

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

##### 2.1.1 *Solar Water Heater* (SWH)

Sudrajat dan Santosa, (2014) pernah melakukan percobaan eksperimental pada sistem Pemanas Air Tenaga Surya (PATS) dengan kolektor plat datar. Percobaan ini bertujuan agar sistem PATS dapat bekerja pada temperatur yang diinginkan ( $\pm 45^{\circ}\text{C}$ ). Hasil dari eksperimen ini mendapatkan temperatur rata-rata mencapai  $52^{\circ}\text{C}$  meskipun pada kondisi cuaca mendung. Dari hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem PATS dapat memenuhi kebutuhan air panas untuk mandi. SWH itu sendiri adalah merupakan perangkat panas matahari yang dapat digunakan untuk menangkap dan mentransfer energi panas dari radiasi sinar matahari guna memenuhi persyaratan panas dalam rentang suhu yang berbeda.

Studi numerik untuk mengetahui cara mengatasi kekurangan dari *solar water heater* (SWH) pernah dilakukan Jufrizal, dkk. (2014) yaitu dengan memakai *Thermal Energy Storage* (TES) dengan berisi *paraffin wax*. Proses *discharging* ini menggunakan model plat datar yang didalamnya terdapat TES dengan sumber panas yang berasal dari sinar matahari. Air mengalir didalam pipa tembaga melewati kotak aluminium yang sudah terisi *paraffin wax*, kemudian air keluar dari kotak aluminium. Saat proses *discharging*, panas dari *paraffin wax* ditransfer ke air sehingga air menyerap kalor dan menyebabkan *paraffin wax* berubah dari fasa cair menjadi fasa beku.

Penelitian tentang penggunaan TES pada PCM yang dilakukan oleh Nadjib, (2016). PCM yang digunakan adalah *paraffin wax*. *Paraffin wax* ditaruh dalam pipa kapsul, kemudian dipasang termokopel disisi *Heat Transfer Fluid* (HTF) dan PCM. Kapsul yang digunakan terbuat dari pipa tembaga agar dapat menghantarkan panas dengan baik. Keunggulan dari adanya PCM yaitu mampu menahan penurunan efisiensi energi pada saat cahaya menurun atau tidak adanya cahaya.

TES yang digunakan cukup efisien karena saat *discharging* perbedaan suhu antara *paraffin wax* dan HTF tidak berbeda jauh.

Penelitian tentang pemanas air tenaga surya yang dilakukan oleh Sharif, dkk. (2015) yaitu penelitian yang menggunakan PCM jenis *paraffin wax*. *Paraffin wax* ini dimasukkan kedalam kapsul atau pipa berbahan tembaga berdiameter 80 mm. PCM akan dipasang dan dibandingkan pemakaiannya pada PATS dengan *Integrated Collector Storage (ICS)*. Hasil dari penelitian ini adalah PATS memiliki efisiensi rata-rata yang lebih tinggi dari *integrated collector storage*. PATS akan mendapatkan hasil yang maksimal jika material PCM yang digunakan memiliki *melting point* yang tidak jauh berbeda dengan unjuk kerja alat.

Penelitian yang dilakukan oleh Sukanta, dkk. (2015) tentang penyimpanan panas menggunakan PCM. PCM disini menggunakan *paraffin wax* yang dimasukkan dalam 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. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa PCM dapat menyimpan kalor dengan baik apabila dapat memaksimalkan isolasi dalam tangki, karena dapat meminimalisir rugi rugi termal yang terbuang.

Penelitian ini memiliki kesamaan dengan penelitian yang dilakukan oleh Nadjib, (2016) yaitu melakukan studi penelitian menggunakan PCM sebagai media penyimpanan panas dan air digunakan sebagai HTF. Penyimpanan panas disini menggunakan *paraffin wax* sebagai media PCM dan sumber panas memakai cahaya panas matahari.

Khan dan Islam, (2011) membandingkan 2 tipe LHS sebagai PCM yaitu *paraffin wax* dan *salt hydrates*. Setelah peneliti melakukan *thermal cycles* atau *melting-cooling*, *paraffin wax* mempunyai *properties* yang tidak berubah sedangkan *salt hydrates* mengalami fase *segregation* dan *supercooling*. Berdasarkan penelitian tersebut, peneliti menyimpulkan bahwa *paraffin wax* mempunyai *thermal* dan *chemical stability* yang lebih baik daripada *salt hydrates*.

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 temperature 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.

