

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Tinjauan Pustaka

##### 2.1.1. PATS Aliran *Thermosyphon*

Aliran *thermosyphon* mengandalkan perbedaan temperatur antara air yang berada pada kolektor dan tangki. Penelitian telah banyak dilakukan untuk mengoptimalkan kinerja sistem PATS yang menggunakan aliran *thermosyphon*. Kristanto dan Laeyadi (2000) membuat suatu sistem PATS dengan aliran *thermosyphon* menggunakan sebuah kolektor berbentuk prisma, air digunakan sebagai HTF. Dalam pengujian yang dilakukan, prinsip dasar dari penggunaan kolektor berbentuk prisma bertujuan agar asupan energi termal yang diterima lebih maksimal. Kolektor dibentuk pada kedua sudutnya memiliki kemiringan  $45^\circ$ . Data yang didapat menunjukkan kesetabilan nilai dari energi termal selama proses *charging* berlangsung antara pukul 9 - 12 siang. Namun angka tersebut menurun drastis saat suhu melewati temperatur maksimum. Dalam pengujian ini tidak menggunakan PCM. Sistem TES pun tidak berjalan dengan baik karena sistem tidak mampu menyimpan energi termal terlalu lama.

Fachrizar dan Mustafa (2005) membuat PATS dengan kategori kelas IV. Capaian temperatur air dari pengujian dinilai cukup baik. Hanya dalam waktu 2 jam sudah mencapai suhu maksimum, namun selang waktu 1 jam kemudian terjadi penurunan yang *signifikan*. Penurunan temperatur yang terjadi berkisar 10,4% pada aliran *thermosyphon* dengan rugi-rugi panas dalam tangki mencapai  $0,77 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Penurunan temperatur menunjukkan rugi - rugi termal pada tangki masih cukup besar. namun pada efisiensi rata - rata dari PATS yang dibuat berkisar 50-60% menunjukkan PATS yang telah dirancang masih terkatagorikan baik.

Sidopekso (2011) melakukan suatu studi dengan meneliti PATS dengan menggunakan aliran *thermosyphon*. Untuk menguji unjuk kerja yang dapat dihasilkan dari konversi pemanfaatan energi matahari. Temperatur maksimum air

yang berkisar 60°C pada keadaan cuaca cerah. Penelitiannya masih terkendala oleh kebocoran yang terjadi pada ruang kolektor karena isolasi yang belum sempurna.

### 2.1.2. Penggunaan PCM Pada Sistem PATS

Lee dkk (2006) melakukan studi eksperimental penggunaan PCM pada sistem PATS *thermosyphon* dua fase. Pengujiannya menggunakan *tricosane* (lilin *paraffin 116*), air, dan *natrium asetat* ( $\text{NaCH}_3\text{CO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) untuk mempelajari perilaku termal yang terjadi. *Natrium asetat* digunakan sebagai bahan penyimpan energi. Hasil dari percobaan penggunaan PCM pada PATS tipe *thermosyphon* dua fase menunjukkan bahwa penggunaan *tricosane* memberikan banyak keuntungan. Efisiensi biaya dari penggunaan PCM mencapai angka optimal, di mana kinerja debit di bawah 40% rasio pengisi alkohol dan *tricosane* yang digunakan sebagai penyimpan energi panas mencapai nilai optimum 73%, dan efisiensi debit optimumnya 81%. Hal ini membuktikan penggunaan PCM pada sistem PATS sangatlah menguntungkan.

Toruan dkk (2013) menggunakan *stearic acid* sebagai PCM pada sistem PATS. Dalam pengujiannya, sistem PATS dibuat 2 buah. Yaitu satu PATS menggunakan PCM dan yang kedua tanpa menggunakan PCM. Titik leleh dari *stearic acid* pada pengujiannya terjadi pada suhu 55,1°C. Pengujiannya mendapatkan hasil bahwa penggunaan PCM *stearic acid* jauh lebih unggul. Hal ini terjadi karena kalor *laten* yang diperoleh dari zat pemanas lebih tinggi, jika dibandingkan dengan kalor *sensible*. Zat yang dipanaskan oleh *stearic acid* menutupi keseluruhan luas permukaan luar pipa yang dilalui air. *Stearic acid* yang meleleh adalah wujud perubahan fasa dengan perpaduan kalor *laten* dan *sensible* yang cukup besar.

Pengujian kinerja PATS lainnya dilakukan oleh Muhammad (2014). Model yang dibuat menggunakan aluminium dengan ketebalan 5 mm dengan diameter 360mm dan tinggi 1350 mm. Pada bagian dalam alat penukar kalor dipasang pipa aluminium berdiameter 20 mm. Material PCM yang dipilih sebagai penyimpanan energi termal adalah *beeswax* dan *paraffin*. Hasil dari pengujian menyatakan PCM yang digunakan *beeswax* dan *paraffin* meleleh pada suhu 45-65°C. Penggunaan

material PCM jenis ini mampu mempertahankan temperatur kisaran 40°C hingga 45°C selama 4,5 jam. Kesimpulan penelitiannya adalah penggunaan *beeswax* dan *paraffin* sebagai PCM mampu meningkatkan dan mempertahankan kinerja sistem PATS.

