkonsentrasi yang memiliki turbin 50-MWe (MW listrik), tetapi memiliki susunan cermin matahari yang terlalu besar (*oversize*) oleh dua faktor, sehingga setengah energi matahari yang dikumpulkan kapan saja dapat dikirim ke penyimpanan. Dengan *oversize* dalam sistem, penerima panas akan mengumpulkan 266 MW (MW *thermal*) energi matahari dalam garam cair di puncak menara. Dari jumlah ini, 132 MW daya thermal (termal) langsung memberi energi pada siklus *Rankine* untuk Bon-san pembangkit listrik, menghasilkan 50 MW listrik, sementara 134 MW daya panas disimpan dalam tangki panas. Pada malam hari, garam cair dari tangki penyimpanan menghasilkan 132 MW uap ke turbin (dengan 2 MW hilang selama proses penyimpanan) dan 50 MW listrik diproduksi [24].



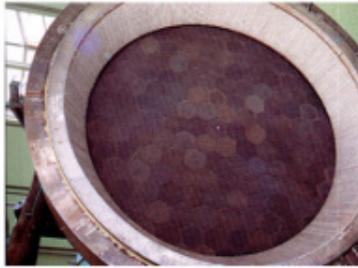
Gambar 2.15. Pengoperasian menara tenaga surya di siang hari dan malam hari dengan penyimpanan

Sumber: [24]

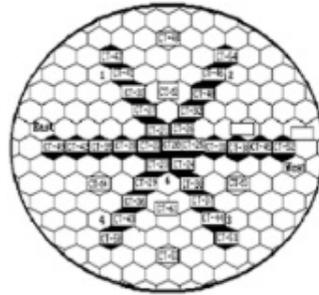
## Kontrol Solar Tower

Tren saat ini dalam sistem pelacakan konsentrator surya adalah dengan menggunakan pengontrol *loop* terbuka yang menghitung arah vektor matahari berdasarkan lokasi dan waktu [25].

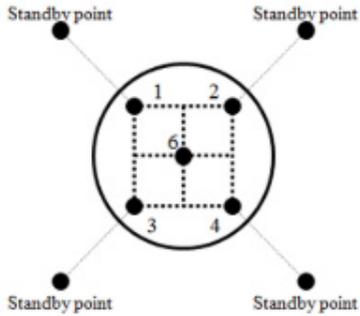
Salah satu masalah utama dalam mengoperasikan *receiver* adalah untuk mendapatkan distribusi fluks yang sesuai untuk menghindari kerusakan karena gradien termal yang berlebihan. Konsentrasi penerima surya memiliki heliostat di mana semua heliostat diarahkan pada titik yang sama mengarah ke distribusi *nonuniform* memuncak. Salah satu cara untuk mengatasi profil iradiasi yang tidak seragam adalah menempatkan heliostat individu sengaja ditujukan pada titik tujuan yang berbeda sedemikian rupa sehingga profil iradiasi memuncak. Jumlah dan lokasi titik bidik biasanya ditentukan oleh simulasi di bawah kondisi radiasi yang berbeda. Biasanya lima titik bidik, satu di pusat penerima dan empat sisanya di pinggiran [26].



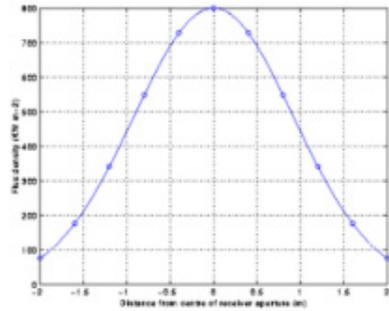
(a) TSA solar receiver



(b) Location of thermocouples



(c) Aimpoints & standby points



(d) Theoretical flux profile

Gambar 2.16 Kondisi *control flux*  
 Sumber: [24]

## Soal

1. Apakah tujuan penggunaan menara matahari?
2. Sebutkan jenis reflektor pada menara energi dan jelaskan penggunaannya!
3. Jelaskan cara kerja menara matahari!
4. Apakah hasil akhir menara matahari yang dimanfaatkan oleh masyarakat?
5. Sebuah boiler membutuhkan panas sebesar 1800 KJ/s agar uap yang dihasilkan mampu menggerakkan turbin uap. Apabila boiler tersebut dipanaskan oleh tenaga matahari melalui *solar tower*, hitunglah luas area pemantul yang dibutuhkan! Energi panas matahari rata-rata 1200 Watt/m<sup>2</sup>.

# **BAB 3**

## **PENDINGIN RUANGAN TENAGA SURYA**

### **Pendahuluan**

Matahari sebagai sumber panas terbesar di bumi dapat dimanfaatkan sebagai energi terbarukan yang tidak terbatas selama masih memancarkan cahaya. Indonesia terletak pada 6 – 11 Lintang Selatan (LS) dan 95 – 141 Bujur Timur (BU) dengan peredaran matahari dalam setahun yang berada pada daerah 23,5 Lintang Utara dan 23,5 Lintang Selatan maka Indonesia akan selalu disinari matahari selama 10 – 12 jam dalam sehari [27]. Cahaya dan panas yang terpancar disalurkan ke komponen pendukung untuk selanjutnya diaplikasikan dalam kehidupan sehari-hari.

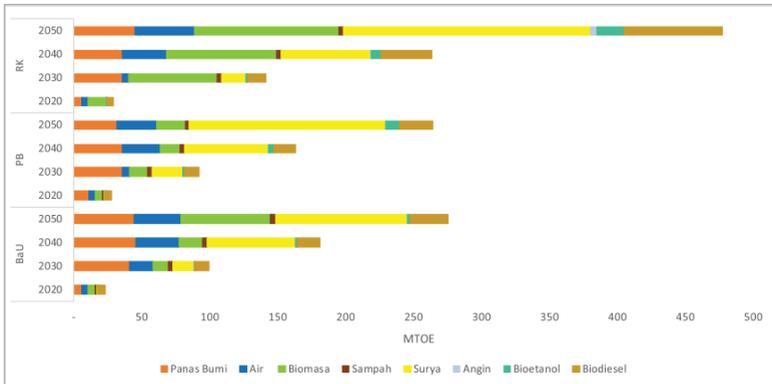
Penyediaan energi baru terbarukan bersumber dari air, panas bumi, bioenergi, matahari, angin, biomasa, sampah, bioethanol, dan biodiesel [28]. Pada table 3.1 dapat dilihat bahwa potensi energi baru terbarukan dari matahari di Indonesia sangat besar.

Tabel 3.1. Potensi Energi Terbarukan

Jenis Energi	Potensi
Tenaga Air	94,3 GW
Panas Bumi	28,5 GW
Bioenergi	PLT Bio : 32,6 GW dan BBN : 200 Ribu Bph
Matahari	207,8 GWh
Angin	60,6 GW
Energi Laut	17,9 GW

Sumber: Outlook Energi Indonesia 2019

Selain potensi energi surya yang tinggi dari gambar 3.1 dapat diketahui matahari sebagai energi alternatif memiliki emisi rendah karbon. Rendahnya emisi karbon dioksida mengurangi efek rumah kaca.



Gambar 3.1. Penyediaan Energi Baru Terbarukan  
sumber: Outlook Energi Indonesia 2019

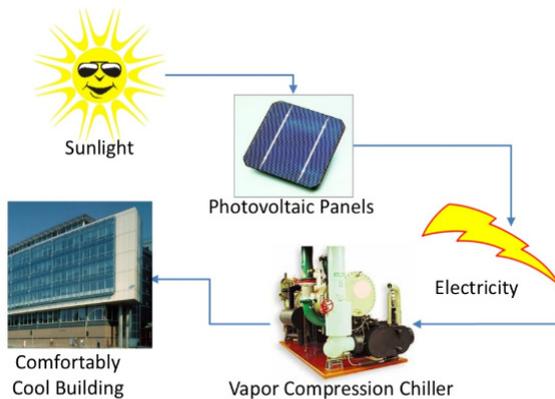
Semua sektor yang berbentuk bangunan, baik itu layanan publik atau individual akan membutuhkan pendingin ruangan [29]. Pendingin ruangan konvensional membutuhkan listrik untuk menggerakkan kompresor yang mengalirkan zat pendingin, menyerap, dan melepas panas [30]. Semakin banyak

ruangan semakin banyak juga pendingin yang dibutuhkan dan semakin tinggi konsumsi listrik. Energi alternatif dibutuhkan untuk mengurangi tingginya pemakaian listrik dan panas matahari dapat dimanfaatkan menjadi energi listrik.

Salah satu pengaplikasiannya adalah pada pendingin ruangan tenaga surya. Ada dua metode yang dapat digunakan untuk pendingin ruangan tenaga matahari, yaitu sistem fotovoltaik dan kolektor panas matahari [31].

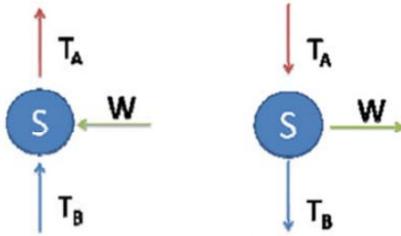
## Sistem Fotonvoltaik

Pendingin tenaga surya menggunakan sistem fotonvoltaik membutuhkan panel *photovoltaic*, baterai, dan mesin pendingin kompresi uap [32]. Panel fotonvoltaik berfungsi untuk mengkonversi langsung sinar matahari menjadi energi listrik.

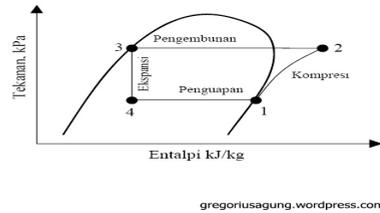


Gambar 3.2. Siklus Pendingin Ruangan Tenaga Matahari dengan Fotonvoltaik  
Sumber : [33]

Pendingin kompresi uap beroperasi atas dasar siklus *carnot* terbalik, yaitu menurunkan temperatur [34].



Gambar 3.3. Perbedaan Siklus Refrigerasi dan Siklus Carnot



Gambar 3.4. Diagram Tekanan vs Entalpi Refrigerasi Kompresi Uap

Sumber: [34]

Refrigeran yang masuk melalui sisi hisap (*suction*) dikompresi hingga bertekanan tinggi. Selanjutnya terjadi perubahan fasa panas laten, yaitu temperatur dan tekanan konstan. Fasa gas berubah menjadi cair dengan membuang kalor ke lingkungan. Kalor dapat dilepaskan karena temperatur dan tekanan refrigeran lebih tinggi dari lingkungan. Semakin banyak panas yang dilepaskan di kondensor semakin banyak fluida kerja yang mencair. Refrigeran cair akan mengalir pada pipa kapiler menuju evaporator. Pada kondisi ini, temperatur refrigeran berada di bawah temperatur lingkungan. Perbedaan temperatur menyebabkan refrigeran menyerap kalor di lingkungan dan mengubah fasa menjadi gas. Uap dingin kemudian dilepaskan ke ruangan yang akan didinginkan.

Pada setiap bagian dari kondensasi sampai evaporasi dapat dihitung menggunakan beberapa rumus berikut [35]:

### 1. Kompresi

Besarnya daya atau kinerja kompresi yang dilakukan kompresor untuk mengubah tekanan refrigeran adalah

$$Q_w = m(h_2 - h_1) \tag{3.1}$$

Sedangkan besarnya usaha kompresi massa refrigeran adalah

$$q_w = h_2 - h_1 \quad (3.2)$$

Di mana,

$Q_w$  = Daya atau kerja kompresor yang dilakukan (kW)

$h_1$  = Entalpi refrigeran saat masuk kompresor (kJ/kg)

$h_2$  = Entalpi refrigeran saat keluar kompresor (kJ/kg)

$m'$  = Laju aliran refrigeran pada sistem (kg/s)

$q_w$  = Besarnya kerja kompresor yang dilakukan (kJ/kg)

## 2. Kondensasi

Besarnya kalor yang dibuang di kondensor adalah

$$Q_c = m'(h_2 - h_3) \quad (3.3)$$

Di mana,

$Q_c$  = Besarnya kalor yang dibuang di kondensor (kW)

$h_2$  = Entalpi refrigeran saat masuk kompresor (kJ/kg)

$h_3$  = Entalpi refrigeran saat keluar kompresor (kJ/kg)

$m'$  = Laju aliran refrigeran pada sistem (kg/s)

## 3. Ekspansi

Ekspansi terjadi pada pipa kapiler. Pada proses ekspansi tidak terjadi proses penerimaan atau pelepasan energi (entalpi konstan).

$$h_3 = h_4 \quad (3.4)$$

Di mana,

$h_3$  = Entalpi refrigeran saat masuk kompresor (kJ/kg)

$h_4$  = Entalpi refrigeran saat keluar kompresor (kJ/kg)

#### 4. Evaporasi

Besarnya kalor yang diserap di evaporator adalah

$$Q_e = m'(h_1 - h_4) \quad (3.5)$$

$$q_w = h_1 - h_4 \quad (3.6)$$

Di mana,

$Q_e$  = Kalor yang diserap di evaporator (kW)

$h_1$  = Entalpi refrigeran saat keluar kompresor (kJ/kg)

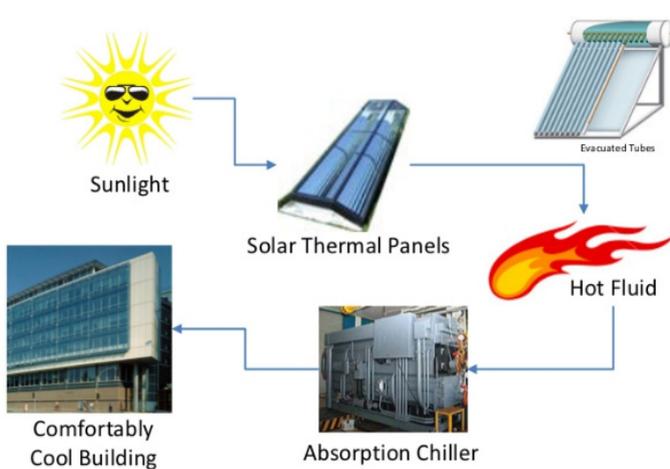
$h_4$  = Entalpi refrigeran saat masuk kompresor (kJ/kg)

$m'$  = Laju aliran refrigeran pada sistem (kg/s)

$q_w$  = Efek refrigerasi (kJ/kg)

### Sistem Kolektor Panas Matahari

Air dipanaskan oleh matahari melalui panel surya kemudian disuplai ke *absorption chiller*. Selanjutnya di dalam *absorption chiller* terdapat empat bagian, yaitu generator, kondensor, evaporator, dan absorber. Masing-masing mempunyai fungsi yang berbeda-beda.

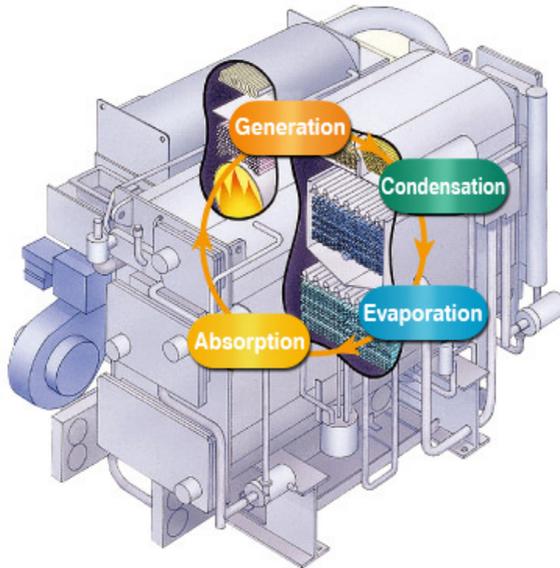


Gambar 3.5. Siklus Pendingin Ruangan Tenaga Matahari Dengan Kolektor Panas Matahari  
 Sumber : [33]

Air panas dialirkan ke generator yang di dalamnya akan bercampur dengan zat penyerap. Uap dari air panas masuk ke kondensator, sedangkan campuran air dan zat penyerap yang menjadi larutan pekat masuk ke absorber melalui katup ekspansi. Katup ini berfungsi untuk menjaga tekanan yang berada pada generator dan absorber.

Uap panas di kondensator diembunkan dengan melepas panas ke lingkungan. Perbedaan temperatur mengubah fase dari gas menjadi cair. Air tersebut dialirkan menuju evaporator melalui katup ekspansi. Ketika melewati katup tersebut tekanan perlahan turun menyesuaikan kondisi di evaporator.