Regin, dkk. (2009) pernah melakukan penelitian mengenai analisis secara numerik perilaku dari pemaketan (*packed bed*) sistem TES kalor laten pada Pemanas Air Tenaga Surya. 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.

Choi, (1995) melakukan penelitian tentang nanofluid yaitu dengan cara menambahkan tembaga fasa-nano ke dalam HTF konvensional. Hasil penelitian yang diinginkan berupa perbandingan konduktifitas termal sebelum dan setelah penambahan tembaga fasa-nano. Hasil dari penelitian ini yaitu dengan penambahan nanophase tembaga dapat menaikkan nilai konduktifitas termal dan mengurangi daya pertukaran panas secara signifikan.

Penelitian Wang, (2007) tentang penggunaan nanomaterial pada fluida untuk meningkatkan perpindahan panas secara konveksi. Pada penelitian ini

perpindahan panas konveksi dapat ditingkatkan melalui mengubah laju geometri dan meningkatkan konduktivitas termal fluida tersebut. Pencampuran nanomaterial pada fluida dapat meningkatkan konduktivitas termal, salah satu contoh nanomaterial yang digunakan pada penelitian adalah Cu atau tembaga. Fluida pada umumnya yang digunakan adalah air, minyak dan oli..

Penelitian tentang penyimpanan energi perubahan fasa dilakukan oleh Farid dkk. (2004). 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.

Tabel 2. 1 Ringkasan Jurnal

Penulis	Judul	Tujuan	Hasil
Bellan, dkk. (2014)	Numerical Analysis of Charging and Discharging Performance of a Thermal Energy Storage System with Encapsulated Phase Change Material	Sistem penyimpanan energi termal dengan kapsul berisi PCM berbentuk bola	Waktu yang diperlukan PCM dalam proses <i>charging</i> lebih cepat daripada <i>discharging</i> .
Choi S.U.S, (1995)	<i>Enhancing Thermal Conductivity of Fluids With Nanoparticles</i>	Mengetahui perbandingan konduktivitas termal sebelum dan setelah penambahan CU fasa nano	Penambahan nano phase tembaga dapat menaikkan nilai konduktivitas termal dan mengurangi daya pertukaran panas secara signifikan.
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
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 melebur pada saat proses charging	efisiensi thermal dan massa dari <i>paraffin wax</i> yang melebur pada saat proses charging dan hasil efisiensi thermal pada proses <i>discharging</i>

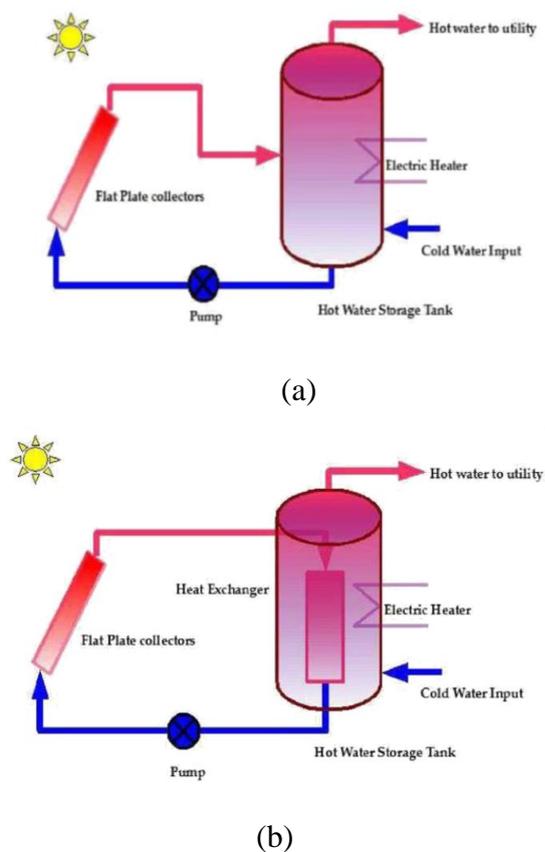
Khan, dkk. (2011)	Perfomance Analysis of Solar Water Heater	Membandingkan 2 tipe LHS yaitu <i>paraffin wax</i> dan <i>salt hydrates</i> .	<i>Paraffin wax</i> mempunyai <i>thermal</i> dan <i>chemical stability</i> yang lebih baik daripada <i>salt hydrates</i>
Najib, M (2016)	Penggunaan <i>Paraffin Wax</i> sebagai Penyimpan Kalor pada Pemanas Air Tenaga Matahari <i>Thermosyiphon</i>	Meneiliti tentang penggunaan material <i>latten heat storage</i> (LHS) yang disebut dengan <i>phase change material</i> (PCM) pada pemanas air tenaga surya	Tangki TES yang didalamnya terdiri dari beberapa pipa kapsul yang berisi <i>paraffin wax</i> yang dapat mengendalikan penurunan dari efesiensi yang diperoleh dari pengumpulan energi pada saat istensitas radiasi cahaya dari matahari yang mulai menurun
Regin, dkk. (2009)	An Analysis of a Packed Bed Latent Heat Thermal Energy Storage System using PCM Capsule	Menganalisis secara numerik perilaku dari pemaketan sistem TES kalor laten pada PATS.	Semakin tinggi temperatur <i>inlet</i> HTF maka proses <i>charging</i> akan semakin cepat, sebaliknya semakin kecil temperatur inlet maka proses pembekuan semakin cepat.
Sharif dkk. (2015)	Review of the Application of Phase Change Material for Heating and Domestic Hot Water Systems	Mengetahui efisiensi rata-rata pada PCm jenis <i>paraffin wax</i>	Efisiensi rata-rata ada PATS lebih tinggi dari <i>integrated collector storage</i> , hasil tersebut maksimal ika pada PCM yang digunakan memiliki <i>melting point</i> tidak jauh beda dari unjuk kerja alat
Sudrajat dan Sentosa (2014)	Perancangan <i>Solar Water Heater</i> Jenis Plat Datar	Supaya system PATS dapat bekerja pada system yang diinginkan ( $\pm 45^{\circ}\text{C}$ )	Medapatkan temperatur rata-rata mencapai $52^{\circ}\text{C}$ . sistim PATS