### 2.1.3. Penggunaan *Paraffin wax* Sebagai PCM Pada Sistem PATS

*Paraffin wax* memiliki kualifikasi yang baik untuk digunakan sebagai PCM sebagaimana telah dikemukakan Sharma (2002) tentang keunggulan *paraffin wax* sebagai PCM pada sistem PATS. Trp (2005) dalam pengujiannya menggunakan *paraffin wax* sebagai PCM. *Paraffin* yang digunakan RT30 dengan tangki vertikal berisi kapsul PCM. Titik leleh PCM yang dipilih cukup berfungsi dengan baik. Kecepatan solidifikasi yang terjadi adalah konstan.

Najib dan Suhanan (2013) menggunakan *paraffin wax* (RT52) sebagai PCM pada PATS aliran *thermosyphon* dengan kapasitas tangki 31,27 liter dan menggunakan sistem kapsul untuk penempatan PCM. Pengujian alat berlangsung selama proses *charging*. Prinsip kerjanya mengandalkan laju aliran *thermosyphon*. Pengujian dilakukan selama 340 menit selama proses *charging*, didapatkan hasil yaitu sistem PATS dapat menyimpan energi termal akumulatif sebesar 3,95 MJ. Temperatur rata-rata untuk HTF adalah 65,39°C dan temperatur rata-rata PCM 67,58°C.

## 2.2. Landasan Teori

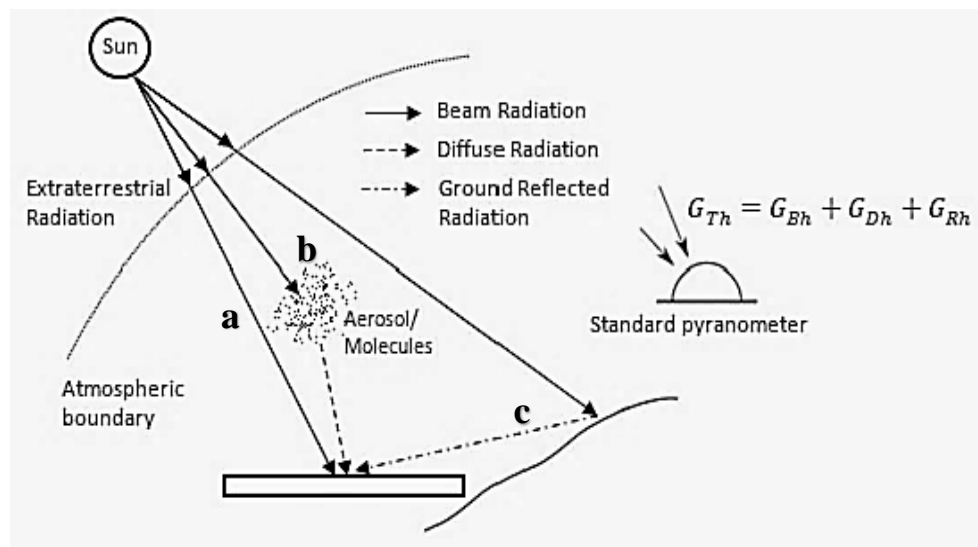
### 2.2.1. Radiasi Matahari

Matahari merupakan pusat tata surya. Diameter keseluruhannya sebesar  $1,39 \times 10^9$  m dan jarak dari bumi  $1,5 \times 10^{11}$  m. Temperatur permukaan efektifnya sebesar 5762 K, temperatur pusat dari matahari sebesar  $8 \times 10^6$  -  $40 \times 10^6$  K dan densitasnya diperkirakan 100 kali lebih besar dari air (Duffie dan Beckman, 1980). Matahari dapat dikatakan sebagai sebuah reaktor fusi, dimana kinerjanya berlangsung secara kontinu mengubah hidrogen menjadi helium. Energi yang dihasilkan matahari berasal dari reaksi fusi total energi yang dihasilkan permukaan

matahari. Energi yang dihasilkan permukaan mencapai kisaran  $63 \text{ MW}/m^2$  memancar sembarang ke segala arah.

Matahari menghasilkan energi panas dan energi cahaya yang berguna bagi kelangsungan makhluk hidup yang berada di bumi. Matahari adalah induk dari sumber energi di bumi. Energi yang dihasilkan matahari tiap harinya pada kondisi cerah berkisar  $1000 \text{ W}/m^2$ . Energi matahari sebesar itu sebagian dipantulkan kembali ke angkasa luar (30%), dikonversikan menjadi energi panas (47%), dan sisanya digunakan sebagai sirkulasi kerja pada permukaan bumi (23%) (Manan, 2009).