Pada evaporator terjadi proses pendinginan di mana kalor diserap oleh larutan air dan zat penyerap yang berada di absorber. Kemudian terjadi penguapan, uap dingin yang dihasilkan dilepaskan menuju ruangan. Penyerapan berlangsung terus-menerus dengan menjaga temperatur absorber dengan *heat exchanger*.



Gambar 3.6. Mesin Pendingin Absorpsi  
 Sumber : [36]

Ada dua pasang campuran zat penyerap yang banyak digunakan. Pasangan air/litium bromida ( $H_2O/LiBr$ ), air sebagai pendingin dan litium bromide sebagai penyerap. Pasangan ammonia/air ( $NH_3/H_2O$ ), ammonia sebagai pendingin dan air sebagai penyerap.

### Koefisien Kinerja

Sistem pendingin bertenaga matahari ini menggunakan hukum termodinamika pertama yang menyatakan energi masuk sama dengan energi keluar.

$$heat\ supply + heat\ rejected = net\ work\ done \quad (3.7)$$

Pada siklus pendingin *carnot*,

$$q_1 - q_2 = -w$$

$$q_1 = q_2$$

$$q_2 = q_1 + w \tag{3.8}$$

di mana,

$q_1$  = panas yang disuplai dari lingkungan (kg)

$q_2$  = panas yang dibuang (kg)

$w$  = hasil kerja sistem

Koefisien kinerja (COP) merupakan indeks kinerja siklus termodinamika. Koefisien kinerja bernilai lebih besar dari satu yang digunakan sebagai pengganti efisiensi termal. Koefisien kinerja dapat dicari dengan persamaan berikut [37]:

$$\begin{aligned} COP &= \frac{\text{efek refrigerasi}}{\text{energi yang diberikan}} \\ &= q_1/W \end{aligned} \tag{3.9}$$

dari (3.2) didapatkan,

$$COP = \frac{q_1}{q_2 - q_1} \tag{3.10}$$

Pada kondisi tersebut COP didefinisikan sebagai jumlah efek refrigerasi dan panas buang terhadap kerja masukan.

$$COP = \frac{|q_1 + q_2|}{w} \quad (3.11)$$

### 3.1 Menghitung Kebutuhan Pendingin Ruangan

Kapasitas pendingin ruangan dinyatakan dalam satuan Kcal/hour atau BTU/hour. Sistem ini menggunakan Hukum Termodinamika dua yang berbunyi panas akan mengalir secara alamiah dari temperatur yang lebih tinggi ke temperatur yang lebih rendah.

Besar arus panas secara konduksi dapat dihitung dengan rumus:

$$Q = \lambda \times \frac{A}{l} \times \Delta T \quad (3.12)$$

di mana,

$\lambda$  = Koefisien daya hantar material

$l$  = Ketebalan material

$A$  = Luas permukaan

$\Delta T$  = Perbedaan temperatur

Dinding ruangan: Konduksi + Konveksi

$$Q' = \frac{A \times \Delta T}{\frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h}} \quad (3.13)$$

di mana,

$Q'$  = Arus perpindahan panas

$A$  = Luas dinding

$d$  = Tebal dinding

$\lambda$  = Koefisien daya hantar panas material dinding

$h$  = Koefisien daya hantar panas udara

## Kelebihan Pendingin Tenaga Matahari

Kelebihan pendingin tenaga matahari dibandingkan pendingin ruangan konvensional adalah:

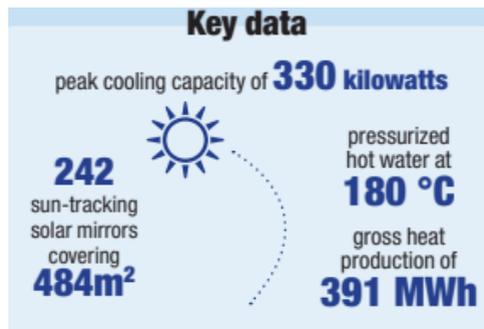
1. Kapasitas pendingin meningkat sebanding dengan radiasi matahari
2. Energi matahari digunakan untuk mengurangi konsumsi energi primer
3. Mengurangi dampak dari efek rumah kaca
4. Menghemat *energy cost*

## Pengaplikasian Pendingin Ruangan

Ada beberapa negara yang sudah mengaplikasikan pendingin ruangan untuk penggunaan pada bangunan seperti sekolah dan perkantoran.

### 1. Afrika

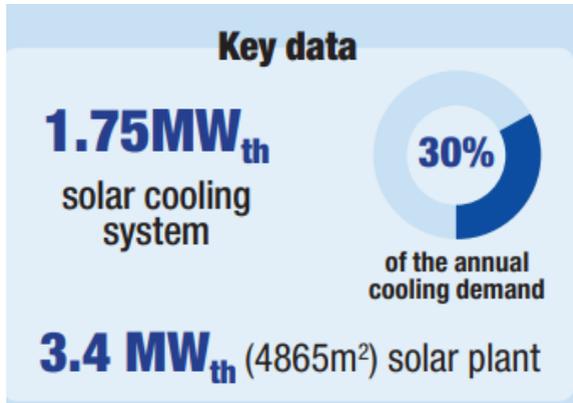
Salah satu perusahaan telekomunikasi di Afrika Selatan tepatnya di Johannesburg menggunakan pendingin tenaga surya untuk mendinginkan peralatan teknologi informasi seperti komputer, telepon, printer, dll. Pada tahun 2014 dipasang 242 *sun-tracking solar mirrors* pada lahan seluas 484m<sup>2</sup>. Kaca-kaca yang terpasang dibuat otomatis untuk *self-cleaning*. Daya yang tertampung dapat menghidupkan *two-stage absorptionchiller*.



Gambar 3.7. Data dari pendingin tenaga surya di Johannesburg  
Sumber : Global Solar Water Heating Project

## 2. Amerika Serikat

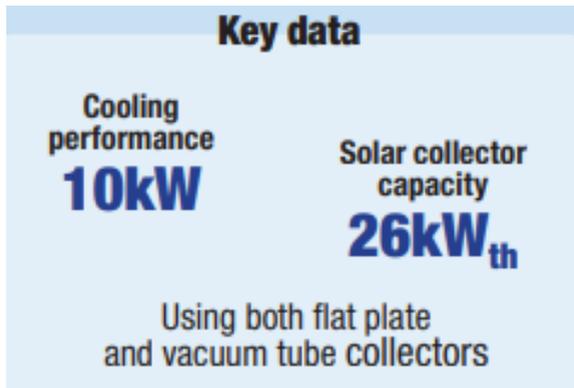
Salah satu sekolah di Arizona, USA yang bernama *North High School*. Pendingin tenaga surya mulai dipasang pada tahun 2014. Penggunaan pendingin tenaga surya dapat mensuplai 30% kebutuhan pendingin ruangan di sekolah tersebut dengan memanfaatkan 100% energi surya pada musim panas.



Gambar 3.8. Data pendingin tenaga surya di Arizona  
Sumber : Global Solar Water Heating Project

## 3. Eropa

Gedung perkantoran di Kordin, Malta, mulai menggunakan pendingin tenaga surya sejak tahun 2008. Sistem ini menggunakan kolektor pelat datar dengan luas 30,5m<sup>2</sup> dan kolektor tabung vakum dengan luas 7m<sup>2</sup>.



Gambar 3.9. Data pendingin tenaga surya di Kordin  
Sumber: Global Solar Water Heating Project

#### 4. Indonesia

Universitas Indonesia tepatnya di gedung Pusat Penelitian Mekanikal menjadi pelopor di Indonesia yang menggunakan pendingin tenaga surya [38]. Sistem pendingin tenaga surya ini menggunakan tipe *single-double effect absorption chiller* dengan kapasitas pendinginan hingga 239kW. Pengaturan temperatur ruangan yang sejuk pada 25°C.

#### Contoh Latihan

1. Suatu ruangan di lantai 2 dari bangunan 4 lantai. Ukuran ruangan tersebut 3m x 3m x 3m dengan dinding setebal 20cm dari bata ( $\lambda = 0,8 \text{ W/m K}$ ), lantai dan langit-langit tebal 60cm cor beton ( $\lambda = 2,1 \text{ W/m K}$ ) dan sebuah pintu kayu ( $\lambda = 0,12 \text{ W/m K}$ ) setebal 5cm ukuran 1m x 2m, dihuni dua orang yang mengeluarkan panas sebanyak 120W perorang, akan dipasang pendingin ruangan dengan temperatur 20°C. Berapa kebutuhan BTU/h dengan asumsi temperatur dinding luar kamar 30°C, koefisien udara dalam ruang tertutup adalah 7,7 W/m<sup>2</sup> K ?

Jawab:

Pintu kayu

$$\begin{aligned} A &= 2m^2 & d &= 0,05m \\ \Delta T &= 10C & \lambda &= 0,12 W/m K \\ h &= 7,7 W/m^2 K \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q' &= \frac{A \cdot \Delta T}{\frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h}} \\ &= \frac{2m^2 \cdot 10^\circ C}{\frac{0,05m}{0,12 W/m K} + \frac{1}{7,7 W/m^2 K}} \\ &= 36,5965W \end{aligned}$$

Dinding

$$\begin{aligned} A &= 34m^2 & d &= 0,2m \\ \Delta T &= 10C & \lambda &= 0,8 W/m K \\ h &= 7,7 W/m^2 K \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q' &= \frac{A \cdot \Delta T}{\frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h}} \\ &= \frac{34m^2 \cdot 10^\circ C}{\frac{0,2m}{0,8 W/m K} + \frac{1}{7,7 W/m^2 K}} \\ &= 895,208W \end{aligned}$$

Lantai dan langit-langit

$$\begin{aligned} A &= 18m^2 & d &= 0,6m \\ \Delta T &= 10C & \lambda &= 2,1 W/m K \\ h &= 7,7 W/m^2 K \end{aligned}$$

$$Q' = \frac{A \cdot \Delta T}{\frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h}}$$

Penghuni kamar = 2 orang x 120W = 240W

Q (pendingin ruangan) =  $\Sigma Q'$

= 36,5965W + 895,208W + 433,125W + 240W

= 1604,9295W = 5476 BTU/h

1 Watt = 3,412 BTU/h

2. Di antara dua sistem yang digunakan pada pendingin ruangan tenaga surya, yang manakah yang paling baik diaplikasikan saat ini?

Jawab:

Pada jurnal *Energy and Economic Performance of Solar Cooling System*[30] dikemukakan beberapa pendapat para peneliti:

Hartmann dkk. mengatakan bahwa perbandingan antara kolektor panas matahari dengan fotovoltaik adalah kolektor panas matahari membutuhkan enam kali lebih besar dari pada penyimpanan fotovoltaik untuk dapat menghemat energi primer sama besar.

Beccali dkk. membandingkan energi dan performa dari tipe panas surya dan fotovoltaik menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) menghasilkan tipe fotovoltaik dengan performa yang paling baik.

## Kesimpulan

Matahari memancarkan cahaya dan panas yang dapat dimanfaatkan menjadi energi alternatif. Energi alternatif ini aman untuk lingkungan. Salah satu contoh pemanfaatan energi matahari adalah pendingin ruangan tenaga surya. Ada dua metode yang dapat digunakan, yaitu menggunakan sistem fotovoltaik atau sistem panas surya.

Sistem fotovoltaik bekerja dengan memanfaatkan cahaya matahari lalu mengubahnya menjadi energi listrik yang kemudian akan disuplai untuk menggerakkan mesin pendingin kompresi uap. Hasil uap dingin akan didistribusikan ke ruangan-ruangan. Sedangkan, sistem panas surya bekerja dengan memanaskan air yang kemudian ditransfer ke mesin pendingin absorpsi. Lalu di dalamnya terjadi pencampuran zat pendingin dengan zat penyerap yang menghasilkan uap dingin untuk didistribusikan ke ruangan-ruangan.

Terdapat dua zat penyerap yang banyak digunakan. Pasangan air/litium bromida ( $H_2O/LiBr$ ), air sebagai pendingin dan litium bromide sebagai penyerap. Pasangan amonia/air ( $NH_3/H_2O$ ), ammonia sebagai pendingin dan air sebagai penyerap.

Sudah banyak negara yang mengaplikasikan pendingin tenaga surya salah satunya Indonesia. Universitas Indonesia menggunakan pendingin tenaga surya untuk ruangan yang berada di gedung Pusat Penelitian Mekanikal. Selain Indonesia juga ada negara lainnya seperti Malta, Afrika Selatan, dan USA.

## Soal

1. Jelaskan cara kerja pendingin ruangan bertenaga matahari!
2. Apa sajakah komponen yang digunakan pada pendingin ruangan bertenaga matahari dan apakah fungsinya?
3. Jelaskan mengapa Indonesia cocok untuk menerapkan teknologi ini!
4. Apa perbedaan sistem ini dengan sistem pendingin ruangan yang konvensional?
5. Rancanglah sebuah pendingin ruangan bertenaga matahari untuk ruangan kerja yang digunakan oleh lima orang pekerja! Ruangan tersebut menggunakan pintu aluminium dan ruangan tersebut berada di lantai basement. Ukuran ruangan 5 x 3 dengan tinggi 4 meter.

# BAB 4

## SOLAR WATER HEATER

### Pendahuluan

Jumlah energi fosil di bumi sangat terbatas, sedangkan perkembangan teknologi yang sangat cepat membutuhkan penggunaan energi dalam jumlah besar. Tercatat, pada tahun 2015 penggunaan energi fosil di dunia sebesar 79,676 % [39], harus ada energi alternatif atau terbarukan untuk mengurangi penggunaan energi fosil yang terbatas jumlahnya. Pada tahun 2011 penggunaan energi terbarukan dunia hanya 17,21 %, pada tahun 2015 meningkat menjadi 18,054 % [39]. Salah satu energi yang bisa dimanfaatkan adalah energi surya atau matahari. Banyak alat yang memanfaatkan energi surya; salah satunya *solar water heater* [40].

*Solar water heater* pertama dipatenkan oleh Clarence M. Kemp pada tahun 1891 [41], *solar water heater* adalah alat yang memanfaatkan energi matahari untuk memanaskan air [42]. Di Indonesia sendiri sudah banyak yang memakai *solar water heater* karena Indonesia memiliki iklim tropis dan cocok untuk penggunaan alat yang memanfaatkan energi surya [43].

### Klasifikasi

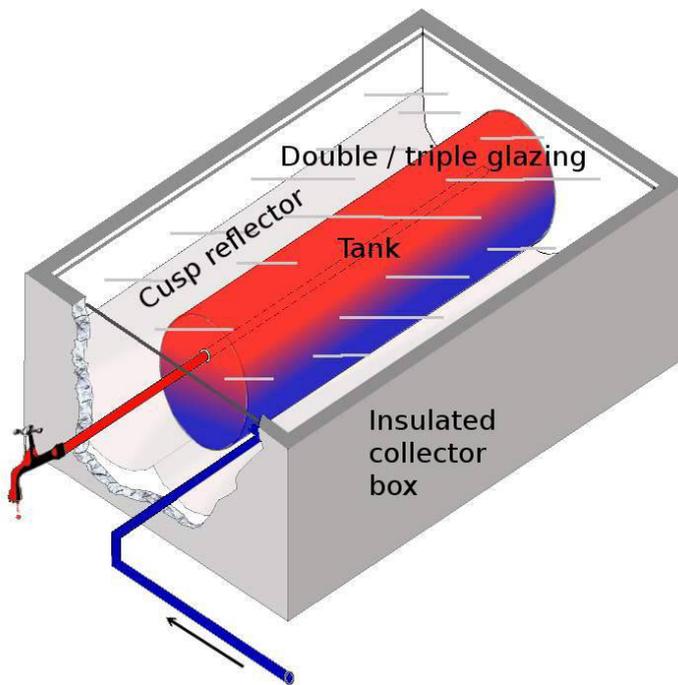
*Solar water heater* diklasifikasikan menjadi tiga [44], yaitu:

### Tipe Kolektor

Berdasarkan tipenya, kolektor *solar water heater* terbagi menjadi lima bagian [45], yaitu:

## Tipe Tangki Kolektor

Tipe ini menggunakan tangki sebagai kolektor panas, di mana tangki dipasang di kotak isolasi dengan kaca dan diberi cat warna hitam. Radiasi matahari masuk melalui kaca dan mengenai tangki hitam dan menghangatkan tangki tersebut. Material tangki yang digunakan biasanya baja, sedangkan yang berbentuk tabung menggunakan tembaga. Temperatur yang dapat dicapai pada model ini lebih kecil daripada model plat datar [45].



