

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI**

#### **2.1. Tinjauan Pustaka**

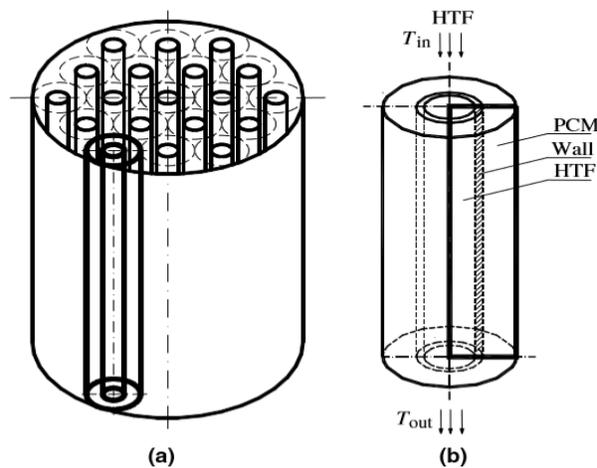
Penelitian untuk mengetahui hasil dari perpindahan kalor telah banyak dilakukan oleh beberapa peneliti, salah satunya dengan menggunakan teknologi *Solar Water Heater* (SWH). Beberapa penelitian sudah dilakukan mengenai performansi *Solar Water Heater* jenis kolektor plat datar dengan penambahan *thermal energy storage* (TES) oleh Jufrizal, dkk (2014). Penelitian tersebut menggunakan media *phase change material* (PCM) yaitu berupa *paraffin wax*. Studi kasus tersebut bertujuan untuk mengetahui efisiensi thermal dan massa dari *paraffin wax* yang melebur pada saat proses *charging*, serta bertujuan untuk mengetahui hasil efisiensi thermal pada proses *discharging*.

Marsah (2014) meneliti simulasi pelelehan dan pembekuan *phase change material* (PCM) yang terletak ada dibagian dalam tangki dengan menggunakan metode perhitungan komputasi dinamik. Aplikasi yang digunakan untuk penelitian adalah Ansys Fluent 12.0 dan menggunakan *phase change material* (PCM) jenis *stearic acid*. Dari hasil yang disimulasikan pada proses *discharging* sempurna dan berlangsung selama kurang lebih 8 jam setelah dipanaskan selama 6 jam. Namun pada penelitian ini hanya mensimulasikan gambar dalam bentuk 2D dengan ukuran 1025 x 160 mm. Menurut peneliti simulasi 2D atau 3D tidak masalah, namun akan lebih detail dan baik dalam mendapatkan hasil apabila menggunakan simulasi 3D.

Penelitian tentang penggunaan material *latent heat storage* (LHS) yang disebut dengan *phase change material* (PCM) pada pemanas air tenaga surya. Pada umumnya penyimpanan energi thermal menggunakan air. Material *latent heat storage* (LHS) digunakan sebagai peningkat densitas energi pada system oleh Najib, M (2016). Penelitian ini menggunakan kolektor matahari dan tangki *thermal energy storage* (TES) yang dipasang pada sisi atas kolektor secara horizontal. Tangki TES yang didalamnya terdiri dari beberapa pipa kapsul yang berisi *paraffin wax* yang dapat mengendalikan

penurunan dari efisiensi yang diperoleh dari pengumpulan energi pada saat intensitas radiasi cahaya dari matahari yang mulai menurun.

Anica Trp (2005) melakukan eksperimen berupa dua buah tabung konsentris yang terbuat dari bahan tembaga dan kuningan dengan panjang 1 meter. Tabung bagian dalam terbuat dari bahan tembaga dengan diameter 0,033 m untuk bagian dalam dan 0,035 untuk bagian luar. Sedangkan untuk tabung bagian luar menggunakan bahan kuningan dengan diameter dalam 0,128 m dan 0,133 m untuk bagian luar. Eksperimen bertujuan untuk mengurangi adanya perpindahan panas yang ada di lingkungan sekitar. *Heat transfer* yang diidarkan ke dalam seluruh tangki berupa air dengan ruang antara tabung tembaga dan tabung kuningan dipenuhi PCM/*paraffin wax* RT 30.



Gambar 2. 1. (a) sistem energi penyimpanan laten  
(b) unit penyimpanan energi thermal (Sumber : Anica Trp, 2005)

Regin dkk (2009) melakukan analisis mengenai perilaku dari pemaketan (*packed bed*) secara numerik pada system *thermal energy storage* (TES) kalor laten pada Pemanas Air Tenaga Surya (PATS). Pada analisis ini pemaketan menggunakan kapsul bola yang berisi *paraffin wax* sebagai media *phase change material* (PCM). Pada saat proses *discharging* membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan pada saat proses *charging*. Hal ini disebabkan karena rendahnya koefisien perpindahan kalor pada saat proses membekuan yang terjadi pada *phase change material* (PCM). Semakin tinggi