Radiasi matahari dapat mencapai permukaan bumi melalui 3 cara yang berbeda seperti ditunjukkan pada gambar 2.1 di bawah ini.



Gambar 2.1. Cara radiasi mencapai bumi (Al Riza, 2011)

(a) Langsung, (b) Sebaran, (c) Pantulan.

a. Radiasi langsung (*direct radiation / beam radiation*)

Radiasi langsung ialah radiasi yang diterima oleh permukaan bumi langsung tanpa adanya perantara. Posisi dari sinar matahari sejajar dengan kedudukan bumi.

b. Radiasi tersebar (*diffuse radiation*)

Radiasi sebaran terjadi saat radiasi menuju permukaan bumi tidak langsung menuju bumi namun melalui perantara seperti angin, awan, aerosol.

c. Radiasi pantulan (*albedo*)

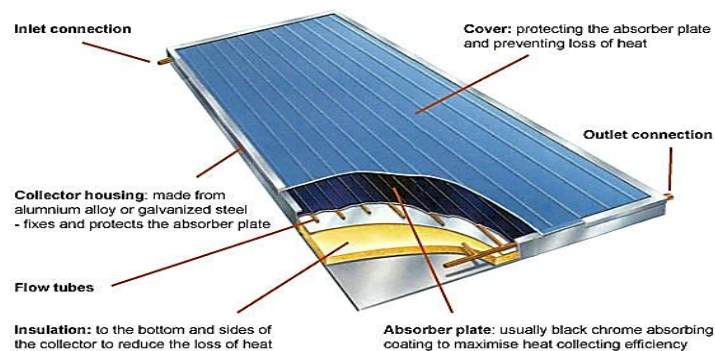
Radiasi pantulan adalah pancaran energi matahari yang dipantulkan oleh bumi yang tergantung pada kondisi lingkungan di suatu tempat itu misalkan efek rumah kaca, turun salju, dan lautan.

### 2.2.2. Sistem Pemanas Air Tenaga Surya

Pemanas air tenaga surya (PATS) merupakan teknologi pengaplikasian energi matahari yang tengah populer saat ini. Prinsip kerjanya bertumpu pada dua bagian utama yaitu kolektor, tangki, dan sistem perpipaan.

#### 1. Kolektor Surya

Kolektor surya berfungsi mengkonversikan energi matahari menjadi energi termal pada pelat absorber. Pipa air terdapat pada bagian pelat absorber sehingga energi termal dapat memanaskan air dalam pipa. Jenis kolektor surya bermacam – macam mulai dari pelat datar hingga pelat prisma. Kolektor yang umum digunakan pada sistem PATS adalah kolektor tipe pelat datar. Kolektor surya pelat datar mempunyai temperatur keluaran dibawah 95°C (Goswami, 1999) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2. Kolektor matahari tipe plat datar (Miller, 2016).

## 2. Tangki Penyimpanan

Tangki penyimpanan digunakan sebagai alat penyimpan air panas yang sebelumnya telah dinaikkan temperaturnya pada kolektor. Tangki penyimpanan terdiri dari pipa *inlet* air dingin dan pipa *outlet* air panas. Bahan material yang biasa digunakan sebagai tangki penyimpanan diantaranya baja karbon, baja campuran, dan baja galvanis. Proses pertukaran kalor didalam tangki memungkinkan adanya rugi-rugi termal (*head loss*) yang terjadi terhadap lingkungan. Oleh sebab itu perlu adanya insulasi pada permukaan luar tangki dengan menggunakan bahan yang mampu meredam energi panas keluar (isolator) seperti contoh *glass wool*. Contoh tangki penyimpanan pada Gambar 2.3.

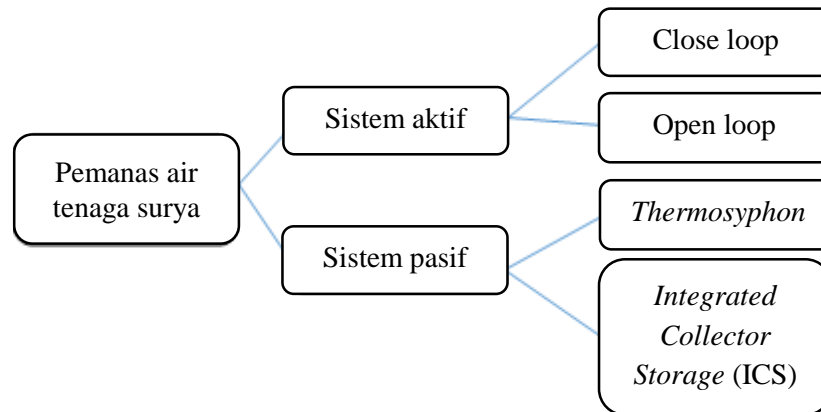


Gambar 2.3. Tangki penyimpanan (Anonim, 2013)

## 3. Sistem Perpipaan

Sistem perpipaan merupakan komponen utama yang berfungsi sebagai penghubung pada sistem PATS. Pipa penghubung pada PATS berupa pipa turun air dingin (*down pipe*), pipa naik air panas (*raiser pipe*) yang menghubungkan kolektor dengan tangki. Instalasi pada sistem perpipaan sangat mempengaruhi kinerja sistem PATS oleh sebab itu perlu diperhatikan pada pemasangannya baik jarak pemasangan, ketinggian, sudut elevasinya, dan komponen penyambungannya.