Gambar 4.1. Kolektor tipe tangki  
Sumber: [46]

## ***Pool Collector***

Tipe kolektor ini digunakan untuk memanaskan kolam renang, pengembangan jenis kolektor telah dikembangkan untuk memanaskan kolam renang pada musim dingin: terbuat dari plastik *copolymer* khusus tanpa galsir. Jenis ini tidak tahan terhadap kondisi beku, jenis ini beroperasi maksimum  $10^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}$  di atas temperatur sekitar [45].

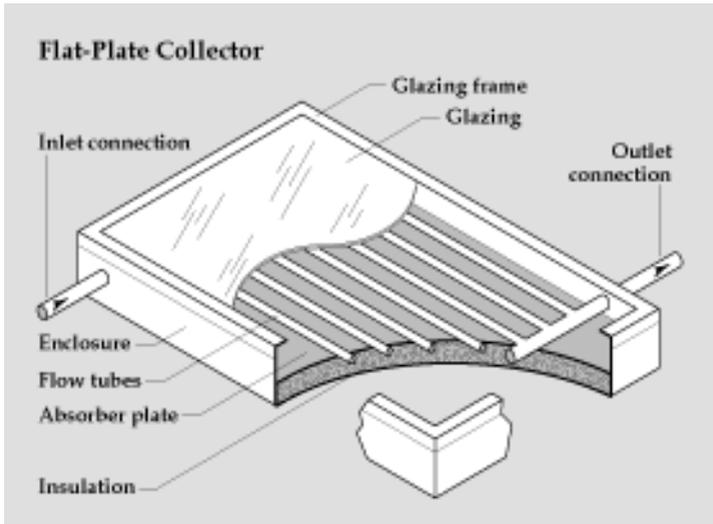


*Gambar 4.2. Kolektor kolam renang  
Sumber: [20]*

## **Kolektor Plat Datar**

Kolektor plat datar adalah jenis kolektor yang paling banyak digunakan untuk *solar water heater*, kolektor jenis ini memiliki rata-rata suhu air keluaran sampai  $75^{\circ}\text{C}$ . Kolektor ini memiliki dua tipe fluida kerja, yaitu udara dan air. Kolektor ini tergolong memiliki koefisien kehilangan panas yang tinggi (*heat loss*)

karena itu jenis ini kurang efisien digunakan di atas suhu 80 °C, ketika suhu yang tinggi diinginkan maka nilai *heat loss* harus diminimalkan [45].

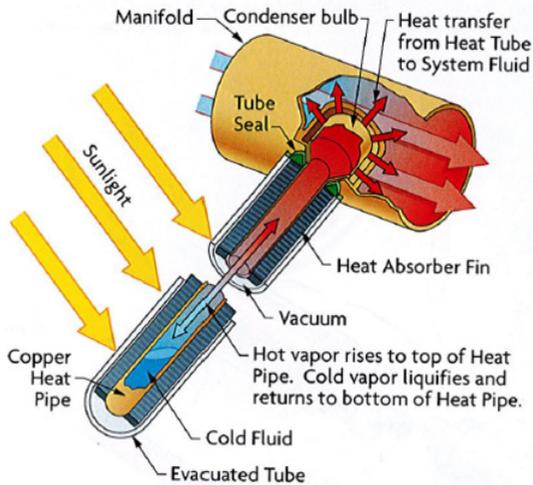


Gambar 4.3. Flat plate collector

Sumber: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flat\\_plate\\_glazed\\_collector.gif](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flat_plate_glazed_collector.gif)

## Kolektor Tabung Vakum

Kolektor ini berbeda dengan jenis kolektor yang lain yang hanya *brand*-nya yang berbeda, tapi kolektor jenis ini sangat bervariasi dalam konstruksi dan operasinya. Kolektor ini dibuat dari sejumlah tabung gelas, setiap tabung terbuat dari *annealed glass* (kaca anil) yang memiliki plat penyerap di dalam tabungnya. Demi mengurangi *heat loss* maka dibuat ruang hampa udara (vakum). Insulasi yang baik dihasilkan oleh ruang vakum di dalam tabung kolektor. Untuk meningkatkan efisiensi kolektor dilakukan dengan mengubah radius cekungan tabung kolektor [45].



Gambar 4.4. Evacuated tube collector

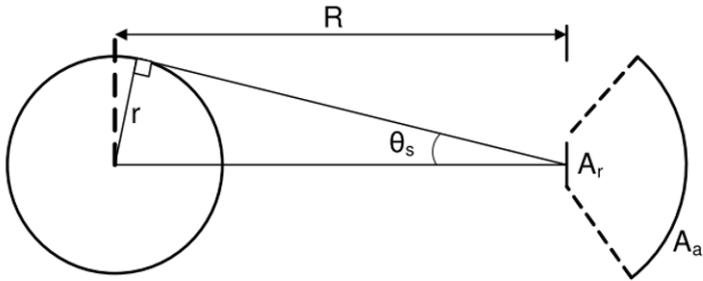
Sumber: <https://hydrosolar.ca/blogs/news/how-do-vacuum-tubes-collector-work>

## Kolektor Terkonsentrasi

Kolektor terkonsentrasi merupakan kolektor yang memanfaatkan permukaan parabola reflektif untuk memantulkan energi surya ke titik fokus tempat penyerap energi berada. Reflektor harus bisa melacak matahari agar dapat bekerja secara efektif; kolektor jenis ini juga dapat mencapai temperatur  $150^{\circ}\text{C} - 500^{\circ}\text{C}$  pada fluida kerjanya. Untuk menentukan rasio konsentrasi geometris adalah:

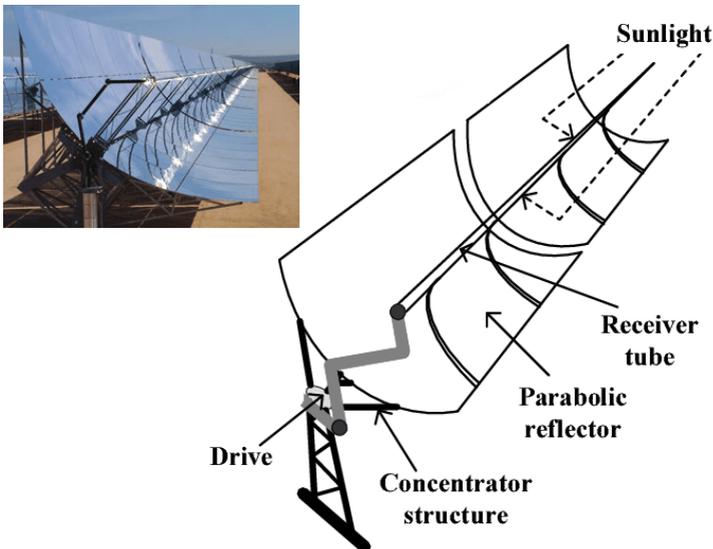
$$C = \frac{A_a}{A_r} = \frac{R^2}{r^2} = \frac{1}{\sin^2 \theta_s} \quad (1)$$

Dari persamaan (1) diketahui  $C$  adalah rasio konsentrasi,  $A_a$  adalah luas permukaan bukaan ( $\text{m}^2$ ),  $A_r$  adalah luas permukaan area penyerap ( $\text{m}^2$ ),  $R$  adalah jarak dari matahari ke konsentrator (m),  $r$  adalah radius matahari (m), dan  $\theta_s$  adalah setengah dari sudut di bawah matahari ( $^{\circ}$ ).



Gambar 4.5. Skema matahari pada jarak  $R$  dari konsentrator [45]

Rasio ini memiliki batas atas tergantung pada konsentratornya apakah tiga dimensi (lingkaran) seperti bentuk parabola atau dua dimensi (linier) seperti konsentrator parabola silinder. Dengan demikian, rasio maksimum konsentrator tiga dimensi adalah 45 dan untuk yang dua dimensi adalah 212 [45].

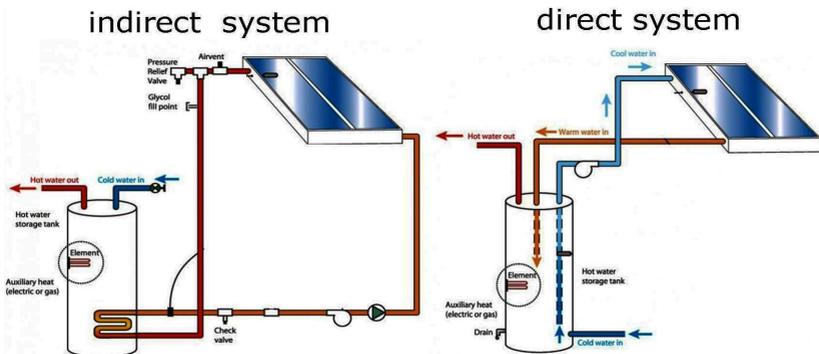


Gambar 4.6. Concentrating collector

Sumber: <https://www.yourelectricalguide.com/2018/07/concentrating-solar-collector-types-power-plants-advantages-disadvantages.html>

## Direct and Indirect systems

Berdasarkan sistemnya, *solar water heater* terbagi menjadi dua, yaitu: pemanasan langsung di kolektor (*direct system*), dan secara tidak langsung dengan menggunakan prinsip *heat exchanger* di mana fluida yang melewati kolektornya bukan fluida yang digunakan [47].

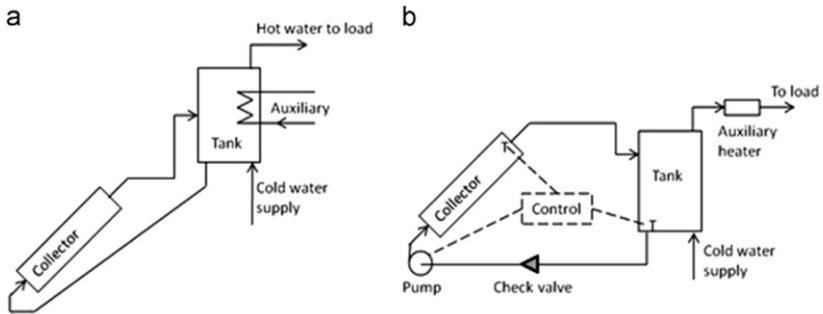


Gambar 4.7. Skema indirect system & direct system

Sumber: <https://knoxvilleplumbing.com/solar-water-heaters/>

## Active and Passive Systems

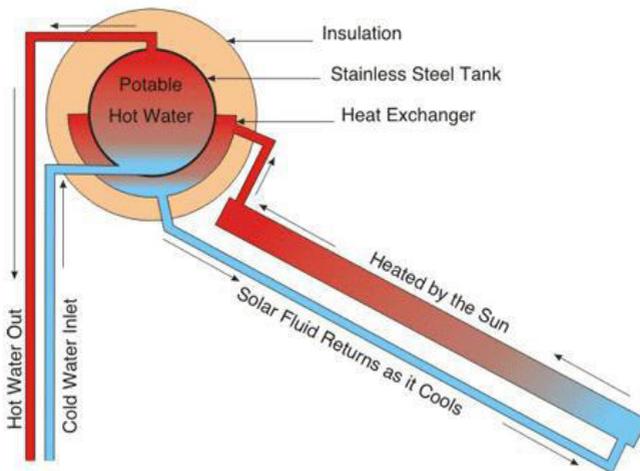
Berdasarkan konfigurasi dasar, *solar water heater* terbagi menjadi dua: sistem aktif dan sistem pasif. Sistem aktif menggunakan pompa listrik, pengontrol dan katup untuk mengalirkan fluida, sedangkan sistem pasif mengalami sirkulasi alami pada fluida dikarenakan perbedaan densitas yang dapat memasok air panas pada suhu 60°C. Kelebihan sistem aktif adalah efisiensinya yang relatif tinggi antara 35% dan 80% sedangkan sistem pasif kisaran 30% dan 50%, sedangkan kekurangannya adalah sifatnya rumit yang bergantung pada listrik dan dibutuhkan orang yang berpengalaman dalam perawatannya sehingga menyebabkan biaya operasional lebih tinggi daripada sistem pasif [44]



Gambar 4.8.. Skema sistem pasif dan aktif solar water heater [44]

## Prinsip Kerja

Prinsip kerja *solar water heater* adalah sebagai berikut. Air dipanaskan menggunakan energi surya yang diserap oleh kolektor, fluida yang temperaturnya lebih tinggi akan naik ke atas, sedangkan fluida yang temperaturnya lebih rendah akan turun ke bawah; ini dikarenakan perbedaan berat jenis fluida. *Storage system* dapat dipasang seri – paralel untuk mendapatkan fluida panas yang lebih tinggi [48].



Gambar 4.8. Prinsip kerja indirect system solar water heater

Sumber: [http://www.energyinmotion.co.za/extraimages/solar\\_heater\\_6.jpg](http://www.energyinmotion.co.za/extraimages/solar_heater_6.jpg)

## Keuntungan dan Kerugian

Tabel 4.1. menunjukkan keuntungan dan kerugian dari penggunaan *solar water heater* [49]:

Tabel 4.1. Keuntungan dan kerugian solar water heater

<b>Keuntungan</b>	<b>Kerugian</b>
Menggunakan energi surya ( <i>free energy</i> ).	Biaya awal ( <i>installasi</i> ) yang relatif tinggi.
Mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil.	Sebagian besar wilayah yang memiliki musim dingin membutuhkan cadangan listrik, gas, atau bahan bakar lainnya.
Biaya semakin hemat jika dipasang di tempat yang cerah dan memiliki insulasi tinggi.	Efisiensi relatif rendah untuk solar water heater pasif.
Periode <i>payback</i> yang relatif bagus, yang memiliki rata-rata 5 – 10 tahun.	Waktu <i>payback</i> sangat bervariasi dikarenakan kondisi matahari regional.
Biaya perawatan rendah.	Membutuhkan perlindungan dari temperatur panas yang tinggi ( <i>overheating</i> ) dan temperatur pembekuan.

Sumber: [49]

## Model Matematika

Performa *solar water heater* dipengaruhi oleh kolektor surya, *heat exchanger* atau tangki fluida, yang akan dijelaskan berikut [44].

### Kesetimbangan Energi pada Kolektor Surya

Setiap sistem panas surya kesetimbangan energi keseluruhan pada kolektor surya dapat diturunkan sebagai [50]

$$Q_u = Q_i - Q_l \quad (2)$$

Dari persamaan (2) diketahui bahwa  $Q_u$  adalah energi persatuan waktu yang berguna (W),  $Q_i$  adalah energi persatuan

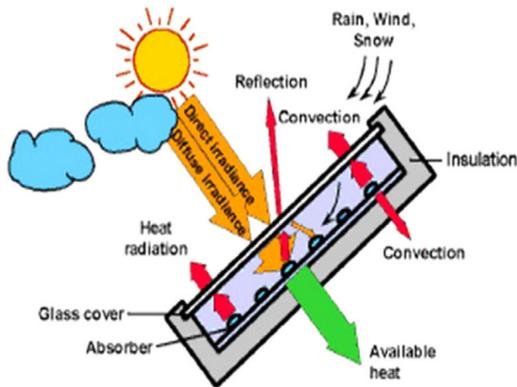
waktu yang keluar ( $W$ ) dan  $Q_i$  adalah energi persatuan waktu yang masuk ( $W$ ).

Energi yang dapat diserap oleh solar kolektor bergantung pada penutup dan material penyerapnya, dapat ditunjukkan sebagai [50].

$$Q_i = A_c I \tau \alpha \tag{3}$$

Dari persamaan (3) diketahui  $A_c$  adalah luas area kolektor ( $m^2$ ),  $I$  adalah total radiasi matahari yang diterima kolektor ( $W/m^2$ ),  $\tau$  adalah *transmittance* dan  $\alpha$  adalah *absorptivity*.

Bagian dari  $Q_i$  akan terpantul kembali, dalam kasus plat kolektor datar, panas biasanya diasumsikan keluar melalui penutup atas, samping dan bawah kolektor [50].