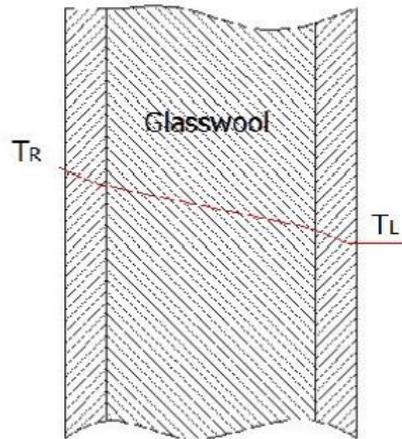
temperatur inlet *heat transfer fluid* (HTF) yang didapatkan maka semakin cepat juga waktu yang dibutuhkan untuk proses *charging*, begitu juga sebaliknya semakin rendah temperature inlet *heat transfer fluid* (HTF) yang didapatkan maka pembekuan pada *phase change material* (PCM) akan semakin cepat. Radius yang kecil juga dapat mempengaruhi pada saat proses *charging* dan *discharging*.

Penelitian tentang karakteristik dinamis dari sistem penyimpan panas matahari pada proses *discharging* menggunakan kapsul – kapsul berbentuk bola yang berisi *paraffin wax* (PCM) dikemukakan oleh *Shuangmao, dkk* (2011). *Paraffin* digunakan sebagai bahan perubahan fasa *phase change material* (PCM) dan air digunakan sebagai *heat transfer fluid* (HTF). Penelitian ini disimpulkan bahwa :

1. Laju pelepasan panas sangat tinggi dan akan berkurang secara cepat ketika mendekati *cooling stage*, serta laju pelepasan panas akan stabil pada *solidification cooling stage* hingga pada *solid cooling stage*.
2. Waktu yang diperlukan untuk pemadatan secara sempurna akan berkurang ketika laju aliran *heat transfer fluid* (HTF) meningkat, tetapi efek tidak begitu jelas jika laju aliran *heat transfer fluid* (HTF) melebihi 13 kg/menit.
3. Pengaruh dari rembesan pada *packed bed* tidak terlalu berpengaruh secara signifikan jika dibandingkan dengan temperature inlet *heat transfer fluid* (HTF) dan laju aliran.

Ilmi, A dkk (2014) melakukan penelitian tentang perancangan *thermal energy storage* (TES) pada kolektor surya berbentuk tabung silinder. Model kolektor surya pada perancangan ini adalah menggunakan jenis *batch*. Komponen utama dari kolektor surya ini adalah kaca penutup, TES, isolasi, dan rangka. Jenis kaca yang digunakan memiliki nilai konduktivitas thermal sebesar 1,3 W/m.K. dengan ukuran kaca 1,3 x 0,7 m. Perancangan wadah *thermal energy storage* (TES) ini mempertimbangkan konduktivitas material dan faktor korosif maka bahan yang sesuai digunakan adalah alumunium dengan tebal 1 mm dan wadah berbentuk tabung silinder dengan volume 0.03 m<sup>3</sup>, diameter tabung 22 cm serta tinggi tabung 0,8m. Perancangan isolasi dan rangka terdiri dari 3 lapisan yaitu, alumunium, glasswool, dan alumunium. Material ini berfungsi

supaya laju perpindahan panas dari ruang kolektor tidak keluar ke lingkungan. Berikut lapisan isolasi ditunjukkan pada gambar 2.1, serta bahan dan sifat isolasi ditunjukkan pada tabel 2.1.



Gambar 2. 2. Lapisan isolasi  
(Sumber: Ilmi,dkk 2014)

Penelitian tentang penyimpanan energi perubahan fasa dilakukan oleh Farid, M dkk (2004). *Latent heat storage* (LHS) adalah salah satu cara yang paling efisien untuk menyimpan energi panas. Metode *latent heat storage* (LHS) memberikan kepadatan penyimpanan yang tinggi, dengan perbedaan suhu yang lebih kecil antara menyimpan dan melepaskan panas. Terdapat beberapa contoh material perubahan fasa *phase change material* (PCM) yang meleleh dan mengeras pada berbagai suhu yakni *paraffin* dan garam terhidrasi. *Paraffin* memiliki kepadatan penyimpanan energi termal sedang dan konduktivitas termal yang rendah, sedangkan garam terhidrasi memiliki kepadatan penyimpanan energi dan konduktivitas termal yang lebih tinggi.

Penelitian yang dilakukan oleh Sukamta, dkk (2015) tentang *paraffin wax* adalah penyimpanan panas menggunakan PCM. PCM disini menggunakan *paraffin wax* yang dimasukan pipa tembaga dan disusun secara horizontal atau segaris. Sumber panas menggunakan sinar matahari melalui perantara kolektor yang dihadapkan secara langsung ke arah matahari. Hasil data temperature HTF dan PCM diambil saat proses *charging* selama 340 menit. Berdasarkan hasil tersebut disimpulkan bahwa PCM dapat

menyimpan kalor dengan baik jika memperhatikan isolasi dalam tangki, karena dapat meminimalisir rugi rugi termal yang terbuang.

