

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

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

Media penyimpanan panas yang baik dan mudah dilakukan dengan penggunaan material LHS (*latent heat storage*) yang sering disebut *phase change material* (PCM) pada pemanas air tenaga surya (PATS) yang pada umumnya menggunakan air untuk menyimpan energi termal. Material LHS berguna untuk meningkatkan densitas energi sistem. Penelitian yang dilakukan oleh Nadjib, (2016) menggunakan kolektor matahari plat datar dan tangki TES (*thermal energy storage*) yang dipasang secara horizontal di sisi atas kolektor. Tangki ini terdiri dari sekumpulan pipa kapsul yang berisi *paraffin wax*. Adanya PCM dapat mengendalikan penurunan dari efisiensi pengumpulan energi pada saat intensitas radiasi cahaya matahari mulai menurun.

Adapun penelitian selain memperoleh hasil efisiensi pengumpulan energi yaitu dengan menganalisis secara numerik perilaku dari pemaketan (*packed bed*) sistem TES kalor laten pada Pemanas Air Tenaga Surya yang dilakukan oleh Regin dkk (2009). Pemaketan tersebut menggunakan kapsul bola yang berisi *paraffin wax* sebagai media PCM. Proses *discharging* membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan proses *charging*. Hal ini disebabkan karena koefisien perpindahan kalor yang didapat selama proses pembekuan yang terjadi pada PCM sangatlah rendah. Semakin tinggi temperatur *inlet* HTF (*heat transfer fluid*) maka

semakin cepat waktu yang dibutuhkan untuk proses *charging*. Sebaliknya jika semakin rendah temperatur pada *inlet* maka proses pembekuan akan semakin cepat. Proses *charging* dan *discharging* dapat dipengaruhi oleh kecilnya radius pada kapsul.

SWH memerlukan tempat penyimpanan energi panas yang bertujuan untuk menampung air sebagai HTF dan pipa sebagai tempat PCM, maka diperlukannya perancangan *thermal energy storage* (TES) pada kolektor surya berbentuk tabung silinder yang dilakukan oleh Abdullah, dkk (2014). 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 TES ini mempertimbangkan konduktivitas material dan faktor korosif maka bahan yang sesuai digunakan adalah alumunium dengan tebal 1 dan wadah berbentuk tabung silinder dengan volume 0,03 m³, 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.

Penelitian secara eksperimental penyimpanan energi *thermal* pada tangki pemanas air tenaga surya (PATS) dengan penggunaan kapsul berbentuk silinder didalam tangki yang berisi material PCM (*paraffin wax*) yang dilakukann oleh Nadjib, dkk (2015). Penelitian ini menggunakan air sebagai HTF dan *paraffin wax* sebagai PCM. Tangki yang digunakan memiliki volume 31,37 dimana posisi letak tangka berada pada atas kolektor. Kolektor dipasang dengan kemiringan 15°. Terdapat 16 buah kapsul berisi *parffin wax* yang tersusun secara segaris didalam tangki. Sistem PATS dihadapkan mengarah ke sinar matahari sehingga akan terjadi proses *charging* yang akan menaikkan temeratur HTF dan PCM dari hasil transfer kalor dari air kolektor. Peneliti mengatakan bahwa kapasitas penyimpanan energi termal total sebesar 4,8 MJ dengan kontribusi penggunaan PCM adalah 44,28% dalam waktu 340 menit pada proses *charging*. Hal ini terjadi, karena terjadi *heat loss* saat proses *charging*. Maka dari itu, perlu diperhatikan pada sistem isolasti PATS sehingga dapat meminimalisir *heat loss* yang terjadi.

Penelitian dilakukan oleh Nadjib dan Suhanan (2017) secara simulasi modeling dengan menggunakan *Ansys Fluent* untuk mengetahui perilaku termal saat proses pelelehan *paraffin wax* secara numerik pada pipa ganda konsentrik dengan sumber kalor yang konstan pada tangka TES sistem PATS *thermosyphon*. Fokus yang dikaji dalam penelitian tersebut yaitu menganalisis evolusi temperatur air sebagai HTF dan *paraffin wax* RT 52 sebagai PCM selama proses *charging*. Hasil penelitian perpindahan kalor dari HTF ke PCM berlangsung efektif serta transfer kalor yang terjadi pada arah radial dan aksial.