	Temperatur Medium untuk Aplikasi Penghangat Air Mandi		tersebut dapat memenuhi kebutuhan air panas untuk mandi
Sukamta, dkk. (2015)	Studi Eksperimental Penyimpanan Energi Termal pada Tangki Pemanas Air Tenaga Surya yang Berisi PCM	Meneliti tentang paraffin wax sebagai penyimpanan panas menggunakan PCM	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 dalam tangki, karena dapat meminimalisir rugi rugi termal yang terbuang.
Wang X.Q, (2007)	Heat transfer characteristics of nanofluids	Peningkatan konduktivitas termal fluida dengan menggunakan nanomaterial	Pencampuran nanomaterial pada fluida dapat meningkatkan konduktivitas thermal

### 2.1.2 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 thermal 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 yaitu sistem yang masih memerlukan perangkat pendukung atau alat penukar kalor dalam pendistribusiannya.

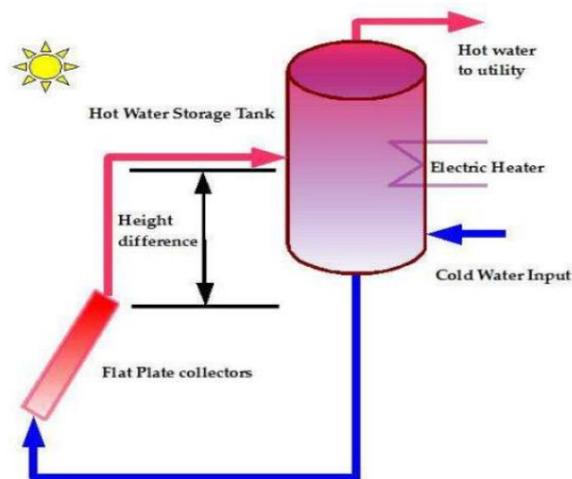
Berikut ini adalah skema sistem aktif dan sistem tertutup ditunjukkan pada gambar 2.1 point (a) dan point (b).



Gambar 2. 1 PATS sistem aktif, (a) sistem terbuka, (b) sistem tertutup  
(Sumber: Dwivedi, 2009)

### 2.1.3 Solar Water Heater (SWH) / Pemanas Air Tenaga Surya Pasif (Sistem Termosiphon)

Dwivedi, (2009) menjelaskan bahwa sistem PATS merupakan sistem yang menggunakan konveksi natural sebagai penggerak HTF. Hal ini dapat terjadi karena adanya pengurangan fluida 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.



Gambar 2.2 Sistem thermosiphon dengan pemanas tambahan  
(Sumber: Dwivedi, 2009)

Gambar di atas menunjukkan Sistem *thermosiphon* dengan pemanas tambahan. Sistem *thermosiphon* 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.