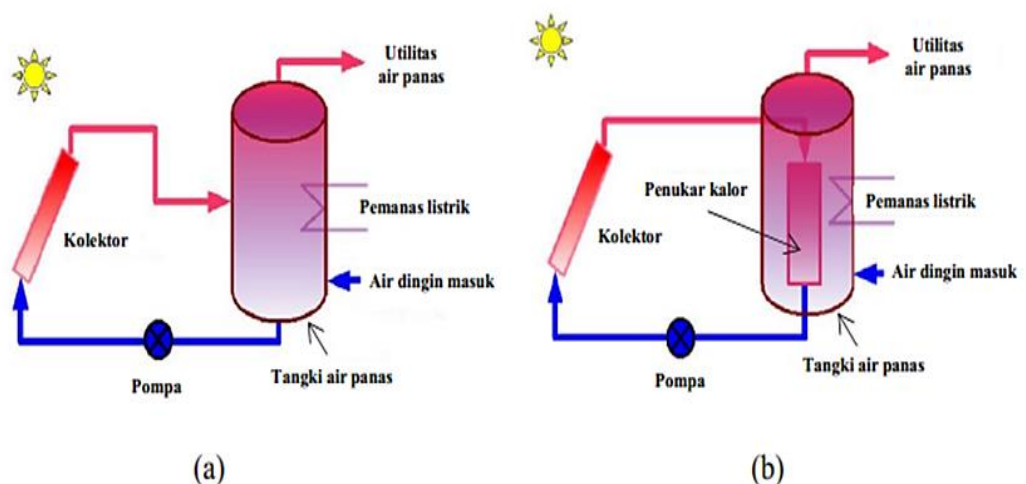
PATS dapat diklasifikasikan menjadi dua sistem, yaitu sistem aktif dan sistem pasif seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Sistem pemanas air tenaga surya (Jamar, 2016)

#### a. Sistem Aktif

PATS sistem aktif adalah sistem pemanas air yang menggunakan energi radiasi matahari sebagai pemanas. Sistem aktif membutuhkan penggerak fluida untuk menjalankan sistemnya. Jenis ini digolongkan menjadi sistem aktif-langsung (*direct/open loop*) dan aktif-tak langsung (*Indirect/close loops*) seperti pada Gambar 2.5 berikut.



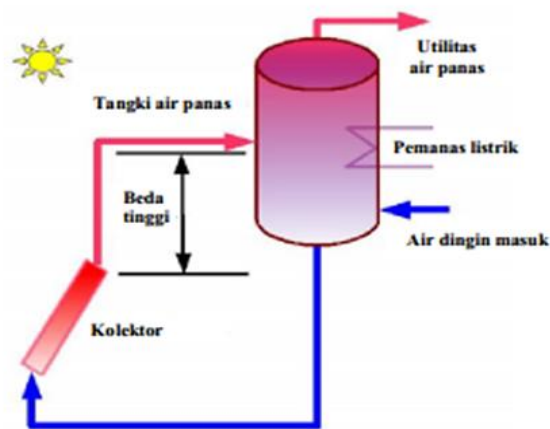
Gambar 2.5. Sistem PATS (a) aktif langsung

(b) aktif tidak langsung (Dwivedi, 2009)

PATS sistem aktif langsung adalah sistem dimana kolektor memindahkan kalor secara langsung ke air dalam tangki tanpa adanya alat bantu penukar kalor. Sedangkan untuk PATS sistem aktif tidak langsung, pemindahan kalor ke air terjadi di dalam tangki.

#### b. Sistem Pasif

Sistem pasif memiliki prinsip kerja yaitu menggunakan aliran alami dengan memanfaatkan perbedaan temperatur pada bagian atas dan bawah kolektor. Air yang memiliki temperatur tinggi di dalam kolektor akan naik menuju tangki. Sedangkan air yang bersuhu rendah dalam tangki akan turun menuju kolektor. Sistem yang bekerja dengan prinsip ini disebut aliran *thermosyphon*. Instalasi ketinggian tangki sangat berpengaruh pada sistem ini supaya proses *thermosyphon* berjalan dengan baik. Contoh dari sistem PATS *thermosyphon* dapat dilihat pada Gambar 2.6 berikut.



Gambar 2.6. Sistem PATS *thermosyphon* (Dwivedi, 2009)

Dalam studinya, Duffle (1991) menyatakan persamaan energi termal yang diserap kolektor seperti pada persamaan (2.1)

$$E_i = I_o A \quad (2.1)$$

$E_i$  adalah energi masuk yang diterima kolektor (W),  $I_o$  adalah intensitas radiasi matahari ( $W/m^2$ ), dan  $A$  merupakan luas dari permukaan kolektor ( $m^2$ ).