Penggunaan kapsul selain berbentuk silinder sering dilakukan oleh sebagian peneliti lainnya, tetapi dapat juga dilakukan dengan menggunakan kapsul berbentuk bola yang telah diterapkan dan diteliti oleh *Shuangmao, dkk* (2011). Penelitian ini membahas tentang karakteristik dinamis dari sistem penyimpanan panas matahari pada proses *discharging* menggunakan kapsul – kapsul berbentuk bola yang berisi *paraffin* (PCM) *Paraffin* digunakan sebagai bahan perubahan fasa (PCM) dan air digunakan sebagai HTF (*heat transfer fluid*). 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 pematatan secara sempurna akan berkurang ketika laju aliran HTF meningkat, tetapi efek tidak begitu jelas jika laju aliran HTF melebihi 13 kg/menit. (3) Pengaruh dari rembesan pada *packed bed* tidak terlalu berpengaruh secara signifikan jika dibandingkan dengan temperatur inlet HTF dan laju aliran.

Penelitian SWH dengan tangki TES (*thermal energy storage*) mayoritas menggunakan kapsul silinder berisi air sebagai HTF (*heat transfer fluid*) dan *paraffin wax* sebagai media penyimpanan panasnya, akan tetapi terdapat bahan HTF dan PCM lain yang dapat dimanfaatkan sebagai penyimpan panasnya berupa PCM yang digunakan yakni sodium nitrat dan sebagai HTF berupa minyak sintetik temperatur tinggi (*terminol 66*) yang dilakukan oleh peneliti seperti Bellan, dkk (2014) melakukan penelitian tentang sistem penyimpanan energi termal dengan kapsul berisi PCM berbentuk bola. PCM yang digunakan yakni sodium nitrat dan sebagai

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.

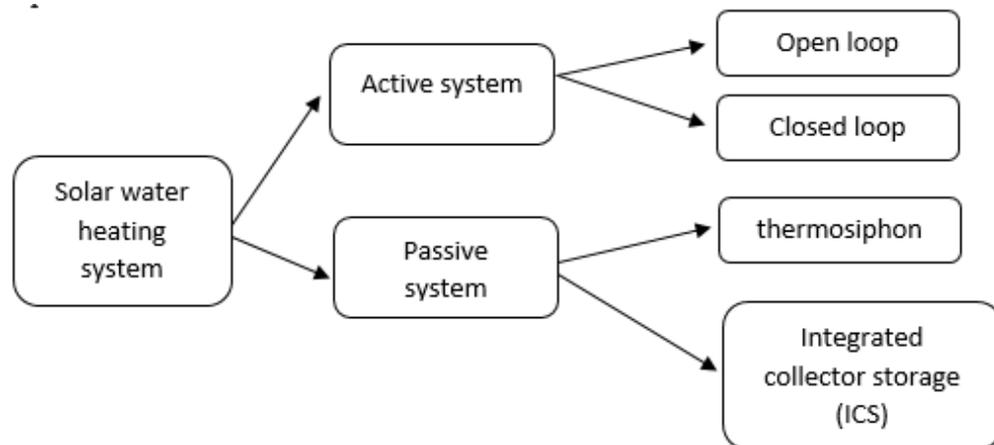
Latent heat storage (LHS) adalah salah satu cara yang paling efisien untuk menyimpan energi panas. Metode LHS memberikan kepadatan penyimpanan yang tinggi, dengan perbedaan suhu yang lebih kecil antara menyimpan dan melepaskan panas. Terdapat beberapa contoh material perubahan fasa (PCM) yang meleleh 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. Hal tersebut dikemukakan oleh Farid, dkk (2004).