Bellan, dkk (2014) melakukan penelitian tentang sistem penitimpanan energi termal dengan kapsul berisi *phase change material* (PCM) berbentuk bola. *phase change material* (PCM) yang digunakan yakni sodium nitrat dan sebagai *heat transfer fluid* (HTF) berupa minyak sintetik temperatur tinggi (*therminol 66*). Koefisien perpindahan panas dihitung berdasarkan proses perubahan fasa didalam kapsul. Peneliti menyelidiki pengaruh ukuran kapsul, suhu fluida, ukuran tangki, laju aliran fluida dan ketebalan isolasi dinding tangki terhadap kinerja sistem. Hasil yang diperoleh yakni waktu yang diperlukan PCM dalam proses *charging* lebih cepat daripada *discharging*, kecepatan *charging* dan *discharging* akan lebih cepat jika menggunakan kapsul yang lebih kecil, dan apabila suhu *fluida* meningkat maka zona temperatur leleh konstan dan zona pertukaran panas akan menurun. Hal ini dapat meningkatkan waktu yang diperlukan dalam *discharging* dan penggunaan total.

Tabel 2. 1. Ringkasan Tinjauan Pustaka

Penulis	Judul	Tujuan	Hasil
Jufrizal, dkk (2014)	Studi Eksperimental Performansi <i>Solar Water Heater</i> Jenis Kolektor Plat Datar dengan Penambahan <i>Thermal Energy Storage</i>	mengetahui efisiensi thermal dan massa dari <i>paraffin wax</i> yang terlebur pada saat proses <i>charging</i>	efisiensi thermal dan massa dari <i>paraffin wax</i> yang terlebur pada saat proses <i>charging</i> dan hasil efesiensi thermal pada proses <i>discharging</i>
Marsah (2014)	Simulasi Pelelehan dan Pembekuan pada <i>Phase Change Material</i> didalam Pemanas Air Tenaga Surya dengan Menggunakan Metode Perhitungan Komputasi Dinamik	meneliti simulasi pelelehan dan pembekuan <i>phase change material</i> (PCM) yang terletak ada dibagian dalam tangki dengan menggunakan metode perhitungan komputasi dinamik	hasil yang disimulasikan pada proses <i>discharging</i> sempurna dan berlangsung selama kurang lebih 8 jam setelah dipanaskan selama 6 jam. Namun pada penelitian ini hanya mensimulasikan gambar dalam bentuk 2D dengan ukuran 1025 x 160 mm
Najib, M (2016)	Penggunaan <i>Paraffin Wax</i> sebagai Penyimpan Kalor pada Pemanas Air Tenaga	Meneiliti tentang penggunaan material <i>latten heat storage</i> (LHS) yang disebut	Tangki TES yang didalamnya terdiri dari beberapa pipa kapsul yang berisi <i>paraffin</i>

	Matahari <i>Thermosyiphon</i>	dengan <i>phase change material</i> (PCM) pada pemanas air tenaga surya	wax yang dapat mengendalikan penurunan dari efisiensi yang diperoleh dari pengumpulan energi pada saat intensitas radiasi cahaya dari matahari yang mulai menurun
Anica Trp (2005)	<i>An Experimental and Numerical Investigation of Heat Transfer during Technical Grade Paraffin Melting and Solidification in a Shell-and-Tube Latent Thermal Energy Storage Unit. Solar Energy</i>	Melakukan eksperimental berupa dua buah tabung konsentris yang terbuat dari bahan tembaga dan kuningan.	Tabung dibagian dalam terbuat dari bahan tembaga dengan diameter 0.033 m untuk bagian dalam dan 0,035 untuk bagian luar. Sedangkan untuk tabung dibagian luar menggunakan bahan kuningan dengan diameter dalam 0,128 m dan 0,133 m untuk bagian luar. Eksperimental bertujuan untuk mengurangi adanya perpindahan panas yang ada dilingkungan sekitar.
Regin dkk (2009)	<i>Heat Transfer Characteristics of Thermal Energy Storage System Using PCM Capsules: A Review". Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	Melakukan analisis mengenai perilaku dari pemaketan ( <i>packed bed</i> ) secara numerik pada system <i>thermal energy storage</i> (TES) kalor laten pada Pemanas Air Tenaga Surya (PATS)	Semakin tinggi temperatur inlet <i>heat transfer fluid</i> (HTF) yang didapatkan maka semakin cepat juga waktu yang dibutuhkan untuk proses <i>charging</i> , begitu juga sebaliknya semakin rendah temperature inlet <i>heat transfer fluid</i> (HTF) yang didapatkan maka pembekuan pada <i>phase change material</i> (PCM) akan semakin cepat. Radius yang kecil juga dapat mempengaruhi pada saat proses <i>charging</i> dan <i>discharging</i>