### 2.2.3. Aliran *Thermosyphon*

Aliran *thermosyphon* merupakan aliran alami yang terjadi karena adanya konveksi alami yang berlangsung pada kolektor dan tangki penyimpanan. Hal ini dapat terjadi akibat adanya perbedaan densitas. Air yang memiliki temperatur yang tinggi memiliki massa yang lebih ringan, dibandingkan air yang bertemperatur rendah. Dari konsep inilah sirkulasi terjadi pada kolektor menuju tangki. Dimana air yang bertemperatur lebih tinggi naik dari kolektor menuju tangki. Sedangkan air pada tangki yang bertemperatur rendah turun menuju kolektor. Hal tersebut terus terjadi selama kolektor menerima energi termal dari radiasi matahari (Dwivedi, 2009). Sirkulasi akan terus berlangsung selama ada perbedaan temperatur air di dalam tangki dan kolektor berbeda. Sistem *Thermal Energy Storage*

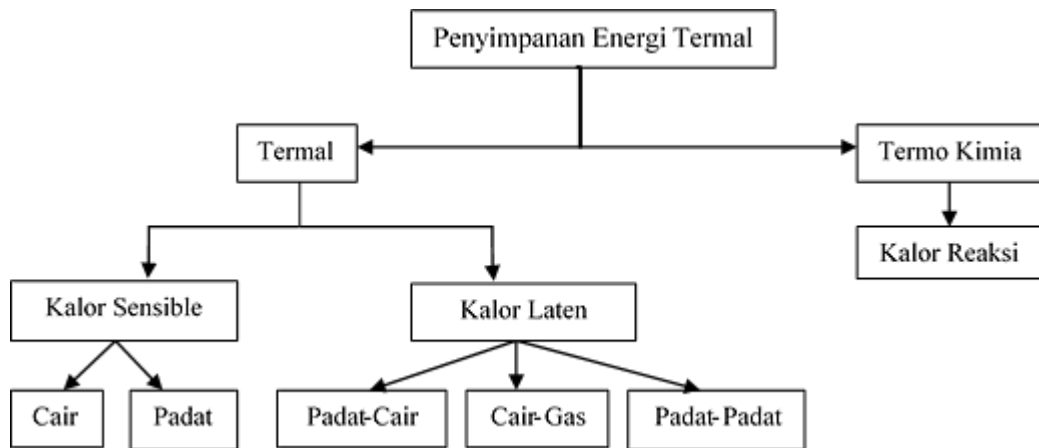
### 2.2.4. Sistem *Thermal Energi Storage*

#### 2.2.4.1. Penyimpanan Energi

Penyimpanan energi adalah suatu upaya untuk mengisi kesenjangan waktu penggunaan energi sebelum digunakan. Energi potensial yang berupa energi kimia, listrik, dan lainnya atau energi termal yang berasal dari radiasi matahari ataupun panas bumi dapat disimpan.

#### 2.2.4.2. *Thermal Energy Storage*

*Thermal energi storage* (TES) adalah bagian dari konsep penyimpanan energi. Penyimpanan bersifat sementara guna dimanfaatkan pada waktu tertentu. Penggunaan TES pada PATS memiliki potensi guna meningkatkan efisiensinya. Aplikasi dari TES umumnya dimanfaatkan guna menangani ketidaksesuaian yang terjadi, baik pemakaian secara umum dan persediaan energi yang dibutuhkan. pada Gambar 2.7 dapat dilihat penyimpanan energi termal dan perubahan fasa dari dua jenis material TES.



Gambar 2.7. Penyimpanan energi termal (Sharma dkk, 2010)

TES dibagi menjadi dua bagian *sensible heat storage* (SHS) dan *latent heat storage* (LHS).

a) *Sensible Heat Storage*

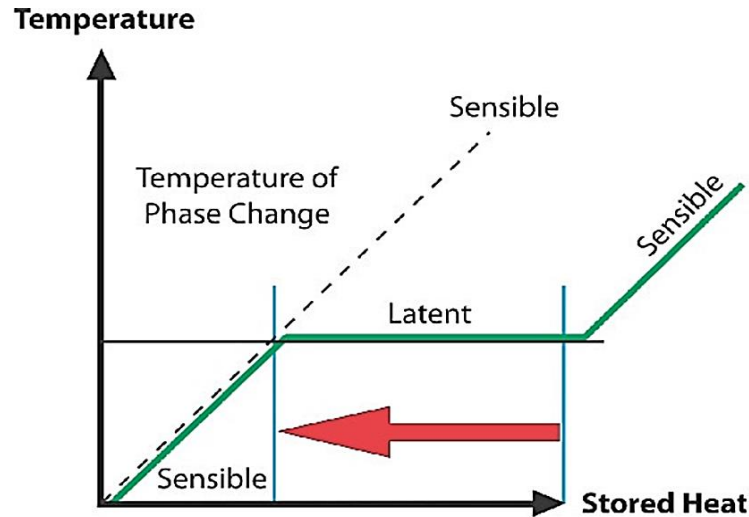
Gultom (2013) berpendapat *sensible heat storage* (SHS) adalah bentuk dari energi termal yang tersimpan berupa perbedaan temperatur. Prinsip kerjanya berdasarkan pada kapasitas kalor dan perubahan fase material selama proses pengujian berlangsung baik itu proses *charging* maupun *discharging*. Contoh material yang merupakan SHS seperti batu, beton, dan air. Umumnya material SHS yang paling sering digunakan adalah air. Persamaan yang menyatakan kapasitas energi yang mampu diserap SHS terlihat pada persamaan 2.2