Studi eksperimental dan numerik penyimpanan PCM annular dilakukan oleh Longeon, dkk (2013) yang dimodelkan dengan menggunakan *software* CFD (*computational fluid dynamics*) bahwa sistem penyimpanan energi termal laten (TES) sangat berpotensi dilakukan dalam sistem *Concentrated Solar Power* (CSP). Hal ini karena peningkatan kepadatan penyimpanan dan pelepasan temperatur energi yang konstan memungkinkan sebagai desain penukar kalor yang baik serta dapat menyederhanakan pengelolaan sistem. Penukar panas *sheel* dan tabung merupakan teknologi dengan biaya yang murah. Fenomena perubahan fasa terjadi ketika pelelehan dan pepadatan pada PCM. PCM yang digunakan yaitu *paraffin wax* RT35. Pengujian dan visualisasi dibuat untuk menganalisis pengaruh fluida perpindahan panas (HTF) yang terjadi pada sistem. Hasil pengujian eksperimental ini dimodelkan.

2.2 Dasar Teori

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

Sistem pemanas air tenaga surya (PATS) merupakan salah satu aplikasi dari pemanfaatan energi matahari dengan menggunakan kolektor untuk menyerap energi yang dipancarkan matahari. PATS memiliki bermacam-macam bentuk berdasarkan cara kerjanya, tetapi PATS memiliki 3 komponen utama, yaitu kolektor, tangki, dan sistem perpipaan. Sistem perpipaan terdiri dari pipa-pipa penghubung yang berfungsi sebagai penghubung antar kolektor surya dan penghubung antara tangki dengan kolektor serta penyambung pipa agar pipa-pipa penghubung dapat tersambung ke kolektor surya ataupun tangki. Adapun Sistem dari *Solar Water Heater* yang terdapat pada Gambar 2.1.

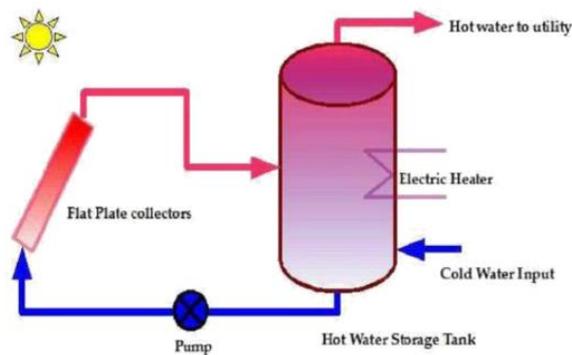


Gambar 2.1. Sistem PATS (Jamar, 2016)

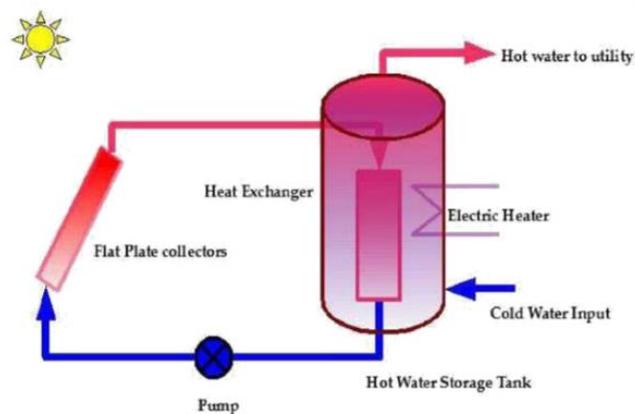
2.2.2 *Solar Water Heater (SWH)* / Pemanas Air Tenaga Surya Aktif

Penjelasan Jamar, dkk (2016) mengenai pemanas air tenaga surya dengan menggunakan sistem aktif adalah penggunaan energi termal pada HTF (*heat transfer fluida*) dengan menggunakan pompa dan perangkat pengontrol otomatis. Hal ini mendasari penggunaan sistem pemanas air tenaga surya yang masih memerlukan energi listrik. Sistem aktif terbagi atas 2 jenis, yaitu sistem terbuka dan sistem tertutup yang masing – masing memiliki perbedaan. Sistem terbuka

merupakan sistem yang tidak memerlukan perangkat pendukung atau alat penukar kalor saat pendistribusiannya, sedangkan sistem tertutup merupakan sistem yang masih memerlukan perangkat pendukung atau alat penukar kalor dalam pendistribusiannya. Berikut skema sistem aktif dan sistem tertutup ditunjukkan pada Gambar 2.2 point (a) dan point (b).