<p>Shuangmao, dkk (2011).</p>	<p><i>Dynamic Discharging Characteristics Simulation on Solar Heat Storage System with Spherical Capsules Using Paraffin as Heat Storage Material</i></p>	<p>Meneliti tentang karakteristik dinamis dari sistem penyimpanan panas matahari pada proses <i>discharging</i> menggunakan kapsul – kapsul berbentuk bola yang berisi <i>paraffin wax</i> (PCM)</p>	<p>Laju pelepasan panas sangat tinggi dan akan berkurang secara cepat ketika mendekati <i>cooling stage</i>, serta laju pelepasan panas akan stabil pada <i>solidification cooling stage</i> hingga pada <i>solid cooling stage</i>. Waktu yang diperlukan untuk pepadatan secara sempurna akan berkurang ketika laju aliran <i>heat transfer fluid</i> (HTF) meningkat, tetapi efek tidak begitu jelas jika laju aliran <i>heat transfer fluid</i> (HTF) melebihi 13 kg/menit. Pengaruh dari rembesan pada <i>packed bed</i> tidak terlalu berpengaruh secara signifikan jika dibandingkan dengan temperature inlet <i>heat transfer fluid</i> (HTF) dan laju aliran</p>
<p>Ilmi, A dkk (2014)</p>	<p>perancangan <i>thermal energy storage</i> (TES) pada kolektor surya berbentuk tabung silinder</p>	<p>Melakukan penelitian tentang perancangan <i>thermal energy storage</i> (TES) pada kolektor surya berbentuk tabung silinder.</p>	<p>Perancangan isolasi dan rangka terdiri dari 3 lapisan yaitu, aluminium, glasswool, dan aluminium. Material ini berfungsi supaya laju perpindahan panas dari ruang kolektor tidak keluar ke lingkungan.</p>
<p>Sukamta, dkk (2015)</p>	<p>Studi Eksperimental Penyimpanan Energi Termal pada Tangki Pemanas Air Tenaga Surya yang Berisi PCM</p>	<p>Meneliti tentang <i>paraffin wax</i> sebagai penyimpanan panas menggunakan PCM</p>	<p>Hasil data temperature HTF dan PCM diambil saat proses <i>charging</i> selama 340 menit. Berdasarkan hasil tersebut disimpulkan bahwa PCM dapat menyimpan kalor dengan baik jika memperhatikan isolasi</p>

			dalam tangki, karena dapat meminimalisir rugi rugi termal yang terbuang.
Bellan, dkk (2014)	<i>Numerical Analysis of Charging and Discharging Performance of A Thermal Energy Storage System with Encapsulated Phase Change Material</i>	Menelitian tentang sistem pentimpanan energi termal dengan kapsul berisi <i>phase change material</i> (PCM) berbentuk bola. <i>phase change material</i> (PCM) yang digunakan yakni sodium nitrat dan sebagai <i>heat transfer fluid</i> (HTF) berupa minyak sintetik temperatur tinggi ( <i>therminol 66</i> ).	Hasil yang diperoleh yakni waktu yang diperlukan PCM dalam proses <i>charging</i> lebih cepat daripada <i>discharging</i> , kecepatan <i>charging</i> dan <i>discharging</i> akan lebih cepat jika menggunakan kapsul yang lebih kecil, dan apabila suhu <i>fluida</i> meningkat maka zona temperatur leleh konstan dan zona pertukaran panas akan menurun
Farid, M dkk (2004)	<i>A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Application</i>	Penelitian tentang penyimpanan energi perubahan fasa pada <i>Latent heat storage</i> (LHS)	<i>Paraffin</i> memiliki kepadatan penyimpanan energi termal sedang dan konduktivitas termal yang rendah, sedangkan garam terhidrasi memiliki kepadatan penyimpanan energi dan konduktivitas termal yang lebih tinggi

## 2.2. Dasar Teori

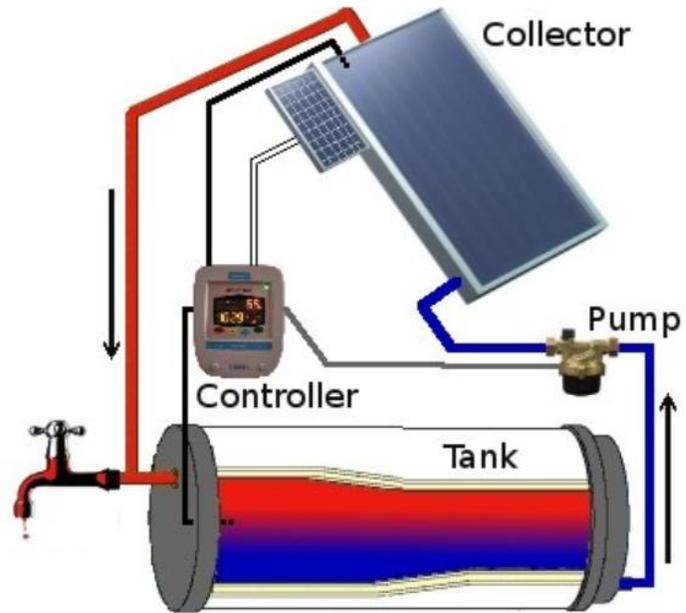
### 2.2.1. Definisi *Solar Water Heater* (SWH) / Pemanas Air Tenaga Surya

*Solar Water Heater* atau pemanas air tenaga surya (PATS) merupakan energi terbarukan berupa alat penukar kalor yang bersumber dari energi panas matahari, dimana radiasi energi matahari di tarnsferkan ke dalam tangki TES yang didalamnya terdapat pipa tembaga dan *phase change material* (PCM) berupa *paraffin wax* yang digunakan untuk menangkap dan menahan energi yang terserap. Energi panas yang terserap diteruskan ke fluida berupa air.