Gambar 4.9. Keseimbangan energi kolektor surya [44]

Persamaan:

$$Q_l = Q_{l,top} + Q_{l,back} + Q_{l,edge} = A_c U_{l,top} (T_c - T_a) + A_c U_{l,back} (T_c - T_a) + A_c U_{l,edge} (T_c - T_a) = A_c (U_{l,top} + U_{l,back} + U_{l,edge}) (T_c - T_a) = A_c U_l (T_c - T_a) \quad (4)$$

$$U_{l,edge} = \frac{\lambda_{edge} A_{edge}}{\delta_{edge} A_c} \quad (5)$$

Dari persamaan (4) dan (5) diketahui bahwa  $U_l$  adalah koefisien *heat loss* (W/(m<sup>2</sup> K)),  $T_c$  adalah temperatur kolektor (°C),  $T_a$  adalah temperatur lingkungan (°C),  $\lambda_{edge}$  adalah konduktivitas panas tepi kolektor (W/(m<sup>2</sup> K)),  $\delta_{edge}$  adalah ketebalan tepi kolektor (m) dan  $A_{edge}$  adalah luas permukaan tepi kolektor (m<sup>2</sup>).

Dengan demikian, energi yang dimanfaatkan yang dikumpulkan oleh kolektor seluas  $A_c$  dapat dinyatakan sebagai,

$$Q_u = A_c (I\tau\alpha - U_l (T_c - T_a)) \quad (6)$$

Sulit untuk mengukur temperatur plat rata-rata pada  $T_c$ . Persamaan (6) dapat digunakan untuk mencari energi yang berguna ( $Q_u$ ) menggunakan temperatur fluida saluran masuk kolektor ( $T_{fi}$ ) dengan menggunakan faktor penghilang panas ( $F_R$ ).  $F_R$  adalah rasio panas yang dikirim fluida kerja ke kondisi panas suhu terpadu kolektor sama dengan temperatur fluida masuk. Persamaan (7) juga dikenal dengan Hottel-Whillier-Bliss (WHB) [44].

$$Q_u = A_c F_R (I \tau \alpha - U_l (T_c - T_a)) \quad (7)$$

$$Q_u = C_p \dot{m} (T_{fo} - T_{fi}) \quad (8)$$

$$F_R = \frac{C_p \dot{m} (T_{fo} - T_{fi})}{A_c (I \tau \alpha - U_l (T_{fi} - T_a))} \quad (9)$$

Dari persamaan (7), (8), dan (9) diketahui bahwa  $F_R$  adalah faktor panas yang keluar dari kolektor,  $C_p$  adalah kapasitas panas (J/(kg. K)), adalah laju alir massa (kg/s),  $T_{fo}$  adalah temperatur fluida keluar kolektor (°C) dan  $T_{fi}$  adalah temperatur fluida masuk kolektor (°C).

Efisiensi kolektor adalah rasio energi berguna yang dikirimkan oleh kolektor ke radiasi matahari pada kolektor selama waktu tertentu, dapat dinyatakan sebagai [50],

$$\eta = \frac{\int Q_u dt}{A_c \int I dt} \quad (10)$$

Persamaan (10) dapat disederhanakan sebagai berikut [44],

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c I} = \frac{I \tau \alpha - U_l (T_c - T_a)}{I} = \tau \alpha - U_l \frac{T_c - T_a}{I} = F_R \tau \alpha - F_R U_l \frac{T_{fi} - T_a}{I} \quad (11)$$

Efisiensi kolektor dapat bervariasi dengan temperatur operasi dapat linier dan nonlinier tergantung karakteristik dari kolektor [44],

$$\eta = \eta_o - U_l \frac{T_c - T_a}{I}, \text{ untuk pendekatan linier} \quad (12)$$

$$\eta = \eta_o - U_{l1} \frac{T_c - T_a}{I} - U_{l2} \frac{(T_c - T_a)^2}{I}, \text{ untuk pendekatan nonlinier} \quad (13)$$

Dari persamaan (13) diketahui bahwa adalah efisiensi (%), adalah efisiensi *optical*, dan adalah *heat loss* koefisien bergantung temperatur.

### Kesetimbangan Energi pada Penyimpan Air

Fluida di tangki penyimpanan temperaturnya merata, laju perubahan energi ditangki, dapat dinyatakan sebagai berikut [44],

$$C_{ptk} m_{tk} \frac{dT_{tk}}{dt} = Q_u - Q_L - Q_{I,tk} \quad (14)$$

$Q_L$  adalah beban yang ditentukan dari sistem.

$$Q_L = UA_L(T_r - T_a), \text{ untuk ruang pemanas} \quad (15)$$

$$Q_L = C_p \dot{m}_w (T_r - T_w), \text{ untuk pemanas air} \quad (16)$$

$Q_{I,tk}$  adalah panas yang keluar dari tangki, dituliskan sebagai,

$$Q_{I,tk} = UA_{tk}(T_{tk} - T_a) \quad (17)$$

Dari persamaan (14), (15), (16), dan (17) diketahui  $A_L$  adalah luas area beban ( $m^2$ ),  $Q_L$  adalah energi persatuan waktu beban panas (W),  $Q_{I,tk}$  adalah energi persatuan waktu yang keluar di tangki (W),  $C_{ptk}$  adalah kapasitas panas fluida di tangki (J/(kg K)),  $m_{tk}$  adalah massa fluida di tangki (kg),  $T_{tk}$  adalah temperatur fluida di tangki ( $^{\circ}C$ ),  $T_r$  adalah temperatur yang dibutuhkan ( $^{\circ}C$ ),  $T_w$  adalah temperatur fluida ( $^{\circ}C$ ),  $t$  adalah waktu (s).

Panas keluar (*heat loss*) juga dapat terjadi pada saat distribusi air di pipa. Jika tangki fluida tidak sepenuhnya temperaturnya merata (sistem pasif), tangki dapat dibuat membagi fluida menjadi beberapa lapisan dan membuat persamaan kesetimbangan energi untuk setiap lapisan [44].

Hasilnya, temperatur fluida yang di tangki sama dengan temperatur fluida kolektor, tangki dan beban dapat diturunkan dengan mengintegrasikan persamaan (14),

$$T'_{tk} = T_{tk} + \frac{dt}{c_{ptk}m_{tk}} (Q_u - Q_L - Q_{I,tk}) \quad (18)$$

Nilai awal  $T_{tk}$ , temperatur fluida pada akhir  $dt$  dapat dihitung menggunakan persamaan (18). Dengan demikian energi yang berguna sepanjang hari dapat memenuhi permintaan dengan berbagai parameter desain (kapasitas tangki, luas kolektor, dan lainnya) [44].

### **Faktor yang Mempengaruhi Performa *Solar Water Heater***

Performa *solar water heater* biasanya dipengaruhi iklim, desain, dan pemasangan serta *maintenance* dari pengguna. Kondisi iklim berperan penting menentukan sudut kemiringan kolektor dan banyaknya insolasi yang akan dipasang agar *solar water heater* bekerja optimal [51].

Desain sistem (area kolektor, tipe fluida, laju aliran massa kolektor, volume, dan tinggi tangki penyimpanan, efektivitas *heat exchanger*, ukuran dan panjang pipa, bahan kolektor penyerap dan ketebalan, jarak tangki ke plat kolektor, itu semua harus diperhitungkan ketika merancang, merencanakan, dan membangun *solar water heater*[52]

Tabel 4.2. Data material pembuatan solar water heater

<b>Tahapan</b>	<b>Material</b>	<b>Jumlah</b>
Kolektor	<i>Aluminium (rangka)</i>	1,80 kg
	<i>Baja (perpipaan)</i>	4,14 kg
	<i>Tembaga (penyeimbang)</i>	2,82 kg
	<i>Tempered glass (kolektor)</i>	22,5 kg
	<i>Polyurethane foam (isolator)</i>	2,43 kg
	<i>Propylene glycol (heat exchanger)</i>	1,19 kg
	<i>Air (produk)</i>	9,40 kg
	<i>Baja (tabung penukar panas)</i>	15,23 kg
	<i>Baja (pompa penukar panas)</i>	3,00 kg
	<i>Listrik untuk berjalannya sistem</i>	4,18 MJ
Tangki penyimpanan	<i>Baja (tangki)</i>	79,00 kg
	<i>Baja (perpipaan)</i>	7,64 kg
	<i>Perunggu (katup)</i>	0,24 kg
	<i>Besi (katup)</i>	0,01 kg
	<i>Polyurethane foam (isolator)</i>	2,83 kg
	<i>Listrik untuk elemen pemanas</i>	509,50 MJ
	<i>Listrik untuk pompa penukar panas</i>	5.400 MJ
Operasi & perawatan	<i>Propylene glycol</i>	4,76 kg

Sumber: [53]

## Perkembangan Teknologi *Solar Water Heater*

Sejak *solar water heater* pertama dikembangkan, penelitian untuk meningkatkan efisiensi masih terus berlanjut hingga sekarang. Meskipun teknologinya secara teknis telah matang dalam hal efisiensi dan ekonomi, tetapi sejumlah peneliti masih terus meningkatkan perkembangan *solar water heater* [44]. Sejumlah peneliti melakukan riset pada aspek: struktur terintegrasi dan tata letak komponen-komponen, simulasi kerja termal dan analisis secara teoritis, pengukuran berbasis laboratorium, evaluasi kinerja melalui pengukuran nyata, penghematan energi yang menilai kinerja ekonomi dan

lingkungan, serta bagaimana strategi pemasaran yang telah dikembangkan [44].

Kinerja jangka panjang solar termosifonik *solar water heater* diriset oleh Kalogirou dan Panteliou menggunakan metode jaringan saraf tiruan yang memiliki 30 sistem dan telah diuji dan dimodelkan sesuai dengan standar ISO 9459-2 di tiga lokasi yang berada di Yunani [44].

Diakoulaki melakukan riset tentang analisis biaya untuk mengevaluasi sistem *solar water heater* dengan teknologi konvensional yang kompetitif di Yunani. Hasilnya menunjukkan bahwa dalam kondisi Yunani, penggunaan *solar water heater* menghasilkan manfaat yang cukup besar dibandingkan penggunaan listrik dan diesel, tetapi penggunaan gas alam tidak dapat digantikan [44].

Sistem pompa kalor PV/T atau *loop heat pump* diperkenalkan oleh Zhang, untuk generasi air panas. Hasil dari penelitiannya yaitu: efisiensi penggunaan listrik, termal, dan keseluruhan modul masing-masing sekitar 10%, 40%, 50%; sedangkan COP (koefisien kinerja keseluruhan) adalah 8,7 [44].

### **Pengaplikasian *Solar Water Heater***

Sejak tahun 1960-an *solar water heater* telah banyak dipasang di atap bangunan. Dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan *solar water heater* telah banyak pengaplikasiannya seperti penggunaan untuk rumah-rumah atau apartemen dan lainnya, pemasangan *solar water heater evacuated tube* membantu mengurangi konsumsi pemanas sebesar 90% dibandingkan dengan model konvensional [44].



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.10. (a) Bangunan Brandaris dengan tipe *flat plate collector* dengan luas  $760 \text{ m}^2$  di Belanda pada tahun 1968, (b) Gedung dengan *solar water heater evacuated tube* terpasang di atap seluas  $23 \text{ m}^2$  Jerman tahun 2002, (c) Rumah dengan *solar water heater flat plate* terintegrasi seluas  $8,4 \text{ m}^2$  di Republik Ceko tahun 2003 [44].

### Contoh soal!

Sebuah *flat-plate collector* yang dialiri fluida berupa air memiliki panjang  $100 \text{ cm}$  dan lebar  $50 \text{ cm}$ , fluida masuk memiliki temperatur  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  dan keluar  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ , dan berkapasitas  $100 \text{ liter/menit}$ . Tentukan efisiensi kolektor jika total radiasi yang diterima kolektor sebesar  $850 \text{ kW/m}^2$ , dan abaikan faktor penghilang panas.

Diketahui:

$$T_{fi} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{fo} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$= 100 \text{ liter/menit} = 0,1 \text{ m}^3/\text{menit} = 1,666 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$I = 850 \text{ W/m}^2$$

$$p = 100 \text{ cm} = 1 \text{ m}$$

$$l = 50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m}$$

Jawab:

$$A_c = p l = (1 \text{ m})(0,5 \text{ m}) = 0,5 \text{ m}^2$$

Pada soal di atas berat jenis fluida tidak diketahui; maka untuk mencari  $Q_u$  persamaan (8) menjadi,

$$Q_u = C_p(\dot{V}\rho)(T_{fo} - T_{fi})$$

$$Q_u = \left(4180 \frac{\text{J}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}\right) \left(1,666 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (70 \text{ } ^\circ\text{C} - 30 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$Q_u = 278.555,2 \text{ W} = 278,555 \text{ kW}$$

Maka untuk mencari efisiensi kolektor digunakan persamaan (11) menjadi,

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c I} = \frac{(278,555 \text{ kW})}{(0,5 \text{ m}^2)(850 \text{ kW})}$$

$$\eta = 0,655 = 65,5\%$$

Efisiensi untuk tipe *flat plate collector* adalah sebesar 65,5%, dengan mengabaikan  $F_R$  atau faktor penghilang panas.

## Soal

1. Jelaskan kegunaan dan kerugian pemanas air tenaga matahari!
2. Apakah komponen yang digunakan untuk memanaskan air dengan tenaga matahari? Sebutkan fungsinya masing-masing.
3. Sistem apa sajakah yang digunakan dalam pemanasan air dengan menggunakan panas matahari? Jelaskan!
4. Apa sajakah yang memengaruhi kinerja pemanas air dengan menggunakan panas matahari?
5. Rancanglah sebuah pemanas air dengan menggunakan panas matahari apabila air yang akan dipanaskan  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  dengan pemakaian  $3\text{ m}^3/\text{hari}$ !

# BAB 5

## HEAT STORAGE

### Pendahuluan

Seiring berkembangnya peradaban manusia, penggunaan energi semakin meningkat. Di Indonesia, energi fosil khususnya minyak bumi sampai saat ini masih merupakan sumber energi utama bagi masyarakat untuk kegiatan sehari-hari. Akan tetapi, jumlah energi fosil di dunia terbatas sehingga tidak akan mungkin memenuhi kebutuhan energi terus-menerus [41]. Ketergantungan pada penggunaan minyak bumi dapat menimbulkan permasalahan yang cukup serius, antara lain emisi gas rumah kaca (terutama CO<sub>2</sub>) akibat pembakaran energi fosil. Oleh karena itu, pemanfaatan energi alternatif menjadi penting untuk mensubstitusi kebutuhan minyak bumi [54]. Energi terbarukan (*renewable energy*) dapat menjadi pilihan utama karena ketersediaannya yang terus ada hingga akhir zaman. Salah satu contoh sumber energi terbarukan yang memegang peranan penting adalah energi radiasi matahari.

Akan tetapi, ketersediaan sumber energi radiasi panas matahari dipengaruhi oleh waktu. Di sisi lain, kebutuhan tertinggi pemakaian energi matahari terjadi pada sore dan malam hari di mana sumber energi matahari tidak tersedia. Oleh karena itu, antara kebutuhan pemakaian dan sumber energi tidak ada kesesuaian waktu [55]. Metode yang digunakan untuk mengatasi hal tersebut adalah dengan menyimpan energi termal di dalam *thermal energy storage* (TES) [56]. Kategori penyimpan panas yang biasa diterapkan pada TES terdiri dari

3 macam, yaitu *sensible heat storage* (SHS), *laten heat storage* (LHS) serta *thermochemical*. Dari ketiga metode penyimpanan kalor tersebut, LHS merupakan penyimpanan kalor yang paling efektif digunakan.

SHS yang digunakan berupa air biasa di mana banyak dijumpai dan harganya murah serta memiliki karakteristik perpindahan kalor yang baik [57]. Akan tetapi air memiliki kekurangan, yaitu pelepasan energi yang terlalu besar sehingga perlu ditambahkan *phase change material* (PCM) untuk mengatasi kekurangan pada SHS. Material PCM yang umumnya digunakan adalah *paraffin wax* yang merupakan kategori penyimpanan energi jenis LHS karena *paraffin wax* memiliki sifat-sifat di antaranya adalah: densitas material tinggi ( $\sim 200$  kJ/kg) (*melting point* dari material kisaran antara  $8^{\circ}\text{C}$  sampai  $106^{\circ}\text{C}$ ), serta siklus termalnya mampu bertahan selama 1500 siklus [58].