(a)



(b)

Gambar 2.2. PATS sistem aktif, (a) sistem terbuka, (b) sistem tertutup

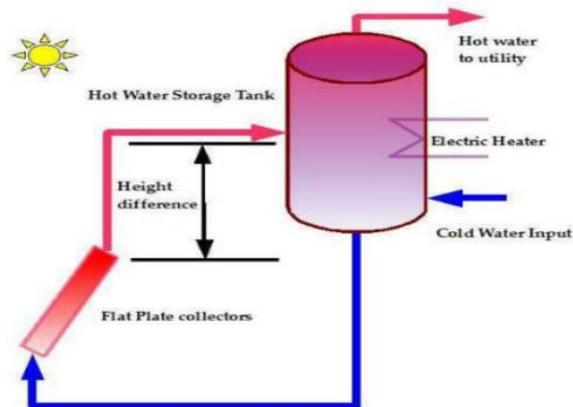
(Sumber: Dwivedi, 2009)

2.2.3. Solar Water Heater (SWH) / Pemanas Air Tenaga Surya Pasif (sistem termosifon)

Pemanas air tenaga surya seringkali dimanfaatkan di dalam ruang lingkup rumah tangga dengan menggunakan sistem termosifon. Sistem ini merupakan sistem yang mengandalkan perbedaan massa jenis fluida sehingga alat untuk mengalirkan fluida seperti pompa tidak diperlukan. Sistem termosifon terdapat 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 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 HTF tidak memerlukan perawatan yang rumit karena tidak adanya pompa.

a. Thermosyphon

Sistem *thermosyphon* atau *thermosyphoning* 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.



Gambar 2.3. Sistem *thermosipon* dengan pemanas tambahan

(Sumber: Dwivedi, 2009)

2.2.4. Definisi Tangki TES (*Thermal Energy Storage*)

Tangki TES (*Thermal Energy Storage*) merupakan teknologi untuk menyimpan energi panas dengan memanaskan atau mendinginkan penyimpanan sehingga energi dapat tersimpan dan digunakan untuk aplikasi dan daya pemanasan dan pendinginan generasi. Sistem TES terdiri atas tiga jenis, yaitu

- (i) penyimpanan panas sensibel dengan menggunakan media penyimpanan cair atau padat.
- (ii) penyimpanan panas laten menggunakan bahan perubahan fase (PCM), dari keadaan padat menjadi keadaan cair.
- (iii) 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, 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*. *Charging* merupakan proses penyerapan kalor atau pemindahan energi dari HTF ke media penyimpanan energi. 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. Kemudian proses *discharging* yaitu proses pelepasan kalor atau proses pemindahan energi dari media penyimpanan energi ke HTF. Hal ini bertujuan untuk memanfaatkan energi yang telah disimpan.

2.2.5. *Sensible Heat Storage*

Pada *sensible heat storage* (SHS), energi tersimpan di dalam sistem ditandakan dengan perubahan temperatur pada material penyimpan energi. Berdasarkan aplikasinya, 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*. 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 2.1 berikut (Sharma, 2009).