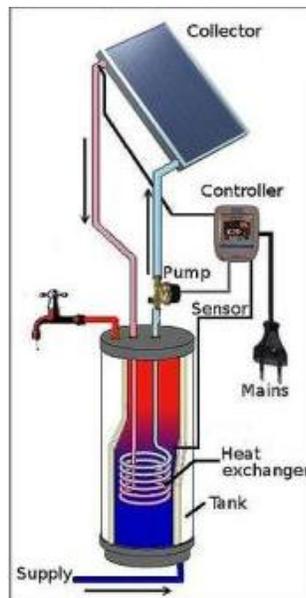
SWH terdiri dari tiga komponen utama yang penting yaitu solar kolektor, tangki penyimpanan air panas dan juga saluran pipa pendistribusian untuk fluida. Permukaan solar kolektor biasanya menghadap langsung ke matahari yang memiliki beberapa kombinasi kaca untuk menangkap energy panas, penyaluran air untuk menangkap energi panas dibantu dengan dorongan pompa secara paksa. Sistem yang dimiliki SWH yang dapat memasok air panas pada suhu 60°C hingga 80°C yang kemudian akan diserap dan disimpan. Lapisan isolasi juga biasanya digunakan untuk mencegah terjadinya *heat loss* pada tangki dan meminimalisir kehilangan panas yang terjadi.

### **2.2.2. Solar Water Heater (SWH) / Pemanas Air Tenaga Surya Aktif**

Pemanas air tenaga surya dengan menggunakan system aktif adalah penggunaan energi thermal pada *heat transfer fluid* (HTF) dengan menggunakan pompa dan perangkat control secara otomatis dijelaskan oleh Jamar, dkk (2016). Hal ini mendasari penggunaan sistem pemanas air tenaga surya yang masih memerlukan energi listrik dan menjadikan lebih efisien karena output yang di hasilkan akan lebih stabil. Sistem aktif terbagi atas 2 jenis, yaitu sistem sirkulasi langsung dan system sirkulasi tidak langsung yang masing-masing memiliki perbedaan. Sistem langsung merupakan sistem yang tidak memerlukan perangkat pendukung atau alat penukar kalor saat pendistribusiannya atau langsung dari kolektor yang diedarkan ke dalam kolektor kemudian dipanaskan menggunakan energy matahari. Kemudian air yang telah medapatkan energi dialirkan ke tangki TES dan disimpan. Sedangkan sistem tidak langsung merupakan sistem yang masih memerlukan perangkat pendukung atau alat penukar kalor yang mempunyai system sirkulasi air tidak langsung yang artinya air akan dialirkan melalui kolektor menuju tangki penyimpanan yang terdapat *Heat Exchanger* yang terbuat dari logam tembaga atau stainless steel kemudian di panaskan sampai suhu tertentu.



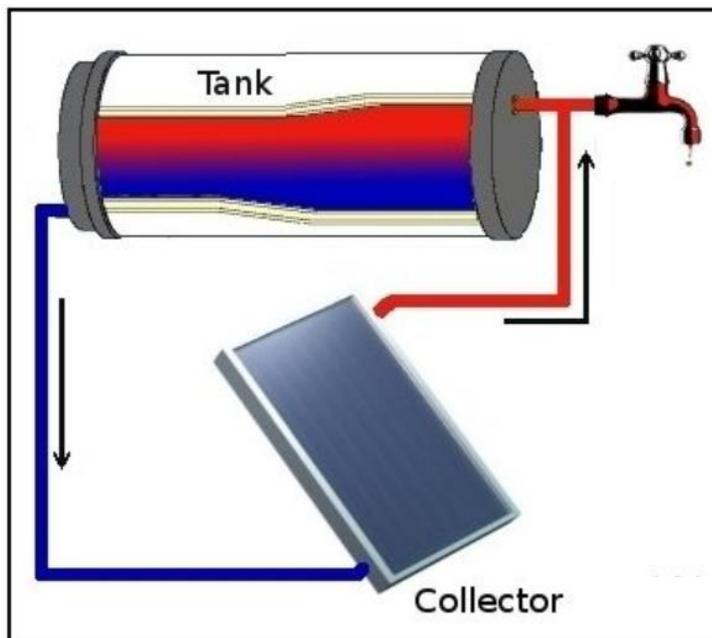
Gambar 2. 3. Sistem Sirkulasi Langsung  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_water\\_heating](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_water_heating)



Gambar 2. 4. Gambar Sirkulasi Tidak Langsung  
<http://www.globalmarket.com/product-nfo/drawing-of-split-pressure-solar-water-heater-1372259.html>