### **Definisi *Heat Storage***

*Heat Storage* (Penyimpanan panas) merupakan penyimpanan energi yang mampu menyimpan energi termal. Penggunaan *storage* berfungsi agar energi yang tersimpan dapat digunakan pada saat yang diinginkan. Energi termal dapat tersimpan atau terlepas dalam *Heat Storage* karena adanya proses *cooling*, *heating*, *melting*, *solidifying*, *vaporizing* atau proses *thermochemical* yang lain di dalam sistem. Energi matahari merupakan salah satu bentuk energi termal. Energi matahari yang hanya memancarkan energinya pada siang hari sehingga membuat sistem *Heat Storage* menjadi sangat penting [59]. Ada beberapa faktor penting yang diperhitungkan dalam penggunaan *Heat Storage*, antara lain:

- Durasi penyimpanan.
- Temperatur kerja sistem.
- Kapasitas penyimpanan.
- *Heat loss*.
- Ketersediaan tempat.
- Faktor ekonomis .

*Heat Storage* dapat dikategorikan menjadi tiga tipe yaitu, *Latent Heat Storage* (LHS), *Sensible Heat Storage* (SHS), dan *Thermo-chemical Storage* (TCS). Pada penggunaannya, LHS dan SHS akan mengalami *heat loss* seiring dengan waktu, sehingga tidak cocok digunakan sebagai penyimpan energi jangka panjang. Pengaplikasian sistem *Heat Storage* memiliki tiga siklus yaitu, *Charging*, *Storage*, dan *Discharging* [60]. Proses *charging* akan terus berlangsung jika media fase belum berubah dan kondisi temperatur yang masih rendah. Proses *storage*, yaitu proses penjagaan energi, supaya energi yang telah tersimpan tetap terjaga dan tidak berkurang dalam jangka waktu yang telah ditentukan. Proses *discharging*, yaitu proses pelepasan kalor dari media penyimpan PCM energi ke HTF. Hal ini bertujuan untuk memanfaatkan energi yang telah disimpan.

### ***Latent Heat Storage* (Penyimpan Panas Laten)**

*Latent Heat Storage* (LHS) merupakan proses penyerapan atau pelepasan energi yang terjadi pada sistem, ditandai dengan adanya perubahan fase dari material penyimpan energi. Perubahan fase *liquid-solid* mayoritas lebih banyak digunakan sebagai *energy storage* dibandingkan dengan fase *liquid-vapor*, karena pada fase *liquid-solid* volume yang digunakan lebih sedikit. LHS ini dapat dihitung dengan persamaan 5.1 [61].

$$Q = m[\int_{TA}^{TD} C_{ps}(T)dT + L + \int_{TE}^{TF} C_{pl}(T)dT + Lg \int_{TG}^{TH} C_{pg}(T)dT] \quad (5.1)$$

di mana:

Q = Jumlah kalor  
[Joule]

m = Massa material  
[kg]

$C_{ps}$  = Kalor jenis fase padat  
[kJ/kg.°C]

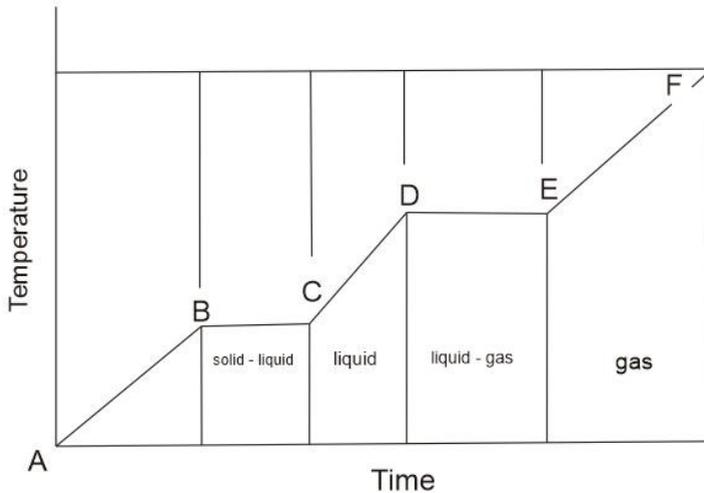
$C_{pl}$  = Kalor jenis fase cair  
[kJ/kg.°C]

$C_{pg}$  = Kalor jenis fase gas  
[kJ/kg.°C]

L = Kalor *latent* perubahan padat  
[kJ.kg]

Lg = Kalor *latent* perubahan cair-gas  
[kJ/kg]

Berikut grafik perubahan fasa pada suatu zat ditunjukkan pada gambar 5.1.



Gambar 5.1. Grafik temperatur-waktu pada pemanasan suatu zat  
 Sumber : [61]

### **Sensible Heat Storage (Penyimpan Panas Sensibel)**

*Sensible Heat Storage* (SHS) merupakan energi yang tersimpan di dalam sistem ditandai dengan adanya perubahan temperatur pada material penyimpanan energi. Pengaplikasian SHS dikategorikan menjadi dua tipe, yaitu media cair dan media padat. Media cair adalah SHS yang menggunakan zat cair sebagai penyimpan energi, seperti air, minyak, dan *molten salt*. Sedangkan media padat adalah SHS yang menggunakan material padat sebagai penyimpan energinya, seperti logam. Keunggulan paling umum dari SHS adalah harganya yang murah, tetapi SHS memiliki *density energy* paling rendah di antara ketiga tipe *storage* seperti yang terlihat pada gambar 5.2. Akibatnya SHS memerlukan *volume storage* yang besar. Besarnya energi yang tersimpan dapat dihitung dengan persamaan 5.2 [58].

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m C_p dT = m C_{ap} (T_f - T_i) = \rho V C_{ap} (T_f - T_i) \quad (5.2)$$

Dimana:

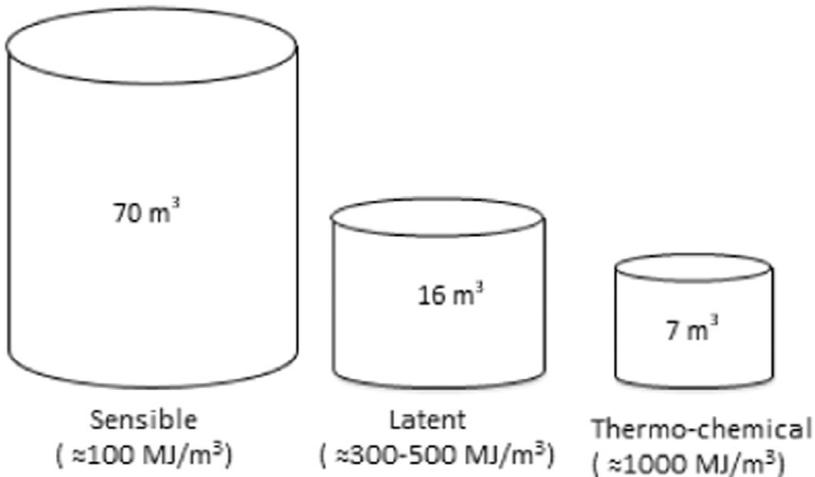
$T_f$  = Temperatur akhir  
[°C]

$T_i$  = Temperatur awal  
[°C]

$C_{ap}$  = Kalor jenis rata-rata material penyimpan saat proses  
[J/kg.°C]

= Massa jenis  
[kg/m<sup>3</sup>]

$V$  = Volume  
[m<sup>3</sup>]



Gambar 5.2. Volume dari storage yang dibutuhkan untuk menyimpan energi (1800 kWh)

Sumber: [59]

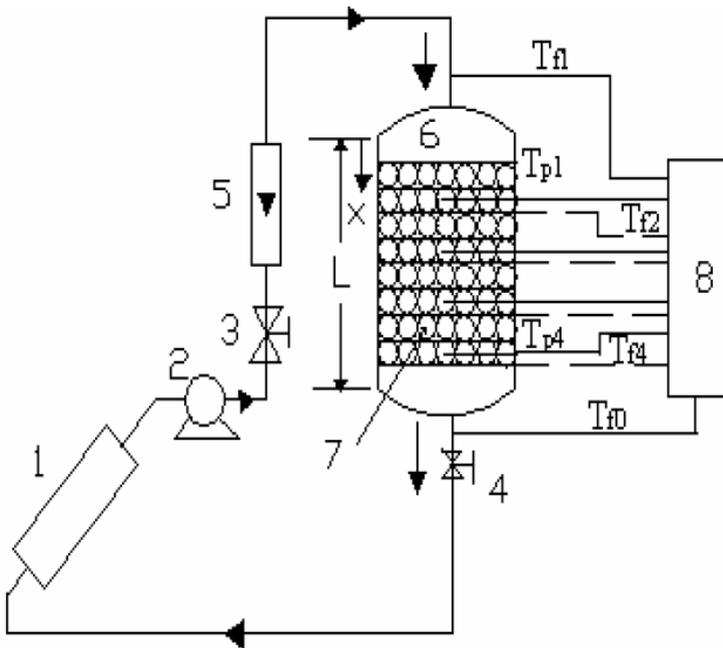
### ***Thermo-Chemical Storage (Termokimia Penyimpanan)***

*Thermo-Chemical Storage* (TCS) merupakan teknologi dalam bidang penyimpanan energi termal yang terbaru. *Thermo-Chemical Storage* menyerap energi termal dengan menggunakan reaksi termokimia. Energi tersimpan melalui *reversible reaction* dan melepaskan energi ketika reaksi tersebut dibalik. Sistem

ini memerlukan *catalyst* karena *Thermo-Chemical Storage* memiliki *density energy* yang tinggi. Hal ini digunakan untuk melepas energi dan mengontrol reaksi termokimia dan hal-hal yang tidak diinginkan dalam penyimpanan termal [62].

### Prinsip Kerja *Heat Storage*

Prinsip kerja *Heat Storage* ini menggunakan PCM dengan material yang bernama *paraffin wax* yang dapat dilihat pada gambar 5.3.



Gambar 5.3. Prinsip kerja *Heat Storage*  
Sumber : [63]

Prinsip kerja yang digambarkan 5-3 memiliki:

1. *Solar Flat Plate*.
2. Pompa.
3. Katup.
4. Katup.

5. *Flow Meter*.
6. Tempat Penyimpanan (*Tank Heat Storage*).
7. Kapsul PCM.
8. *Temperature Indicator*.

Tangki *Heat Storage* berbentuk silinder atau tabung yang terisolasi oleh kaca wol dan berisi kapsul-kapsul PCM yang berbentuk bola. *Solar Flat Plate* digunakan untuk mengumpulkan energi matahari untuk memanaskan air yang tersirkulasi. Material yang digunakan pada bagian Tangki *Heat Storage* adalah *stainless steel*. Pada tangki tersebut dibuat sebuah ruangan pada bagian atas dan bawah agar aliran HTF terdistribusi dengan baik. Kapsul-kapsul PCM tersebut diletakkan di dalam tangki *Heat Storage* dan disusun dengan seragam di dalam lapisan *wire mesh*. *Flow meter* dengan tingkat ketelitian  $\pm 2\%$  digunakan untuk mengukur laju aliran HTF. Selanjutnya ada pompa dengan tipe pompa sentrifugal yang digunakan untuk mensirkulasi HTF melewati tangki *Heat Storage*. Jadi, fluida yang sudah dipanaskan oleh energi matahari melewati tangki dan bersentuhan dengan lapisan kapsul-kapsul PCM, di dalam PCM terdapat material *paraffin wax* yang berguna sebagai media penyimpan panas dengan proses *charging* dan *discharging*, dapat menyimpan panas perlu membuat material tersebut mencapai ke titik leleh, fluida tersebut diatur keluar dan masuknya dengan katup yang ada pada saluran *in* dan *out*[63].

Penerapan atau penggunaan *Heat Storage* di dunia industri ditemukan di kota Krems di Austria yang merupakan sebuah tangki yang besar dengan menggunakan material perubahan fase (PCM) yang berkapasitas 2 GWh.



Gambar 5.4. Tangki Heat Storage di Krems, Austria

### ***Phase Change Material (Material Pengubah Fase)***

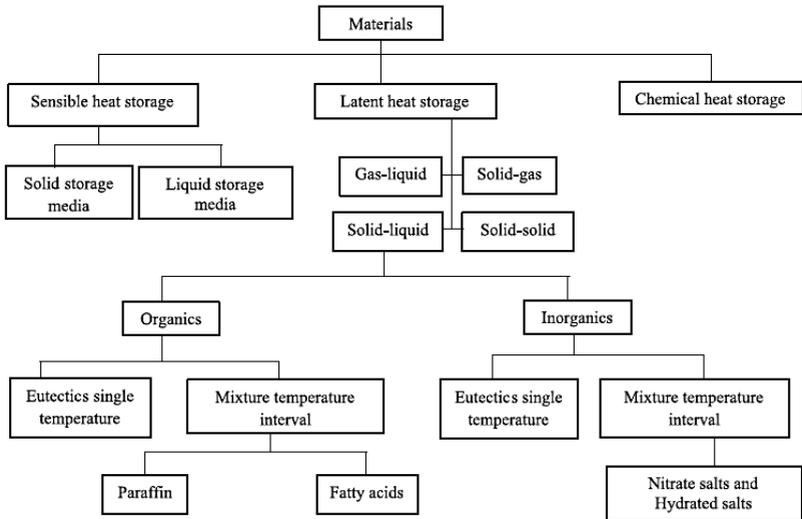
*Phase Change Material* (PCM) merupakan material yang memiliki panas dengan fusi yang tinggi. Material yang bersifat dapat meleleh dan membeku pada suhu tertentu serta mampu menyimpan dan melepas energi dengan besaran tertentu [64]. *Phase Change Material* (PCM) dapat menyerap dan melepas panas yang terjadi pada saat perubahan fase padat ke cair atau sebaliknya. Jadi, material PCM dapat disimpulkan sebagai bahan penyimpan panas laten. Material PCM yang digunakan pada umumnya adalah *paraffin wax* karena memiliki sifat fisik yang mampu menyimpan energi cukup besar dengan densitas energi mencapai ( $\sim 200$  kJ/kg) dan konduktivitas termal yang rendah ( $\sim 0,2$  Q/m. $^{\circ}$ C) dengan *melting point* antara 8 sampai  $106^{\circ}$ C dan mempunyai siklus termal yang mampu bertahan selama 1500 siklus. Oleh sebab itu, *paraffin wax* dianggap harus memiliki karakteristik yang ditunjukkan pada tabel 5.1.

Tabel 5.1. Karakterisitk material PCM

No.	Sifat Termal	Sifat Fisis	Sifat Kimia	Faktor Ekonomi
1.	Temperatur perubahan fase dari material sesuai dengan temperatur kerja.	Kerapatan material tinggi.	Memiliki sifat kimia yang stabil.	Tersedia banyak.
2.	Memiliki nilai latent heat dan spesifik heat yang tinggi.	Perubahan kerapatan yang naik ketika berubah fasa (melting).	Tidak terjadi dekomposisi.	Tidak mahal.
3.	Konduktivitas termal rendah	Tidak terjadi supercooling ketika pendinginan.	Tidak beracun dan mudah terbakar cocok dengan kapsul	

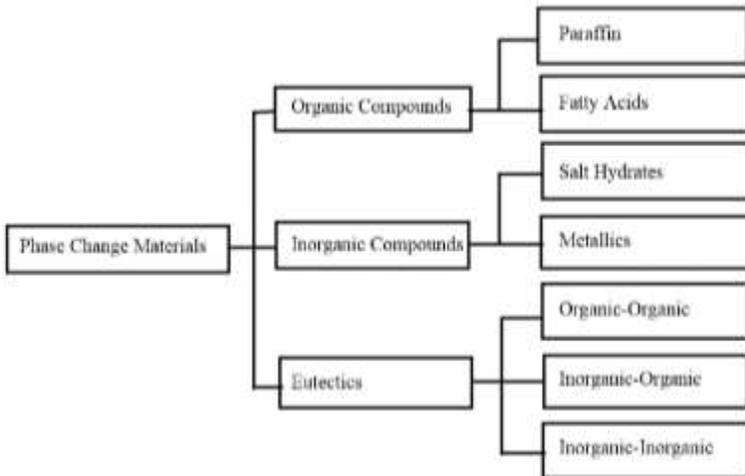
Sumber: [61]

Kapasitas penyimpanan dari PCM bergantung pada besarnya nilai *specific heat* dan *laten heat value*. Semakin tinggi nilai *specific heat* dan *laten heat value* dari PCM akan semakin baik [65]. Hal ini disebabkan karena penyimpanannya akan semakin besar. Material PCM dengan perubahan fasa padat ke gas atau cair ke gas pada umumnya tidak digunakan sebagai penyimpan energi; karena ketika PCM mengalami perubahan fase menjadi gas, maka volume material tersebut akan menjadi sangat besar sehingga perlunya sistem yang besar dan kompleks. Klasifikasi jenis PCM dapat dilihat pada Gambar 5.4.