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mc_p dT = mc_{ap}(T_f - T_i) = \rho V c_{ap}(T_f - T_i) \dots\dots\dots (2.1)$$

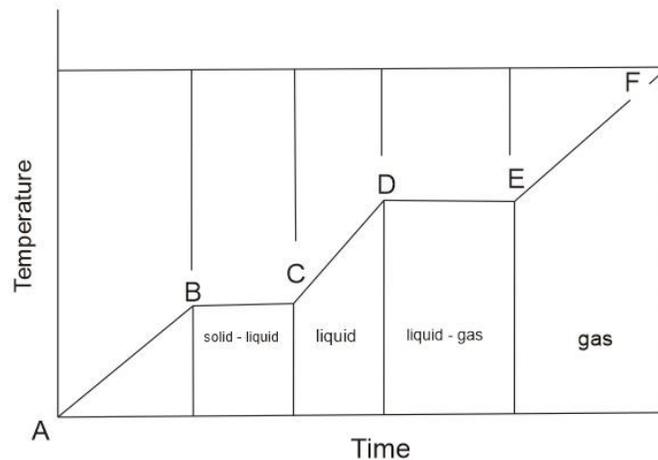
Selisih temperatur akhir (T_f) dan temperatur awal (T_i) dalam °C; massa material penyimpan (m) dalam kg; kalor jenis rata – rata material penyimpan saat proses (c_{ap}) dalam J/kg.°C; massa jenis (ρ) dalam kg/m³ dan volume material (V) dalam m³.

2.2.6. Latent Heat Storage

Latent heat storage (LHS), penyerapan atau pelepasan energi yang terjadi pada sistem merupakan tanda dari perubahan fase dari material penyimpan energi. Perubahan fase *liquid-solid* mayoritas lebih banyak digunakan sebagai *energy storage* dibandingkan dengan fase *liquid-vapor*. Hal ini disebabkan karena 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 2.2 (Regin, dkk 2018).

$$Q = m \left[\int_{T_A}^{T_D} C_{p,s}(T) dT + L + \int_{T_E}^{T_F} C_{p,l}(T) dT + L_g + \int_{T_G}^{T_H} C_{p,g}(T) dT \right] \dots \dots (2.2)$$

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 2.4. Grafik temperature - waktu pada pemanasan suatu zat

(Sumber: Regin, dkk 2008)

2.2.7. Thermo-Chemical Storage

Thermo-chemical storage yaitu 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 guna melepas energi dan mengontrol reaksi termokimia dan hal-hal yang tidak diinginkan dalam penyimpanan termal.

2.2.8. Phase Change Material

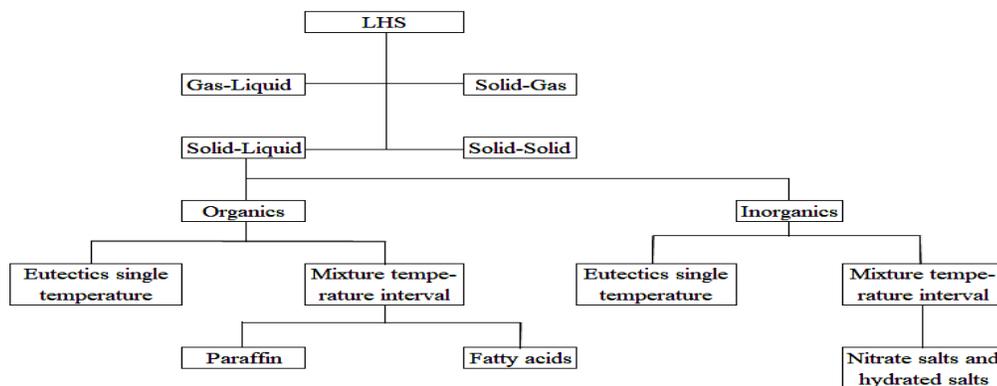
Menurut Marsah, (2014) menjelaskan bahwa *phase change material* (PCM) merupakan material yang memiliki panas dengan fusi yang tinggi. Material ini dapat meleleh dan membeku pada suhu tertentu serta mampu menyimpan dan melepas energi dengan besaran tertentu. PCM menyerap dan melepas panas yang terjadi pada saat perubahan fase padat ke cair atau sebaliknya, jadi material PCM dapat disimpulkan sebagai bahan penyimpan panas laten. Material PCM yang digunakan umumnya adalah *paraffin wax* karena *paraffin wax* 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 serta siklus termalnya 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 2.1.

Tabel 2.1. 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 rendah.	Memiliki sifat kimia yang stabil.	Tersedia banyak.