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mc_p dT = mc_{ap}(T_f - T_i) = \rho Vc_{ap}(T_f - T_i) \quad (2.2)$$

Q menyatakan jumlah kalor yang mampu diserap material SHS dengan satuan joule, perhitungan kalor jenis rata-rata yang dinyatakan dengan ( $c_{ap}$ , J/kg. °C), massa jenis material SHS ( $\rho$ , kg/m<sup>3</sup>), volume tangki penyimpanan V (m<sup>3</sup>) temperatur akhir  $T_f$  (°C), dan temperatur awal  $T_i$  (°C) (Sharma, 2009).

b) *Latent Heat Storage (LHS)*

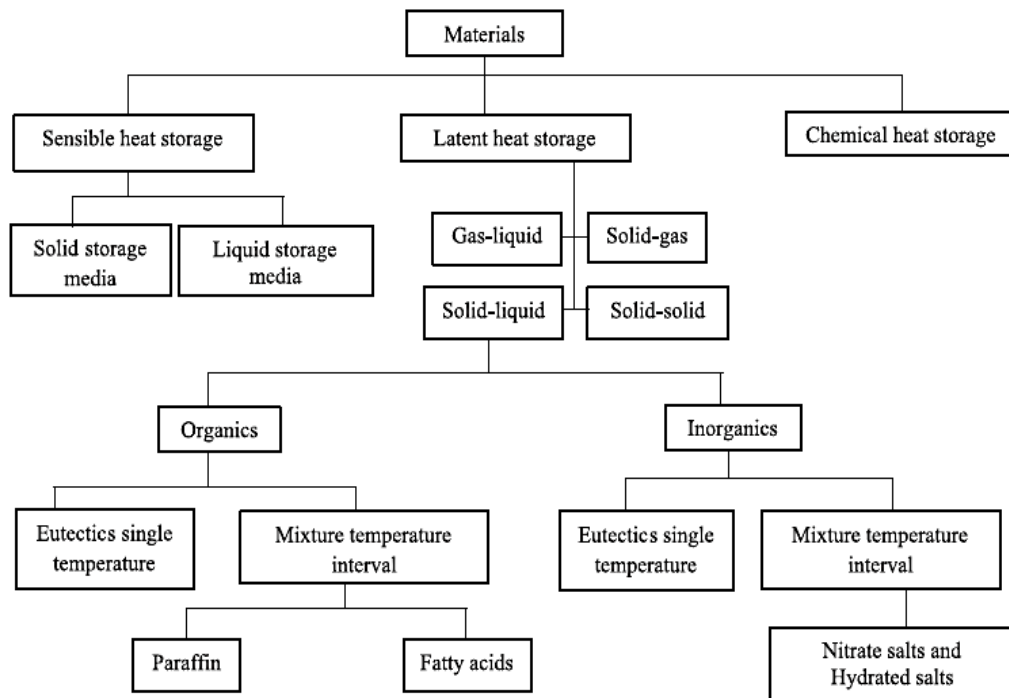
Kinerja dari LHS berdasarkan perubahan fase yang terjadi untuk menyerap dan melepaskan panas dari cair ke gas atau padat ke cair dan sebaliknya. Material yang digunakan pada LHS disebut PCM. Proses perubahan fase material LHS ketika dipanaskan antara padat, cair, dan gas menyimpan lebih banyak panas jika dibandingkan material SHS. Ketika material LHS masuk proses pendinginan kembali ke keadaan semula heat fusion yang terjadi berkisar 80 hingga 100 kali lebih besar dari panas yang dibutuhkan untuk memanaskannya. Kapasitas penyimpanan sama dengan entalpi perubahan fase saat temperatur pada proses perubahan fase berlangsung (Faninger, 2007). Energi yang tersimpan selama proses berlangsung dengan adanya sistem penyimpanan energi dapat digunakan sewaktu waktu ketika diperlukan. Skema kerja LHS dapat dilihat pada Gambar 2.8 dimana proses penyimpanan dan pelepasan energi termal material LHS sangat stabil.