### 2.2.3. *Solar Water Heater (SWH) / Pemanas Air Tenaga Surya Pasif (Termosifon)*

Pemanas air tenaga surya yang menggunakan system termosifon biasanya diaplikasikan didalam ruang lingkup rumah tangga. Sistem ini merupakan sistem yang mengandalkan perbedaan massa jenis fluida sehingga alat untuk mengalirkan fluida seperti pompa tidak diperlukan. Sistem termosifon mempunyai sirkulasi fluida yang akan terus terjadi hingga temperatur seluruh sistem sama. Dwivedi, (2009) menjelaskan bahwa sistem PATS merupakan sistem yang menggunakan konveksi natural sebagai penggerak *heat transfer fluid* (HTF). Hal ini dapat terjadi karena adanya pengurangan *fluid* densitas yang dipanaskan yang menyebabkan HTF di kolektor dapat naik ke dalam tangki serta HTF di tangki dapat turun ke kolektor. Sistem pasif memiliki keunggulan, yaitu sistem sirkulasi *heat transfer fluid* (HTF) tidak memerlukan perawatan yang rumit karena tidak adanya pompa.



Gambar 2. 5. Sistem *Thermosiphon*

(Sumber

:<https://www.appropedia.org/images/f/f/e/Thermosiphon.gif>)

a. Thermoshypon

Sistem thermoshypon dapat terjadi jika HTF (*heat transfer fluid*) yang berada dalam tangki mengembang. Hal itu disebabkan karena densitas mengecil akibat dari pemanasan sehingga dapat mendorong HTF untuk naik ke dalam tangki. Setelah itu HTF yang terdapat pada kolektor akan masuk ke dalam tangki sehingga akan mendorong HTF di dalam tangki untuk turun ke kolektor. Proses thermosyphoning akan terus berlanjut hingga temperatur pada HTF bersifat sama.

#### 2.2.4. Definisi Tangki TES

Tangki TES (*thermal energy storage*) merupakan teknologi yang berbentuk wadah untuk menyimpan energi panas dengan memanaskan atau mendinginkan cairan yang disimpan sehingga energi yang diperoleh dapat digunakan untuk aplikasi dan daya panas dan dingin secara generasi. Sistem TES terdiri atas tiga jenis, yaitu :

- a. penyimpanan panas laten menggunakan bahan perubahan fase (PCM), dari keadaan padat menjadi keadaan cair.
- b. penyimpanan panas sensibel dengan menggunakan media penyimpanan cair atau padat.
- c. penyimpanan termokimia (TCS) menggunakan reaksi kimia untuk menyimpan dan melepaskan energi panas.

TES dapat dikategorikan menjadi 3 tipe, yaitu *latent heat storage* (LHS), *sensible heat storage* (SHS), dan *thermo-chemical storage*. Pada penggunaannya, Menurut Cabeza, dkk (2011) LHS dan SHS akan mengalami *heat loss* seiring dengan waktu sehingga tidak cocok digunakan sebagai penyimpan energi jangka panjang. pengaplikasian sistem TES memiliki tiga siklus yaitu, *charging*, *storage*, dan *discharging*. Proses *charging* merupakan proses penyerapan kalor atau pemindahan energi dari HTF ke media penyimpanan energy PCM. Proses *charging* akan terus berlangsung jika media fase belum berubah dan kondisi temperatur yang masih rendah. Proses *storage* yaitu proses penjagaan energi

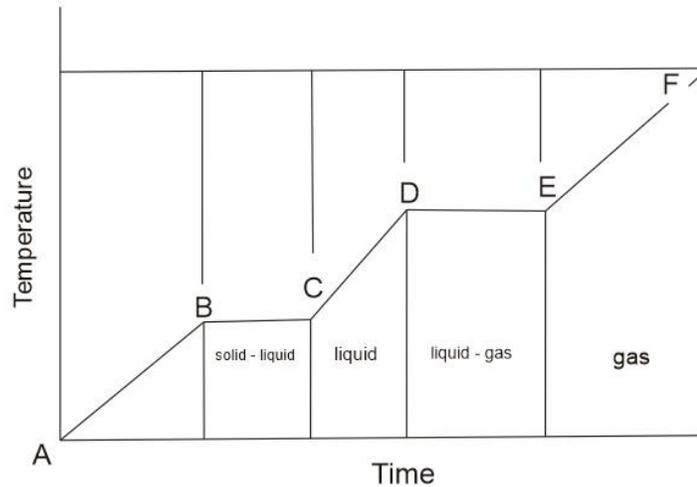
supaya energi yang telah tersimpan akan tetap terjaga dan tidak berkurang dalam jangka waktu yang telah ditentukan. Proses *discharging* yaitu proses pelepasan kalor dari media penyimpanan PCM energi ke HTF. Hal ini bertujuan untuk memanfaatkan energi yang telah disimpan.