No	Sifat termal	Sifat fisis	Sifat kimia	Faktor ekonomi
2	Memiliki nilai <i>latent heat</i> dan <i>specific heat</i> yang tinggi.	Perubahan kerapatan yang rendah ketika merubah fasa.	Tidak terjadi dekomposisi.	Tidak mahal.
3	Konduktivitas termal rendah	Tidak terjadi <i>supercooling</i> ketika pendinginan.	Tidak beracun dan mudah terbakar	
4	Densitas energi tinggi		Cocok dengan kapsul	

Agyenim, dkk (2010) menjelaskan bahwa 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. Hal ini disebabkan karena kapasitas penyimpanannya akan semakin besar. Material PCM dengan perubahan fasa padat-gas atau cair-gas pada umumnya tidak digunakan sebagai penyimpanan energi. Karena ketika PCM mengalami perubahan fasa menjadi gas, maka volume material tersebut akan menjadi sangat besar sehingga perlunya sistem yang besar dan kompleks. Klasifikasi jenis PCM dapat dilihat pada Gambar 2.5.



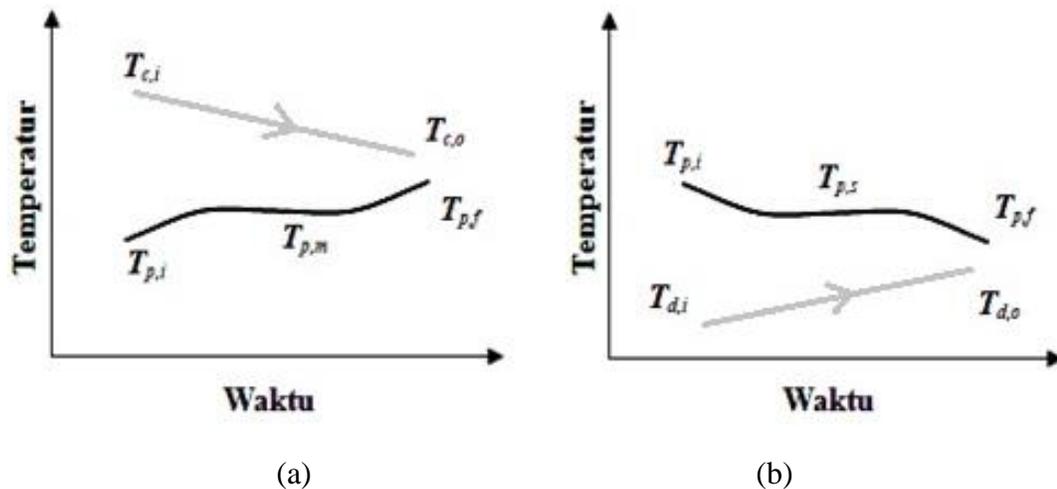
Gambar 2.5. Klasifikasi *phase change material* (PCM)

(Sumber: Gil, dkk 2010)

2.2.9. Charging dan Discharging

Proses *charging* adalah suatu proses penyerapan kalor dari sumber panas yang dimiliki oleh HTF ke PCM yang berada di dalam TES. Proses ini diawali dari temperatur rendah ke temperatur tinggi. Selama proses ini PCM akan menyerap energi panas sampai mengalami perubahan fasa dari *solid-liquid* atau mencapai temperature leleh. Ketika proses *charging* selesai, maka diharapkan PCM yang akan meleleh dengan sempurna dan temperatur PCM akan sama dengan HTF.

Proses *discharging* adalah proses pelepasan kalor yang telah tersimpan pada PCM saat proses *charging*. Sehingga proses ini berawal dari temperatur tinggi ke temperatur yang rendah dan terjadi perubahan fasa *liquid-solid* atau *solidification*. Selama proses ini temperatur PCM akan turun dan berhenti ketika temperatur PCM sama dengan temperatur HTF. Grafik perubahan temperatur pada proses *charging* dan *discharging* dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Skema temperatur pada sistem LHS

(a) proses *charging* (b) proses *discharging*