Gambar 2.8. Skema kerja LHS sebagai penyimpan panas (Dwivedi, 2009)

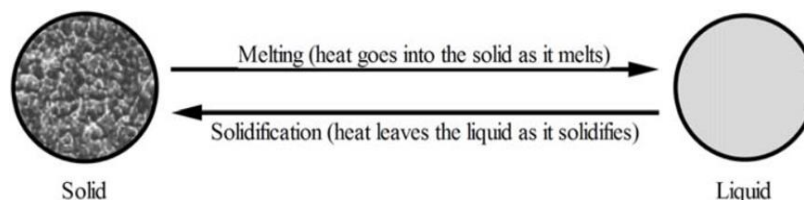
### 2.2.5. Phase Change Material (PCM)

PCM adalah hasil rekayasa ilmiah untuk penyimpanan kalor laten. PCM pada prinsip kerjanya memiliki dua fase dari padat (*solid*) menjadi cair (*melting*). Berikut adalah klasifikasi dari material PCM disajikan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Klasifikasi material PCM (Gil, dkk 2010)

Penyerapan energi berlangsung hingga mencapai titik lelehnya pada proses *charging*, sedangkan pelepasan energi terjadi hingga kembali pada keadaan semula dari cair ke padat (*solidification*) terjadi selama proses *discharging*. Proses tersebut dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 2.10. Perubahan PCM dari padat ke cair (Gil, dkk 2010)

Secara umum PCM memiliki dua klasifikasi organik dan non-organik. Pemilihan material PCM sangat menentukan pada pemanfaatannya. Dengan memperhatikan faktor yang ada untuk penggunaan PCM yang baik pada PATS adalah jenis organik dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1. Perbandingan PCM organik dan non organik (Cabeza dkk, 2011)

Item	Non organik	Organik
• Keuntungan	• Densitas penyimpana energi tinggi, konduktifitas termal tinggi, tidak mudah terbakar	• Stabil secara termal dan kimia, perilaku termalnya bagus, tidak korosif, subcooling tidak ada/kecil
• Kelemahan	• Perlu pendingin tambahan, korosif, fase tidak stabil	• Konduktivitas termalnya rendah, densitas rendah, titik leleh rendah, mudah terbakar, mudah menguap
• Metode yang digunakan guna meningkatkan unjuk kerja	• Dicampur dengan agen <i>nucleating</i> dan <i>thickening, lapis tipis</i> tersusun secara horisontal, dipasang pengaduk mekanikal	• Pemberian zat aditif yang mempunyai konduktivitas termal tinggi, zat aditif penghambat kebakaran

Penggunaan PCM pada suatu sistem penyimpanan kalor laten sangat perlu memperhatikan karakteristik sifat yang ada didalamnya baik sifat termal, fisik, kimia, dan tentunya dari segi ekonomi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.2

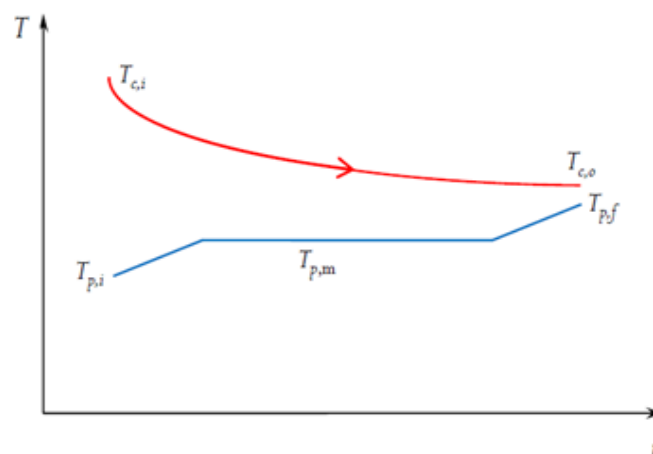
Tabel 2.2 Karakteristik PCM berdasarkan sifat-sifatnya (Regin, dkk 2008)

Sifat termal	Sifat fisik	Sifat kimia	Faktor ekonomi
• Temperatur perubahan fasa cocok untuk pengoperasian alat	• Densitas tinggi	• Stabil secara kimia	• Tersedia banyak
• Kalor laten tiap unit massa tinggi	• Perbedaan densitas rendah selama perubahan fasa berlangsung	• Tidak ada dekomposisi kimia	• Murah
• Kalor spesifik tinggi	• Pembekuan tidak memerlukan <i>supercooling</i>	• Cocok dengan material kontainer	
• Konduktivitas termal tinggi		• Tidak beracun dan tidak mudah terbakar dan tidak bersifat <i>explosive</i>	

PCM membutuhkan temperatur leleh yang sesuai berkisar 45-65°C. Diantara jenis material PCM organik yang masuk dalam klasifikasi tersebut adalah *paraffin wax*. *paraffin wax* memiliki spesifikasi khas dengan nilai densitas berkisar ~200 kJ/kg konduktivitas termalnya rendah (~0,2 W/m°C) temperatur leleh dari *paraffin wax* berkisar pada *range* 8-106°C tergantung pada jenis *paraffin wax*. Sifatnya yang relatif stabil dan efisiensinya yang cukup tinggi baik untuk pengaplikasian PATS.