### 2.2.5. Latent Heat Storage

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*. Dikarenakan pada fase *liquid-solid* volume yang digunakan lebih sedikit. Berikut grafik perubahan fasa pada suatu zat ditunjukkan pada gambar 2.6 dan jumlah kalor dalam satuan joule terdapat pada persamaan 2.1 (Regin, dkk 2018).

$$Q = m \left[ \int_{T_A}^{T_D} C_{p,s}(T) dT + L + \int_{T_E}^{T_F} C_{p,l}(T) dT + L_g \int_{T_G}^{T_H} C_{p,g}(T) dT \right] \quad (2.1)$$

Massa material ( $m$ ) dalam kg; kalor jenis fase padat ( $C_{p,s}$ ), kalor jenis fase cair ( $C_{p,l}$ ) serta kalor jenis fase gas ( $C_{p,g}$ ) dalam kJ/kg. °C; kalor *latent* perubahan padat-cair ( $L$ ), dan kalor *latent* perubahan cair-gas ( $L_g$ ) dalam kJ/kg.



Gambar 2. 6. Grafik temperature-waktu pada pemanasan suatu zat  
(Sumber: Regin, dkk 2008)

### 2.2.6. Sensible Heat Storage

*Sensible heat storage* (SHS) merupakan energi yang tersimpan didalam sistem ditandai dengan adanya perubahan temperatur pada material penyimpan energi. Aplikasi dari SHS dikategorikan menjadi 2 tipe, yaitu media cair dan media padat. Media cair adalah SHS yang menggunakan zat cair sebagai penyimpan energi seperti air, minyak, dan *molten salts*. Sedangkan media padat adalah SHS yang menggunakan material padat sebagai penyimpan energinya seperti logam. Keunggulan paling umum dari SHS adalah harganya yang murah. Akan tetapi, SHS memiliki *density energy* paling rendah diantara ketiga tipe *storage* seperti terlihat pada Gambar 2.6. Akibatnya SHS memerlukan *volume storage* yang besar. Selain itu, sebagian besar dari perangkat SWH terjadi *heat loss* yang akan merugikan sebagai penyimpan energi. Besarnya energi yang tersimpan (dalam *Joule*) dapat dihitung dengan persamaan 2.2 berikut (Sharma, 2009).

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

Selisih temperature akhir ( $T_f$ ) dan temperature awal ( $T_i$ ) dalam °C; massa material penyimpan ( $m$ ) dalam kg; kalor jenis rata – rata material penyimpan saat proses ( $c_{ap}$ ) dalam J/kg.°C; massa jenis ( $\rho$ ) dalam kg/m<sup>3</sup> dan volume material ( $V$ ) dalam m<sup>3</sup>.

### 2.2.7. Thermo-Chemical Storage

*Thermo-chemical storage* (T-CS) 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 ketika reaksi tersebut dibalik. Sistem ini memerlukan *catalyst* karena *thermo-chemical storage* memiliki energi *density* yang tinggi. Hal ini digunakan untuk melepas energi dan mengontrol reaksi termokimia dan hal-hal yang tidak diinginkan dalam penyimpanan termal.

### 2.2.8. Phase Change Material

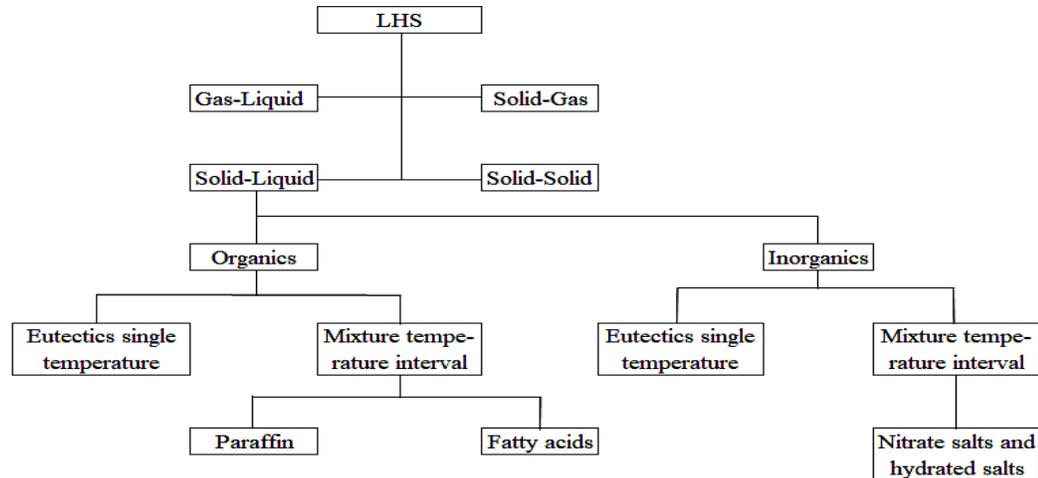
*Phase change material* (PCM) merupakan material yang memiliki panas dengan fusi yang tinggi. Material yang berifat dapat meleleh dan membeku pada suhu tertentu serta mampu menyimpan dan melepas energi dengan besaran tertentu Marsah, (2014). *Phase change material* (PCM) dapat menyerap dan melepas panas yang terjadi paada saat perubahan fase padat ke cair atau sebaliknya, jadi material PCM dapat simpulkan sebagai bahan penyimpan panas laten. Material PCM yang digunakan pada umumnya adalah *paraffin wax* karena *paraffin wax* sendiri memiliki sifat fisik yang mampu menyimpan energi cukup besar dengan densitas energi mencapai (~200 kJ/kg) dan konduktivitas termal rendah (~0,2 W/m.°C) dengan *melting point* kisaran antara 8 sampai 106°C dan mempunyai siklus termal yang mampu bertahan selama 1500 siklus. Oleh sebab itu *paraffin wax* dianggap mampu dalam menyimpan energi yang cukup besar. Material PCM yang digunakan harus memiliki karakteristik yang ditunjukkan pada tabel 2.2.