Gambar 5.5. Klasifikasi phase change material (PCM)  
 Sumber: [66]

Adapun klasifikasi PCM organik, senyawa inorganik, dan *eutectic* dapat dilihat pada gambar 5-5.



Gambar 5.6. Klasifikasi PCM  
 Sumber: [67]

Setiap jenis PCM mempunyai karakter yang berbeda-beda. Adapun karakter dari masing-masing PCM dapat dilihat pada tabel 5.2.

Tabel 5.2. Kelebihan dan Kekurangan PCM

<i>Klasifikasi</i>	<i>Kelebihan</i>	<i>Kekurangan</i>
<i>Organik</i>	<i>Tersedia secara luas dalam berbagai temperatur operasi. Rendah atau tidak mengalami supercooling. Memiliki panas lebur yang tinggi. Dapat didaur ulang. Tidak korosif. Dapat dioperasikan dengan berbagai material.</i>	<i>Memiliki konduktifitas termal yang rendah. Memiliki perubahan volume yang besar. Mudah terbakar.</i>
<i>Senyawa Inorganik</i>	<i>Memiliki panas lebur yang tinggi. Memiliki konduktifitas termal yang tinggi. Memiliki perubahan volume yang rendah. Tersedia dengan biaya yang murah.</i>	<i>Mengalami supercooling. Mengalami korosi.</i>
<i>Eutectic</i>	<i>Memiliki temperatur leleh yang tinggi. Memiliki densitas termal yang tinggi.</i>	<i>Kurangnya literatur mengenai data-data termal properties.</i>

Sumber: [68]

## Parafin

Parafin merupakan bagian dari hidrokarbon alkana dengan formula  $C_nH_{2n+2}$ . Parafin didapatkan dari proses destilasi minyak bumi yang hasil destilasinya masih banyak mengandung hidrokarbon. Parafin memiliki kandungan atom C yang berbeda-beda, semakin banyak kandungan atom C maka rantai karbonnya akan semakin panjang sehingga fasa parafin akan semakin padat. Parafin dengan kandungan atom C5-C15 merupakan parafin dengan fasa cair, sedangkan parafin dengan kandungan atom karbon lebih dari C15 merupakan parafin dengan fasa padat atau yang biasa disebut *paraffin wax* seperti yang terlihat pada gambar 5.7.



(a) (b)

Gambar 5.7. Parafin, (a) Parafin Padat, (b) Parafin Cair.  
Sumber: [69]

Parafin padat mempunyai temperatur leleh antara 53-59 °C dan mempunyai panas laten yang cukup tinggi antara 160 kJ/kg sehingga sering dimanfaatkan sebagai penyimpan energi termal. Hal tersebut disebabkan karena mudah menyerap, menyimpan, dan melepaskan energi termal yang ditandai dengan perubahan fasa dari bentuk padat menjadi cair atau sebaliknya [69]PCM Non-Parafin

PCM Non-Parafin merupakan material PCM yang paling beragam di antara material PCM yang lain. Material PCM Non-Parafin secara umum di antaranya, yaitu asam lemak (Gambar 5.7.), ester, alkohol, dan glikol. PCM Non-Parafin memiliki sifat fluida yang beragam tiap jenisnya baik dari titik lelehnya, masa jenisnya, konduktivitas termalnya, hingga panas latennya. Material Non-Parafin memiliki titik leleh yang berbeda-beda mulai dari yang terkecil, yaitu 7,8 °C (*asam formic*) hingga yang terbesar, yaitu 187°C (*asam amino benzoic*). Selain itu, material Non-Parafin juga memiliki panas laten yang sangat beragam mulai dari yang terendah 126 kJ/kg (*methyl brombenzoate*) hingga yang tertinggi 259 kJ/kg (*caprylone*). Akan tetapi, PCM Non-Parafin memiliki kekurangan yang cukup menonjol, yaitu

memiliki sifat yang mudah sekali terbakar (*flammable*) sehingga riskan dalam penggunaannya sebagai *Heat Storage*[70].



Gambar 5.8. Asam Lemak  
Sumber: [70]

## Eutectic

PCM *eutectic* merupakan gabungan antara dua material PCM atau lebih untuk menghasilkan material PCM baru. PCM *eutectic* dapat dibuat dengan menggabungkan antara material PCM *organic-organic*, *organic-inorganic*, dan *inorganic-inorganic* (Gambar 5.8). Syarat dari penggabungan kedua material ini, yaitu kedua materialnya harus dapat bercampur rata (tidak memisah). Selain itu, gabungan antara dua material tersebut harus memiliki temperatur leleh dan temperatur beku yang sama sehingga pada saat PCM mengalami pembekuan dan peleburan kedua material tersebut dapat berlangsung secara bersamaan [70].

Nama	Komposisi (%)	Titik Leleh ( $^{\circ}\text{C}$ )	Panas Laten (kJ/kg)
$\text{C}_{14}\text{H}_{28}\text{O}_2 + \text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}_2$	34+66	24	147.7
$\text{AlCl}_3 + \text{NaCl} + \text{ZrCl}_2$	79+17+4	68	234
$\text{AlCl}_3 + \text{NaCl} + \text{KCl}$	66+20+14	70	209
$\text{NH}_2\text{CONH}_2 + \text{NH}_4\text{Br}$	66.6+33.4	76	151
$\text{AlCl}_3 + \text{NaCl} + \text{KCl}$	60+26+14	93	213
$\text{AlCl}_3 + \text{NaCl}$	66+34	93	213

Gambar 5.9. Jenis-jenis material PCM eutectic  
Sumber: [70]

### Charging dan Discharging

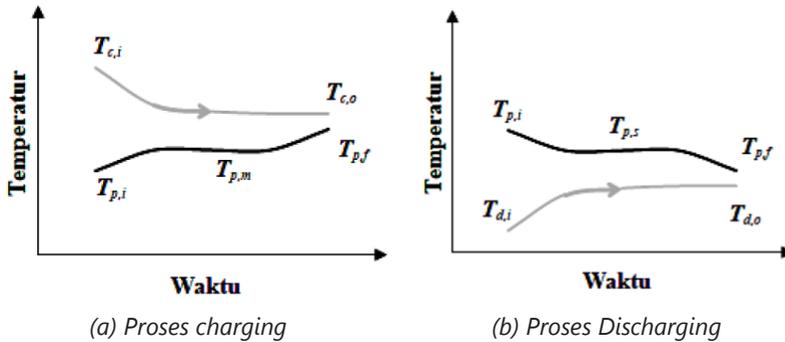
Proses *charging* diawali dengan penyerapan energi termal yang terjadi di dalam kolektor untuk menaikkan temperatur HTF. Kemudian, HTF di dalam kolektor pada temperatur  $T_{c,i}$  bersirkulasi ke dalam tangki *Heat Storage* karena terjadi perbedaan temperatur HTF pada kolektor dan tangki. Di dalam tangki *Heat Storage*, energi termal pada HTF diserap oleh PCM yang memiliki temperatur  $T_{p,i}$ . PCM yang terus menyerap energi termal mulai mengalami pelelehan yang menandakan PCM telah memasuki temperatur leleh ( $T_{p,m}$ ). Apabila energi termal pada HTF terus diserap setelah PCM meleleh sempurna, maka temperaur PCM menjadi  $T_{p,f}$ . Proses *charging* selesai saat HTF bertemperatur  $T_{c,o}$ . Kalor yang dilepas HTF selama proses *charging* dapat diketahui dengan persamaan 5.3.

Temperatur HTF dan PCM saat awal mula proses *discharging* masing-masing adalah  $T_{d,i}$  dan  $T_{p,i}$ . Kebalikan dari proses *charging*, *transfer* kalor terjadi dari PCM ke HTF. PCM mulai mengalami pembekuan saat temperatur PCM mencapai  $T_{p,s}$ . Apabila temperatur HTF di bawah temperatur  $T_{p,s}$ , maka *transfer* kalor dari PCM akan terus berlangsung hingga temperatur PCM mencapai  $T_{p,f}$ . Temperatur akhir HTF saat proses *discharging* selesai adalah  $T_{d,o}$ . Kalor yang diterima HTF

dari PCM selama proses *discharging* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 5.4 . Proses di atas diilustrasikan pada Gambar 5.10 [71].

$$Q_c = \dot{m}_{ch} c_{p,ch} (T_{c,i} - T_{c,o}) \quad (5.3)$$

$$Q_d = \dot{m}_d c_{p,d} (T_{d,i} - T_{d,o}) \quad (5.4)$$



Gambar 5.10. Skema temperatur pada sistem LHS  
Sumber: [71]

### Kalor Tersimpan Sesaat

Kalor tersimpan sesaat dapat dihitung berdasarkan temperatur masuk sesaat ( $T_{w,in}(t)$ , °C) dan temperatur keluar sesaat ( $T_{w,out}(t)$ , °C) dari HTF pada tangki *Heat Storage* seperti pada persamaan 5.5 berikut [72].

$$Q(t) = \dot{m} c_{p,w} (T_{w,in}(t) - T_{w,out}(t)) \quad (5.5)$$

Dimana:

$\dot{m}$  = Laju aliran panas  
[kg/s]

$c_{p,w}$  = Kalor jenis air panas  
[J/kg.°C]

## Kapasitas Energi Tersimpan

Kapasitas energi tersimpan adalah besarnya energi yang dapat disimpan di dalam tangki *Heat Storage*. Jumlahnya dapat dihitung dengan mengetahui penyimpanan termal pada tangki *Heat Storage*, yaitu HTF, PCM, dan kapsul. Kapasitas energi yang tersimpan berupa kalor sensibel HTF, kalor laten PCM, kalor sensibel PCM, dan kalor sensibel kapsul. Oleh karena itu, kapasitas energi tersimpan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [72]

$$E(t) = m_w c_{p,w} (T_w(t) - T_{w,i}) + m_p \{ c_{p,ps} (T_m(t) - T_{p,i}) + L + c_{p,pl} (T_{p,am}(t) - T_m(t)) \} + m_c c_{p,c} (T_c(t) - T_{c,i}) \quad (5.6)$$

Dimana:

$m_w$  = Massa Air  
[kg]

$m_p$  = Massa PCM  
[kg]

$m_c$  = Massa Kapsul  
[kg]

$c_{p,w}$  = Kalor jenis air  
[kJ/kg.°C]

$c_{p,ps}$  = Kalor jenis PCM padat  
[kJ/kg.°C]

$c_{p,pl}$  = Kalor jenis PCM cair  
[kJ/kg.°C]

- $c_{p,c}$  = Kalor jenis dinding kapsul  
 [kJ/kg.°C]
- $T_w$  = Temperatur air panas  
 [°C]
- $T_{w,i}$  = Temperatur awal air  
 [°C]
- $T_m$  = Temperatur leleh PCM  
 [°C]
- $T_{p,am}$  = Temperatur PCM di atas titik leleh  
 [°C]
- $T_{p,l}$  = Temperatur awal PCM  
 [°C]
- $T_c$  = Temperatur Kapsul  
 [°C]
- $T_{c,l}$  = Temperatur awal kapsul  
 [°C]
- $L$  = Kalor laten pelelehan  
 [J/kg]

## Efisiensi Pengumpulan Kolektif

Efisiensi pengumpulan kumulatif adalah perbandingan antara jumlah kalor yang tersimpan di tangki *Heat Storage* dengan jumlah energi radiasi yang sampai ke permukaan kolektor selama periode waktu yang sama. Besarnya efisiensi kumulatif dapat dihitung dengan persamaan 5.7 sebagai berikut [73].

$$\eta = \frac{Q_{collect}}{Q_{insident}} = \frac{m_w c_{p,w} (T_{w,1} - T_{w,2})}{A_c \int_1^2 I_c dT} \quad (5.7)$$

Dimana:

$T_{w,1}$  = Temperatur awal [°C]

$T_{w,2}$  = Temperatur akhir [°C]

$Q_{\text{incident}}$  = Energi matahari menimpa kolektor matahari [Joule]

$t$  = Waktu [s]

### Efisiensi Tangki *Heat Storage*

Efisiensi merupakan faktor penting dalam suatu alat. Semakin tinggi efisiensi, maka semakin baik PATS (Pemanas Air Tenaga Surya) karena energi yang dapat digunakan lebih banyak. Efisiensi yang dapat dihitung pada PATS ada 3, yaitu efisiensi *charging*, efisiensi *discharging*, dan efisiensi penyimpanan. Efisiensi *charging* ( $\eta_c$ ) dapat dihitung dengan membandingkan antara energi tersimpan kumulatif dan kapasitas penyimpanan energi, sedangkan efisiensi *discharging* ( $\eta_d$ ) merupakan perbandingan antara energi ekstraksi terhadap energi tersimpan kumulatif. Efisiensi penyimpanan ( $\eta_p$ ) didapatkan dari perbandingan antara energi ekstraksi dan kapasitas. Oleh karena itu, efisiensi *charging*, *discharging*, dan penyimpanan berturut-turut memenuhi persamaan 5.8, persamaan 5.9 dan persamaan 5.10 sebagai berikut [73].

$$\eta_c = \frac{\text{energi tersimpan kumulatif}}{\text{kapasitas penyimpanan}} \quad (5.8)$$

$$\eta_d = \frac{\text{energi ekstraksi kumulatif}}{\text{energi tersimpan kumulatif}} \quad (5.9)$$

$$\eta_p = \frac{\text{energi ekstraksi kumulatif}}{\text{kapasitas penyimpanan}} \quad (5.10)$$

### Soal

1. Apakah yang dimaksud dengan penyimpan panas? Jelaskan!
2. Apa sajakah jenis penyimpan panas?
3. Bagaimanakah cara kerja penyimpan panas?

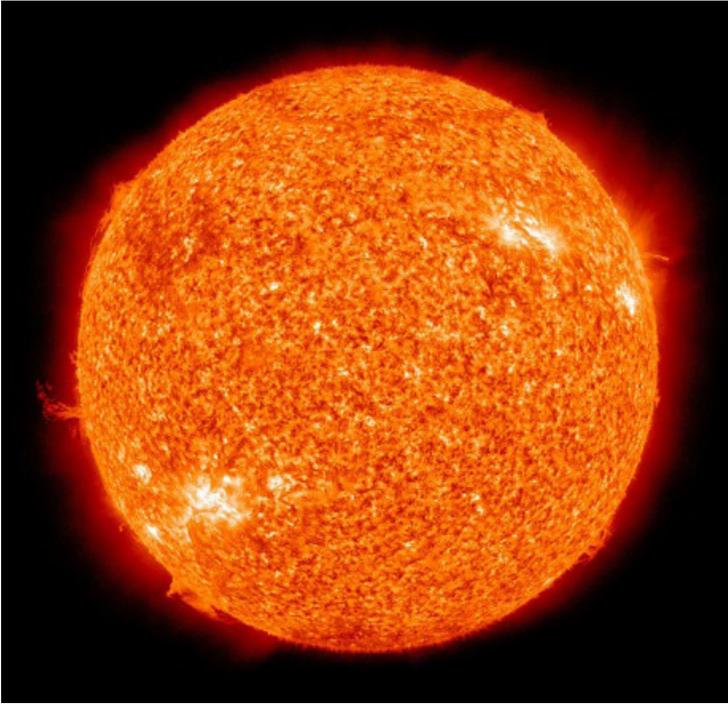
4. Apa sajakah bahan yang banyak digunakan sebagai penyimpan panas?
5. Di manakah penyimpan panas dapat dimanfaatkan secara luas?

# BAB 6

## SOLAR CELL

### Pendahuluan

Tenaga surya, air, panas bumi, dan angin merupakan energi alternatif untuk menjadi solusi pengembangan energi di Indonesia [74]. Dari beberapa sumber energi terbarukan, energi surya menjadi alternatif yang sangat potensial bila diterapkan di Indonesia [75]. Energi surya merupakan salah satu energi alternatif yang bersumber dari matahari [76]. Matahari adalah sumber energi utama yang memancarkan energinya ke bumi [75]. Energi matahari bisa dikatakan energi yang bersih, karena menghasilkan listrik dengan nol emisi gas CO<sub>2</sub> [77].