#### 2.2.6. Proses *Charging*

Proses *charging* adalah proses selama penyerapan energi termal berlangsung. Dimana radiasi termal yang dihasilkan matahari ditangkap oleh kolektor, guna menaikkan temperatur HTF hingga terjadinya siklus pertukaran aliran air panas pada kolektor menuju tangki dan sebaliknya. Mula-mula temperatur HTF berada pada temperatur yang  $T_{c,i}$  (°C) dengan laju aliran massa  $\dot{m}_{ch}$  (kg/detik) menuju PCM. Temperatur awal dari PCM dinyatakan  $T_{p,i}$  (°C). Proses ini berlangsung hingga PCM mencapai titik leleh  $T_{p,m}$  (°C). Temperatur HTF akan berada diatas dari titik leleh dari PCM sehingga mempengaruhi kenaikan PCM menjadi  $T_{p,f}$  (°C). Akhir dari proses *charging* dinyatakan dengan  $T_{c,o}$  (°C) ilustrasi dari skema temperatur proses *charging* seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.2.9 berikut.



Gambar 2.12. Ilustrasi skema temperatur selama proses *charging*  
(Nadjib dan Suhanan, 2013)

Persamaan dari total kalor yang dihasilkan oleh HTF selama proses *charging* ( $Q_c, kW$ ) dan kalor jenis rata-rata HTF dinyatakan  $C_{p, ch}$  seperti yang tertera pada persamaan 2.3.

$$Q_c = \dot{m}_{ch} C_{p, ch} (T_{c, i} - T_{c, o}) \quad (2.3)$$

Untuk mendapatkan nilai  $C_p$  digunakan persamaan 2.4 dimana nilai T pada persamaan tersebut menyatakan temperatur rata-rata.

$$C_p(T) = 4.2174356 - 0.0056181625T + 0.0012992528T^{1.5} - 0.00011535353T^2 + 0.00000414964T^{2.5} \quad (2.4)$$

Nilai kalor sensible selama proses pemanasan dan pendinginan  $Q_s$  diperoleh dari persamaan 2.4 dimana temperatur pemanasan dinyatakan dengan  $\Delta H_m$  (°C), temperatur leleh terendah dinyatakan  $T_i$  (°C),  $T_h$  (°C) merupakan temperatur leleh tertinggi dan temperatur panas spesifik padat dinyatakan dengan  $C_{ps}$  (°C),  $C_{pL}$  (°C) merupakan temperatur panas spesifik cair, temperatur pendinginan  $T_{sc}$  (°C), dan temperatur pemanasan dinyatakan dengan  $T_{sh}$  (°C).

$$Q_s = \dot{m}_s [C_{ps}(T_i - T_{sc}) + \Delta H_m + C_{pL}(T_{sh} - T_h)] \quad (2.5)$$

Incropera dkk (2007) menyatakan persamaan untuk menghitung koefisien perpindahan kalor konveksi selama proses *charging* ( $Q_{konv}$ ) dibuat seperti pada persamaan 2.5 berikut.

$$Q_{konv} = hA (T_{\infty} - T_k) \quad (2.6)$$

Dimana h menunjukkan koefisien perpindahan kalor konveksi ( $W/m^2, ^\circ C$ ) dan A adalah permukaan dimana perpindahan kalor terjadi ( $m^2$ ), sedangkan temperatur air panas dan temperatur permukaan kapsul dinyatakan dengan  $T_{\infty}$ ,  $T_k$  dengan satuan  $^\circ C$ . Diameter hidrolis salah satu yang dapat mempengaruhi nilai

koefisien dari perpindahan kalor konveksi pada alat penukar kalor berjenis selongsong dan pipa.

### 2.2.7. Efisiensi Pengumpulan Kumulatif

Efisiensi pengumpulan kolektif merupakan perbandingan jumlah kalor pada tangki terhadap jumlah dari keseluruhan energi radiasi matahari yang diterima selama kurun waktu yang sama. Perekaman data dimulai dari awal pengoperasian hingga waktu yang telah ditentukan sebelumnya. Esen, dkk (2005) merumuskan besar dari efisiensi pengumpulan kolektif dengan persamaan 2.7 berikut.

$$\eta = \frac{m_w c_{p,w} (T_{w,2} - T_{w,1})}{Q_{incident}} = \frac{m_w c_{p,w} (T_{w,2} - T_{w,1})}{A_c \int_1^2 I_c dt} \times 100 \quad (2.7)$$

Temperatur awal dan akhir dinyatakan dengan  $T_{w,1}$  dan  $T_{w,2}$ . Sedangkan energi matahari yang diterima kolektor adalah  $Q_{incident}$  dan t menyatakan waktu selama proses berlangsung.