Tabel 2. 2. Karakteristik material *phase change material* (PCM) yang digunakan pada sistem SWH menurut Regin, dkk (2008).

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 <i>latent heat</i> dan <i>specific heat</i> yang tinggi.	Perubahan kerapatan yang naik ketika berubah fasa (melting).	Tidak terjadi dekomposisi.	Tidak mahal.
3	Konduktivitas termal rendah	Tidak terjadi <i>supercooling</i> ketika pendinginan.	Tidak beracun dan mudah terbakar	
4			Cocok dengan kapsul	

Kapasitas penyimpanan dari PCM di jelaskan Agyenim, dkk (2010) bergantung pada besarnya *nilai specific heat* dan *laten heat value*. Semakin tinggi *nilai specific heat* dan *laten heat value* dari PCM akan semakin baik. Hal ini disebabkan karena kapasitas penyimpanannya akan semakin besar. Material PCM dengan perubahan fasa padat ke gas atau cair ke gas pada umumnya tidak digunakan sebagai penyimpanan 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 2.6.



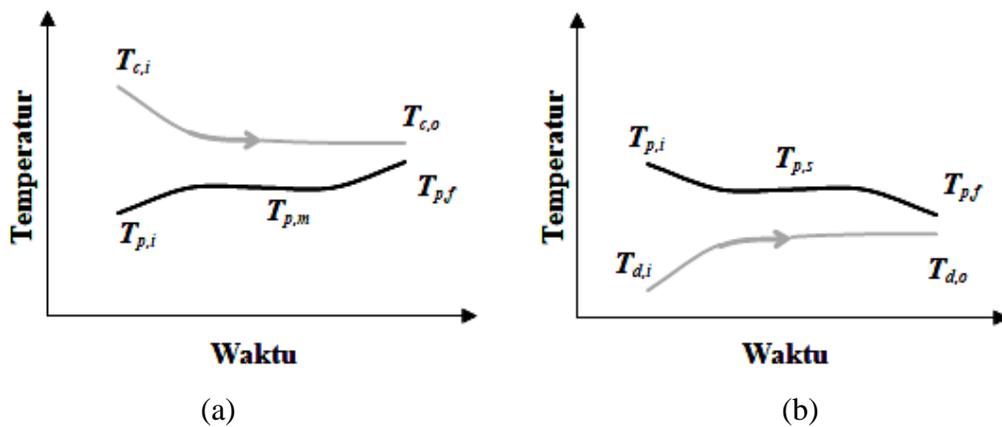
Gambar 2. 7. Klasifikasi *phase change material* (PCM)  
(Sumber: Gil, dkk 2010)

### 2.2.9. Charging dan Discharging

Proses *charging* diawali dengan penyerapan energi termal oleh *phase change material* (PCM) pada kolektor dan tangki TES. PCM yang terus menerus menyerap energi termal akan mengalami pelelehan yang menandakan telah memasuki *fase* temperatur leleh. Penyerapan tersebut berguna untuk menaikkan HTF yang kemudian HTF didalam tangki kolektor pada temperature  $T_{c,i}$  bersikulasi ke dalam tangki TES. Hal ini dikarenakan terjadinya perbedaan temperature HTF pada kolektor dan tangki TES. Energi termal pada HTF didalam tangki diserap oleh PCM yang memiliki temperatur  $T_{p,l}$ . Proses pelelehan PCM yang disebabkan oleh penyerapan energi termal yang terus menerus tersebut menandakan PCM telah memasuki temperatur leleh ( $T_{p,m}$ ). Pelelehan PCM secara sempurna yang disebabkan oleh penyerapan energi termal pada HTF, maka temperatur PCM menjadi  $T_{p,f}$ . HTF bertemperatur  $T_{c,o}$  menandakan bahwa proses *charging* telah

selesai. Persamaan 2.3 menunjukkan kalor yang dilepas HTF selama proses charging.

Proses *discharging* diawali dengan pelepasan energi termal dari temperatur tinggi hingga temperatur rendah yang tersimpan didalam PCM. Proses ini kebalikan dari proses *charging* yaitu pertukaran kalor yang terjadi dari PCM ke HTF. PCM mulai mengalami pembekuan saat temperatur PCM mencapai  $T_{p,s}$ , maka pertukaran kalor dari PCM akan terus berlangsung hingga temperaatur PCM mencapai  $T_{p,f}$ . Proses discharging dinyatakan selesai jika temperaturr akhir dari HTF adalah  $T_{d,o}$ .



Gambar 2. 8. Skema temperatur pada sistem LHS  
(a) proses charging (b) proses discharging