Gambar 6.1. Matahari

Sumber : <https://id.wikipedia.org/wiki/Matahari>

Ada banyak cara untuk memanfaatkan energi matahari untuk dijadikan sumber energi guna menghasilkan listrik, salah satunya dengan menggunakan Sel Surya atau *Solar Cell* [76]. Sel Surya atau *Solar Cell* atau biasa juga disebut Sel *Photovoltaic* adalah perangkat yang mengubah energi radiasi matahari menjadi listrik [76]. Pemanfaatan energi surya dengan melalui konversi *Photovoltaic* telah banyak diterapkan merupakan beberapa sel surya yang dapat dirangkai secara paralel maupun seri [78].

### **Definisi *Solar Cell***

*Solar Cell* atau Sel Surya adalah alat yang digunakan untuk mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik [75]. Sel Surya merupakan sebuah teknologi yang mengkonversi energi

matahari menjadi energi listrik secara langsung [78]. Sel Surya biasanya dikemas di dalam sebuah modul [76]. Dalam modul Sel Surya terdiri dari banyak sel surya yang dirangkai secara seri maupun paralel [78].

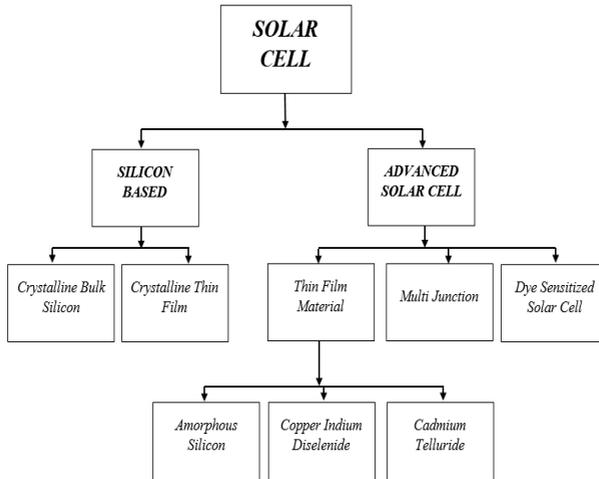


*Gambar 6.2. Solar Cell*

*Sumber : [https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell)*

### **Klasifikasi *Solar Cell***

*Solar Cell* diklasifikasikan secara sederhana seperti ilustrasi pada Gambar 6.3.



Gambar 6.3. Klasifikasi Solar Cell  
Sumber: [79]

### ***Silicon Based Solar Cell***

Sel surya berbahan dasar silikon merupakan sel surya komersil pertama yang berhasil dikembangkan [80]. Hingga saat ini, *Silicon Based Solar Cell* masih mendominasi pasar hingga 86% pasar sel surya di seluruh dunia [81]. Silikon adalah material semikonduktor bervalensi empat yang memiliki keunggulan, yaitu memiliki resistivitas yang sangat tinggi [82] serta memiliki energi *band gap* yang cukup rendah dan ketersediaan yang banyak di alam. Namun, sel surya jenis ini memiliki kekurangan, yaitu biaya produksi yang cukup mahal karena untuk mendapatkan performa sel surya yang baik dibutuhkan silikon dengan kemurnian yang sangat tinggi [80].

Untuk mengatasi tingginya biaya produksi, maka dilakukan pengembangan, yaitu dengan menggunakan material lain [79]. Salah satu sel surya hasil pengembangan dari sel surya yang sudah ada adalah *Crystalline Film Silicon*.

## ***Advanced Solar Cell***

Di masa yang akan datang, kebutuhan akan sel surya non-silikon diperkirakan akan naik [83]. Hal ini disebabkan oleh kebutuhan akan sumber energi alternatif, khususnya energi surya, yang memiliki efisiensi lebih tinggi, harga yang lebih murah, dan juga proses produksi yang lebih sederhana [84]. Sel surya non-silikon yang berhasil dikembangkan pada saat ini antara lain *Thin Film Solar Cell*, Sel Surya Organik & Polimer, dan *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) [85].

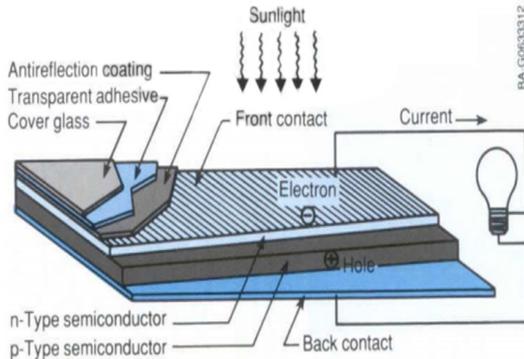
*Advanced Solar Cell* merupakan hasil pengembangan dari sel surya berbahan dasar silikon namun dengan konsep yang berbeda [80]. Konsep dasar dari *Advanced Solar Cell*[79] antara lain:

- Meningkatkan efisiensi;
- *Reduce cost*.

## ***Struktur Dasar Solar Cell***

Struktur dari sel surya pada umumnya terdiri dari beberapa jenis material semikonduktor dengan dua daerah berbeda, yaitu daerah positif dan negatif [79]. Dua sisi yang berlainan ini berfungsi sebagai elektroda [86]. Untuk menghasilkan daerah muatan yang berbeda, biasanya digunakan *dopant* dengan golongan periodik yang berbeda [84]. Hal ini bertujuan agar *dopant* pada daerah negatif akan berfungsi sebagai penyuplai elektron, dan *dopant* pada daerah positif akan berfungsi sebagai *acceptor* elektron [87].

Struktur dasar dari *Solar Cell*[80] seperti yang di tunjukan pada Gambar 6.4 terdiri dari:



Gambar 6.4. Struktur Dasar Solar Cell  
 Sumber: [88]

## Substrat

Substrat adalah material yang menopang seluruh komponen sel surya. Material substrat juga harus mempunyai konduktivitas listrik yang baik karena juga berfungsi sebagai kontak terminal positif sel surya, sehingga umumnya digunakan material metal atau logam seperti aluminium atau molybdenum. Untuk sel surya dye-sensitized (DSSC) dan sel surya organik, substrat juga berfungsi sebagai tempat masuknya cahaya sehingga material yang digunakan, yaitu material yang konduktif, tapi juga transparan seperti *indium tin oxide* (ITO) dan *flourine doped tin oxide* (FTO).

## Material Semikonduktor

Material semikonduktor merupakan bagian inti dari sel surya yang biasanya mempunyai tebal sampai beberapa ratus mikrometer untuk sel surya generasi pertama (silikon), dan 1-3 mikrometer untuk sel surya lapisan tipis. Material semikonduktor inilah yang berfungsi menyerap cahaya dari sinar matahari. Untuk kasus gambar 6.4. di atas, semikonduktor yang digunakan adalah material silikon, yang umum diaplikasikan di industri elektronik. Sedangkan untuk sel surya lapisan tipis, material semikonduktor yang umum digunakan dan telah

masuk pasaran, contohnya material  $\text{Cu(In,Ga)(S,Se)}_2$  (CIGS), CdTe (kadmium telluride), dan amorphous silikon, di samping material-material semikonduktor potensial lain yang sedang dalam penelitian intensif seperti  $\text{Cu}_2\text{ZnSn(S,Se)}_4$  (CZTS) dan  $\text{Cu}_2\text{O}$  (copper oxide).

Bagian semikonduktor tersebut terdiri dari *junction* atau gabungan dari dua material semikonduktor, yaitu semikonduktor tipe-p (material-material yang disebutkan di atas) dan tipe-n (silikon tipe-n, CdS, dll) yang membentuk p-n *junction*. P-n *junction* ini menjadi kunci dari prinsip kerja sel surya. Pengertian semikonduktor tipe-p, tipe-n, dan juga prinsip p-n *junction*, dan sel surya akan dibahas dibagian "cara kerja sel surya".

## Kontak Metal

Selain substrat sebagai kontak positif, di atas sebagian material semikonduktor biasanya dilapiskan material metal atau material konduktif transparan sebagai kontak negatif.

## Lapisan Antireflektif

Refleksi cahaya harus diminimalisir agar mengoptimalkan cahaya yang terserap oleh semikonduktor. Oleh karena itu biasanya sel surya dilapisi oleh lapisan anti-refleksi. Material anti-refleksi ini adalah lapisan tipis material dengan besar indeks refraktif optik antara semikonduktor dan udara yang menyebabkan cahaya dibelokkan ke arah semikonduktor sehingga meminimumkan cahaya yang dipantulkan kembali.

## Enkapsulasi

Bagian ini berfungsi sebagai enkapsulasi untuk melindungi modul surya dari hujan atau kotoran.

## Prinsip Kerja

Ketika semikonduktor tipe-p dan tipe-n disambungkan maka akan terjadi difusi *hole* dari tipe-p menuju tipe-n dan difusi elektron dari tipe-n menuju tipe-p[87]. Difusi tersebut akan

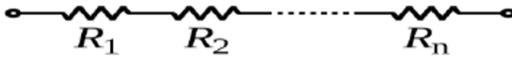
meninggalkan daerah yang lebih positif pada batas tipe-n dan daerah lebih negatif pada batas tipe-p. Adanya perbedaan muatan pada sambungan p-n disebut dengan daerah deplesi akan mengakibatkan munculnya medan listrik yang mampu menghentikan laju difusi selanjutnya. Medan listrik tersebut mengakibatkan munculnya arus *drift*. Arus *drift* adalah arus yang dihasilkan karena kemunculan medan listrik. Namun, arus ini terimbangi oleh arus difusi sehingga secara keseluruhan tidak ada arus listrik yang mengalir pada semikonduktor sambungan p-n tersebut [86].

Sebagaimana yang kita ketahui bersama, electron adalah partikel bermuatan yang mampu dipengaruhi oleh medan listrik. Kehadiran medan listrik pada elektron dapat mengakibatkan elektron bergerak. Hal inilah yang dilakukan pada solar cell sambungan p-n, yaitu dengan menghasilkan medan listrik pada sambungan p-n agar elektron dapat mengalir akibat kehadiran medan listrik tersebut. Ketika *junction* disinari, photon yang mempunyai energi sama atau lebih besar dari lebar pita energi elektron tersebut akan menyebabkan eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi dan akan meninggalkan hole pada pita valensi. Elektron dan hole ini dapat bergerak dalam material sehingga menghasilkan pasangan *electronhole*. Apabila ditempatkan hambatan pada terminal sel surya, maka elektron dari area-n akan kembali ke area-p sehingga menyebabkan perbedaan potensial dan arus akan mengalir [88].

## Sistem Instalasi

### Rangkaian Seri

Hubungan seri pada sel surya didapat apabila bagian depan (+) sel surya utama dihubungkan dengan bagian belakang (-) sel surya kedua [84]. Hubungan seri pada sel surya dapat dilihat pada Gambar 6.5.



Gambar 6.5. Rangkaian Seri

Sumber: <https://teknologisurya.wordpress.com/dasar-teknologi-sel-surya/prinsip-kerja-sel-surya/>

Tegangan sel surya dijumlahkan apabila dihubungkan seri satu sama lain.

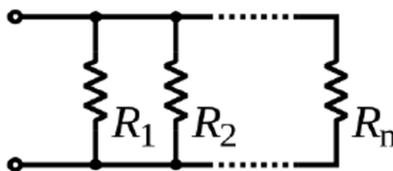
$$U_{total} = U_1 + U_2 + U_3 + U_n \quad (1)$$

Arus sel surya sama apabila dihubungkan seri satu sama lain.

$$I_{total} = I_1 = I_2 = I_3 = I_n \quad (2)$$

## Rangkaian Paralel

Rangkaian paralel *solar cell* didapat apabila terminal kutub positif dan negatif *solar cell* dihubungkan satu sama lain[87]. Hubungan paralel dari *solar cell* dapat dilihat pada Gambar 6.6.



Gambar 6.6 Rangkaian Paralel

Sumber: <https://teknologisurya.wordpress.com/dasar-teknologi-sel-surya/prinsip-kerja-sel-surya/>

Tegangan *solar cell* yang dihubungkan paralel sama dengan satu *solar cell*.

$$U_{total} = U_1 = U_2 = U_3 = U_n \quad (3)$$

Arus yang timbul dari hubungan ini langsung dijumlahkan.

$$I_{total} = I_1 + I_2 + I_3 + I_n \quad (4)$$

## Efisiensi Sel Surya

Daya listrik yang dihasilkan oleh sel surya ketika mendapatkan energi cahaya dihitung dari kemampuan untuk menghasilkan tegangan ketika diberi beban dan arus melalui beban pada waktu yang sama [89]. Efisiensi adalah sifat terpenting yang menjadi tolak ukur performa pada sebuah perangkat sel surya [76]. Nilai efisiensi suatu sel surya dihitung dari besarnya daya yang dihasilkan sel surya yang terbagi oleh cahaya yang datang [82].

## Perkembangan Teknologi

Karena kebutuhan sumber energi alternatif, khususnya energi surya, yang memiliki efisiensi lebih tinggi, harga yang lebih murah, dan juga proses produksi yang lebih sederhana semakin meningkat maka sel surya terus mengalami perubahan [90]. Perkembangan teknologi sel surya terbagi menjadi 3 generasi [84], yaitu:

1. Generasi pertama
  - *Monocrystalline* (Mono c-Si);
  - *Polycrystalline* (Poly c-Si); dan
  - *Amorphous Silicon Cells*.
2. Generasi kedua
  - *Amorphous silicon* (*a-Si* and *a-Si/μc-Si*);
  - *Cadmium Telluride* (*Cd-Te*); dan
  - *Copper-Indium-Selenide* (*CIS*) & *Copper-Indium-Gallium-Diselenide* (*CIGS*).

3. Generasi ketiga
  - *Dye Sensitized Solar Cell*;
  - *Perovskite Solar Cell*;
  - *Organic (OPV)*.

## Soal

1. Bagaimanakah prinsip kerja dari sel surya?
2. Apa sajakah material yang digunakan untuk membuat sel surya? Jelaskan!
3. Berapakah efisiensi sel surya? Jelaskan mengapa demikian!
4. Apa sajakah rangkaian yang dapat digunakan pada pemanfaatan sel surya?

# DAFTAR PUSTAKA

- [1] A.M. Altherr, H.J. Mosler, R. Tobias, F. Butera, Attitudinal and relational factors predicting the use of solar water disinfection: A field study in Nicaragua, *Heal. Educ. Behav.* 35 (2008) 207–220. doi:10.1177/1090198106288251.
- [2] F.M. Salih, Formulation of a mathematical model to predict solar water disinfection, *Water Res.* 37 (2003) 3921–3927. doi:10.1016/S0043-1354(03)00307-5.
- [3] S. Dejung, I. Fuentes, G. Almanza, R. Jarro, L. Navarro, G. Arias, E. Urquieta, A. Torrico, W. Fernandez, M. Iriarte, C. Birrer, W.A. Stahel, M. Wegelin, Effect of solar water disinfection (SODIS) on model microorganisms under improved and field SODIS conditions, *J. Water Supply Res. Technol. - AQUA.* 56 (2007) 245–256. doi:10.2166/aqua.2007.058.
- [4] Bluesolarcity, *A Guide To Solar Disinfection (SODIS)*, (2017).
- [5] Y.D.D. Yogyakarta, *SODIS (Solar Water Disinfection Method): Membuat Air Minum Sehat dengan Sinar Matahari*, Pokja AMPL. (2008) 8 hal.
- [6] dian go Green, *SODIS BOTOL AJAIB” SOLUSI AMAN UNTUK HEMAT ENERGI*, Wordpress. Com. (2013).
- [7] K.G. McGuigan, R.M. Conroy, H.J. Mosler, M. du Preez, E. Ubomba-Jaswa, P. Fernandez-Ibañez, Solar water disinfection (SODIS): A review from bench-top to roof-top, *J. Hazard. Mater.* 235–236 (2012) 29–46. doi:10.1016/j.jhazmat.2012.07.053.
- [8] A.R. Marques, F. de C.O. Gomes, M.P.P. Fonseca, J.S. Parreira, V.P. Santos, Efficiency of PET reactors in solar water disinfection for use in southeastern Brazil, *Sol. Energy.* 87 (2013) 158–167. doi:10.1016/j.solener.2012.10.016.
- [9] M.S. Yanti Hamdiyati, *Pertumbuhan dan Pengendalian Mikroorganisme II*, Bandung Univ. Pendidik. Indones. (2011).
- [10] J. Graf, R. Meierhofer, M. Wegelin, H.J. Mosler, Water disinfection and hygiene behaviour in an urban slum in Kenya: Impact on childhood diarrhoea and influence of beliefs, *Int. J. Environ. Health Res.* 18 (2008) 335–355. doi:10.1080/09603120801966050.
- [11] AA.Bot, *Sodis*, (2019).

- [12] Sarinaningasih, PENGARUH INTENSITAS, LAMA WAKTU PENYINARAN DAN POSISI SUMBER SINAR ULTRAVIOLET TERHADAP REDUKSI JUMLAH BAKTERI E.coli PADA AIR SUMUR, (1988).
- [13] R. Yuliawan, Sodis: air minum anti diskriminasi, Aikon.Org. (2002).
- [14] Pemanfaatan Air, Anak Kampoeng. (2012).
- [15] SODIS, Yayasan Dian Desa. (2016).
- [16] N. Karuniastuti, BAHAYA PLASTIK TERHADAP KESEHATAN DAN LINGKUNGAN, Swasta Patra. 3 No 1 (2013).
- [17] Y. Huang, X. Ma, C. Rao, X. Liu, R. He, An annular compound parabolic concentrator used in tower solar thermal power generation system, *Sol. Energy*. 188 (2019) 1256–1263. doi:10.1016/j.solener.2019.07.032.
- [18] B. Hoffschmidt, S. Alexopoulos, C. Rau, J. Sattler, A. Anthrakidis, C. Boura, B. O'Connor, P. Hilger, Concentrating solar power, Elsevier Ltd., 2012. doi:10.1016/B978-0-08-087872-0.00319-X.
- [19] P.Wray, SolarPOWER, *Am.Ceram.Soc.Bull.* 87(2008)31–33. doi:10.3362/9781780445656.002.
- [20] Solar Pool Heating - Swimming Pool Heaters - Heliocol, (n.d.). <http://www.hybridsolar.com/solarpoolheating.aspx> (accessed April 21, 2020).
- [21] P. Breeze, Solar Towers, *Sol. Power Gener.* (2016) 35–40. doi:10.1016/b978-0-12-804004-1.00005-1.
- [22] S.D. Odeh, G.L. Morrison, M. Behnia, Modelling of parabolic trough direct steam generation solar collectors, *Sol. Energy*. 62 (1998) 395–406. doi:10.1016/S0038-092X(98)00031-0.
- [23] M.J. Hale, G. Kolb, Final Test and Evaluation Results from the Solar Two Project, (2002). doi:10.2172/793226.
- [24] R.I. Dunn, P.J. Hearps, M.N. Wright, Molten-salt power towers: Newly commercial concentrating solar storage, in: *Proc. IEEE*, 2012: pp. 504–515. doi:10.1109/JPROC.2011.2163739.
- [25] M. Blanco-muriel, D.C. Alarcon-padilla, T. Lopez-, Computing the solar vector  $\hat{s}$ , 70 (2001) 431–441.
- [26] E.F. Camacho, M. Berenguel, Control of solar energy systems, *IFAC Proc. Vol. 8* (2012) 848–855. doi:10.3182/20120710-4-SG-2026.00181.
- [27] T.B. Sitorus, F.H. Napitupulu, H. Ambarita, Korelasi Temperatur Udara dan Intensitas Radiasi Matahari Terhadap Performansi Mesin Pendingin Siklus Adsorpsi Tenaga Matahari, 1 (2014) 8–17.
- [28] Suharyati, S. Pambudi, J. Wibowo, N. Pratiwi, Outlook Energi Indonesia 2019, 2019. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- [29] Z. Sun, Y. Zhao, W. Xu, X. Zhang, H. Li, M. Wang, T. He, D. Wang, Research Article A Solar Heating and Cooling System in a Nearly Zero-Energy Building : A Case Study in China, 2017 (2017).
- [30] S. Hot-summer, C. Zone, L. Huang, R. Zheng, Energy and Economic Performance of Solar Cooling, (2018). doi:10.3390/buildings8030037.
- [31] H. Henning, J. Döll, Solar Systems for Heating and Cooling of Buildings, *Phys. Procedia*. 30 (2012) 633–653. doi:10.1016/j.egypro.2012.11.073.

- [32] S. Ajib, A. Alahmer, *Energy Conversion - Current Technologies and Future Trends*, Sol. Cool. Technol. (2018) 39–54.
- [33] S. Ishaya, *Solar thermal cooling*, 2014. <https://www.slideshare.net/illinoisashrae/solar-thermal-cooling> (accessed April 21, 2020).
- [34] R. Bagus Suryasa Majanasastra, *Analisis Kinerja Mesin Pendingin Kompresi Uap Menggunakan FE-36*, J. Imiah Tek. Mesin. 3 (2015) 1–15.
- [35] M.J. Hillier, *Fundamentals of engineering elasticity*, 1963. doi:10.1016/0020-7403(63)90046-8.
- [36] KHI, *What's Absorption Chiller? | Absorption Chiller | Kawasaki Thermal Engineering*, (n.d.). <https://www.khi.co.jp/corp/kte/EN/product/index.html> (accessed April 21, 2020).
- [37] S.K. Wang, *Air Conditioning Systems: System Classification, Selection, and Individual Systems*, 2001.
- [38] Nasruddin, N. Aisyah, M.I. Alhamid, B.B. Saha, S. Sholahudin, A. Lubis, *Solar absorption chiller performance prediction based on the selection of principal component analysis*, Case Stud. Therm. Eng. 13 (2019) 100391. doi:10.1016/j.csite.2019.100391.
- [39] T.W. Bank, *Fossil fuel energy consumption (% of total) | Data*, World Bank. (2016).
- [40] M. Galuh Renggani Wilis ST., *PENGARUH BENTUK PLAT ARBSORBER PADA SOLAR WATER HEATER TERHADAP EFISIENSI KOLEKTOR*, Sol. Energy. (n.d.).
- [41] A. Shukla, D. Buddhi, R.L. Sawhney, *Solar water heaters with phase change material thermal energy storage medium : A review*, 13 (2009) 2119–2125. doi:10.1016/j.rser.2009.01.024.
- [42] J. F. Frengky, S. Rita, and Sohibun, *"PEMBUATAN ALAT PEMANAS AIR TENAGA SURYA SEDERHANA UNTUK MENGETAHUI LAJU KONVEKSI," UNIVERSITAS PASIR PENGARAIAN*, 2016.
- [43] S. Sidopekso, *Studi Pemanfaatan Energi Matahari Sebagai Pemanas Air*, Berk. Fis. 14 (2011) 23–26–26.
- [44] Z. Wang, W. Yang, F. Qiu, X. Zhang, X. Zhao, *Solar water heating: From theory, application, marketing and research*, Renew. Sustain. Energy Rev. 41 (2015) 68–84. doi:10.1016/j.rser.2014.08.026.
- [45] Z. Jesko, *Classification of solar collectors*, Eng. Rural Dev. (2008) 22–27.
- [46] G.L. Morrison, *Solar water heating*, in: *Sol. Energy State Art, 2013*: pp. 223–290. [https://wikidwelling.fandom.com/wiki/Solar\\_water\\_heating](https://wikidwelling.fandom.com/wiki/Solar_water_heating) (accessed April 21, 2020).
- [47] H. Gunerhan, A. Hepbasli, *Energetic modeling and performance evaluation of solar water heating systems for building applications*, Energy Build. 39 (2007) 509–516. doi:10.1016/j.enbuild.2006.09.003.
- [48] M. of N. and R. Energy, *Solar Water Heating System*, India, 2013.
- [49] N. Haluzan, *Solar water heating systems – Advantages and disadvantages - Renewables-info.com*, Renewables-Info.Com. (2012).
- [50] F. Struckmann, *Analysis of a Flat-Plate Solar Collector*, Heat Mass Transp. 3 (2008) 39–43. doi:10.3846/mla.2011.108.

- [51] C. Orientation, Siting Your Solar Water Heating System Siting Your Solar Water Heating System, *Energy Saver*. (2019) 6–7.
- [52] A. Hobbi, K. Siddiqui, Optimal design of a forced circulation solar water heating system for a residential unit in cold climate using TRNSYS, *Sol. Energy*. 83 (2009) 700–714. doi:10.1016/j.solener.2008.10.018.
- [53] F.G. Uctug, A. Azapagic, Life cycle environmental impacts of domestic solar water heaters in Turkey: The effect of different climatic regions, *Sci. Total Environ*. 622–623 (2018) 1202–1216. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.12.057.
- [54] S. Borovkova, Asian basket options and implied correlations in energy markets, *Energy*. (2007) 1–19.
- [55] T.H.A. Santosa, M. Nadjib, Thoharuddin, M.A. Riza, Efek Variasi Beban Pendinginan Terhadap Coefficient Of Performance (Cop) Alat Uji Pengukuran Koefisien Evaporasi Menggunakan Refrigeran R-134A, *Semesta Tek*. 20 (2017) 193–203.
- [56] A. De Gracia, L.F. Cabeza, Phase change materials and thermal energy storage for buildings, *Energy Build*. 103 (2015) 414–419. doi:10.1016/j.enbuild.2015.06.007.
- [57] A. Hasan, Phase change material energy storage system employing palmitic acid, *Sol. Energy*. 52 (1994) 143–154. doi:10.1016/0038-092X(94)90064-7.
- [58] A. Sharma, V. V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renew. Sustain. Energy Rev*. 13 (2009) 318–345. doi:10.1016/j.rser.2007.10.005.
- [59] D. Lefebvre, F.H. Tezel, A review of energy storage technologies with a focus on adsorption thermal energy storage processes for heating applications, *Renew. Sustain. Energy Rev*. 67 (2017) 116–125. doi:10.1016/j.rser.2016.08.019.
- [60] L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. De Gracia, A.I. Fernández, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev*. 15 (2011) 1675–1695. doi:10.1016/j.rser.2010.11.018.
- [61] A.F. Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev*. 12 (2008) 2438–2458. doi:10.1016/j.rser.2007.06.009.
- [62] F. Schaubé, L. Koch, A. Wörner, H. Müller-Steinhagen, A thermodynamic and kinetic study of the de- and rehydration of Ca(OH)<sub>2</sub> at high H<sub>2</sub>O partial pressures for thermo-chemical heat storage, *Thermochim. Acta*. 538 (2012) 9–20. doi:10.1016/j.tca.2012.03.003.
- [63] R.M. Reddy, N. Nallusamy, T. Hariprasad, K.H. Reddy, G.R. Reddy, Solar energy based thermal energy storage system using phase change materials, *Int. J. Renew. Energy Technol*. 3 (2012) 11. doi:10.1504/ijret.2012.043905.
- [64] S. Marsah, Tri, Simulasi pelelehan dan pembekuan pada phase change material di dalam pemanas air tenaga surya dengan menggunakan metode perhitungan komputasi dinamik, (2014).
- [65] F. Agyenim, N. Hewitt, The development of a finned phase change material (PCM) storage system to take advantage of off-peak electricity tariff for improvement in cost of heat pump operation, *Energy Build*. 42 (2010) 1552–1560. doi:10.1016/j.enbuild.2010.03.027.

- [66] A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Lázaro, P. Dolado, B. Zalba, L.F. Cabeza, State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1-Concepts, materials and modellization, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (2010) 31–55. doi:10.1016/j.rser.2009.07.035.
- [67] D. Zhou, C.Y. Zhao, Y. Tian, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, *Appl. Energy.* 92 (2012) 593–605. doi:10.1016/j.apenergy.2011.08.025.
- [68] S.E. Kalnæs, B.P. Jelle, Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities, Elsevier B.V., 2015. doi:10.1016/j.enbuild.2015.02.023.
- [69] J. Gasia, L. Miró, A. de Gracia, C. Barreneche, L.F. Cabeza, Experimental evaluation of a paraffin as phase change material for thermal energy storage in laboratory equipment and in a shell-and-tube heat exchanger, *Appl. Sci.* 6 (2016). doi:10.3390/app6040112.
- [70] S.D. Sharma, K. Sagara, Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review, *Int. J. Green Energy.* 2 (2005) 1–56. doi:10.1081/ge-200051299.
- [71] S. Talukdar, H.M.M. Afroz, M.A. Hossain, M.A. Aziz, M.M. Hossain, Heat transfer enhancement of charging and discharging of phase change materials and size optimization of a latent thermal energy storage system for solar cold storage application, *J. Energy Storage.* 24 (2019) 100797. doi:10.1016/j.est.2019.100797.
- [72] N. Nallusamy, S. Sampath, R. Velraj, Experimental investigation on a combined sensible and latent heat storage system integrated with constant/varying (solar) heat sources, *Renew. Energy.* 32 (2007) 1206–1227. doi:10.1016/j.renene.2006.04.015.
- [73] M. Esen, H. Esen, Experimental investigation of a two-phase closed thermosyphon solar water heater, *Sol. Energy.* 79 (2005) 459–468. doi:10.1016/j.solener.2005.01.001.
- [74] A. Jaelani, M P RA Renewable energy policy in Indonesia: Scientific signs of the Qur'an and its implementation in Islamic economics, (2017) 1–19.
- [75] Gede Widayana, PEMANFAATAN ENERGI SURYA Oleh, J. Pendidik. Teknol. Dan Kejuru. Vol.9 (2012) 37–46.
- [76] W. Handini, *Performa Sel Surya*, 2008.
- [77] M.S. Boedoyo, Potensi dan Peranan PLTS sebagai Energi Alternatif Masa Depan di Indonesia, *J. Sains Dan Teknol. Indones.* 14 (2012) 146–152.
- [78] T.T. Gultom, Pemanfaatan Photovoltaic Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Surya, *J. Mudira Indure.* 1 (2015) 33–42.
- [79] J.A. Mazer, J.A. Mazer, An Overview of Solar Cell Technology, *Sol. Cells An Introd. to Cryst. Photovolt. Technol.* (1997) 1–19. doi:10.1007/978-1-4613-0475-3\_1.
- [80] D. Wei, Dye sensitized solar cells, *Int. J. Mol. Sci.* 11 (2010) 1103–1113. doi:10.3390/ijms11031103.
- [81] R.A. Lubis, A.R. Noviyanti, Y.P. Budiman, R. Hanapratwi, I. Rahayu, Pengaruh Pelapisan Xantofil Pada Sel Surya Silikon Terhadap Peningkatan Tegangan Dan Arus Listrik, *Chim. Nat. Acta.* 4 (2016) 111. doi:10.24198/cna.v4.n3.11087.
- [82] R. Rusman, Pengaruh Variasi Beban Terhadap Efisiensi Solar Cell Dengan Kapasitas 50 Wp, Turbo *J. Progr. Stud. Tek. Mesin.* 4 (2017). doi:10.24127/trb.v4i2.75.

- [83] Rahmadwati, S.N. Sari, E. Maulana, A. Sabarudin, Optical sensor based on dye sensitized solar cell (DSSC), *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.* 12 (2018) 685–690. doi:10.11591/ijeecs.v12.i2.pp685-690.
- [84] K. Ranabhat, L. Patrikeev, A.A. evna Revina, K. Andrianov, V. Lapshinsky, E. Sofronova, An introduction to solar cell technology, *J. Appl. Eng. Sci.* 14 (2016) 481–491. doi:10.5937/jaes14-10879.
- [85] K. Ebrahim, *Dye Sensitized Solar Cells - Working Principles, Challenges and Opportunities*, *Sol. Cells - Dye. Devices.* (2011). doi:10.5772/19749.
- [86] A.N.B. Zulkifili, T. Kento, M. Daiki, A. Fujiki, The Basic Research on the Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC), *J. Clean Energy Technol.* 3 (2015) 382–387. doi:10.7763/jocet.2015.v3.228.
- [87] K. Kakiage, Y. Aoyama, T. Yano, K. Oya, J.I. Fujisawa, M. Hanaya, Highly-efficient dye-sensitized solar cells with collaborative sensitization by silyl-anchor and carboxy-anchor dyes, *Chem. Commun.* 51 (2015) 15894–15897. doi:10.1039/c5cc06759f.
- [88] A. Mohammad Bagher, Types of Solar Cells and Application, *Am. J. Opt. Photonics.* 3 (2015) 94. doi:10.11648/j.ajop.20150305.17.
- [89] U. Wibawa, A. Darmawan, PENERAPAN SISTEM PHOTOVOLTAIK SEBAGAI SUPLAI DAYA LISTRIK BEBAN PERTAMANAN, *Eeccis. II* (2008) 26–37.
- [90] J.A. Anta, E. Guille, *ZnO-Based Dye-Sensitized Solar Cells*, (2012).