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Thermal Energy Storage

*Thermal Energy Storage* (TES) adalah alat untuk menyimpan energi panas. Pemakaian storage berguna untuk menyimpan energi agar dapat dipakai saat dibutuhkan. Energi termal pada TES dapat disimpan dan dilepas karena terdapat proses *melting, cooling, heating, solidifying, thermo-chemical* atau proses *vaporizing* sesuai yang dibahas pada penelitian Lefebvre dan Tezel (2017). Salah satu alternatif energi panas yang sering dijumpai adalah panas matahari. Tetapi panas matahari hanya optimal saat siang hari atau saat intensitas cahaya tinggi, hal ini yang membuat TES sangat diperlukan saat panas matahari tidak optimal atau saat malam hari.

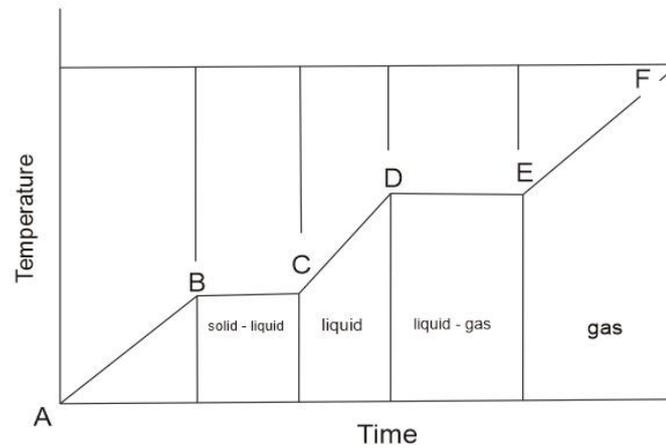
TES pada aplikasinya dikelompokkan menjadi 3 macam, yaitu *latent heat storage* (LHS), *sensible heat storage* (SHS), dan *thermo-chemical storage*, yang akan dibahas lebih lanjut dalam uraian di bawah ini, yaitu :

#### 1. *Latent Heat Storage*

*Latent haet 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 2.3 dan jumlah kalor dalam satuan joule terdapat pada persamaan 2.1 Regin, dkk (2008).

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

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 2.3 Grafik temperatur waktu pada pemanasan suatu zat  
(Sumber: Regin, dkk 2008)

## 2. *Sensible Heat Storage* (SHS)

*Sensible Heat Storage* (SHS) merupakan salah satu aplikasi dari TES yang energi tersimpan didalamnya dengan perubahan suhu benda. Pada SHS terdapat dua macam media yaitu media cair dan padat. Media padat pada SHS contohnya logam sedangkan media cair yaitu seperti air, minyak, dan *molten salts* sebagai penyimpanan energi. Kelebihan utama pada SHS adalah biaya yang relatif murah dan mudah didapat. Namun SHS memiliki kekurangan yaitu adanya *heat loss* pada media penyimpanan panas, densitas energi yang rendah diantara LHS, dan *Thermo-Chemical Storage*.

Total energi pada SHS dapat dicari atau dihitung dengan menggunakan persamaan 2.2 (Sharma, 2009).

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

Perbandingan atau selisih temperatur awal ( $T_i$ ) dan temperatur akhir ( $T_f$ ) dalam satuan  $^{\circ}\text{C}$  ; massa material penyimpan ( $m$ ) dalam satuan kg ; massa jenis ( $\rho$ ) dalam satuan  $\text{kg}/\text{m}^3$  ; kalor jenis rata-rata material penyimpanan saat proses ( $C_{ap}$ ) dalam satuan ( $\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ ) dan volume material ( $V$ ) dalam satuan  $\text{m}^3$ .

### 3. *Thermo-Chemical Storage*

*Thermo-chemical storage* adalah penggunaan teknologi modern di bidang penyimpanan panas. Sistem penyimpanan panas dalam *Thermo-chemical storage* yaitu memakai reaksi kimia dalam penyerapan energi. Proses pada *Thermo-chemical storage* yaitu energi masuk tersimpan akibat reaksi *reversible* dan melepas kembali ketika reaksi tersebut dibalik. Keunggulan *Thermo-Chemical Storage* adalah mempunyai densitas energi yang tinggi, namun kekurangan tipe ini membutuhkan katalisator untuk melepas energi dan mengatur reaksi kimianya.

#### **2.2.2 Phase Change Material**

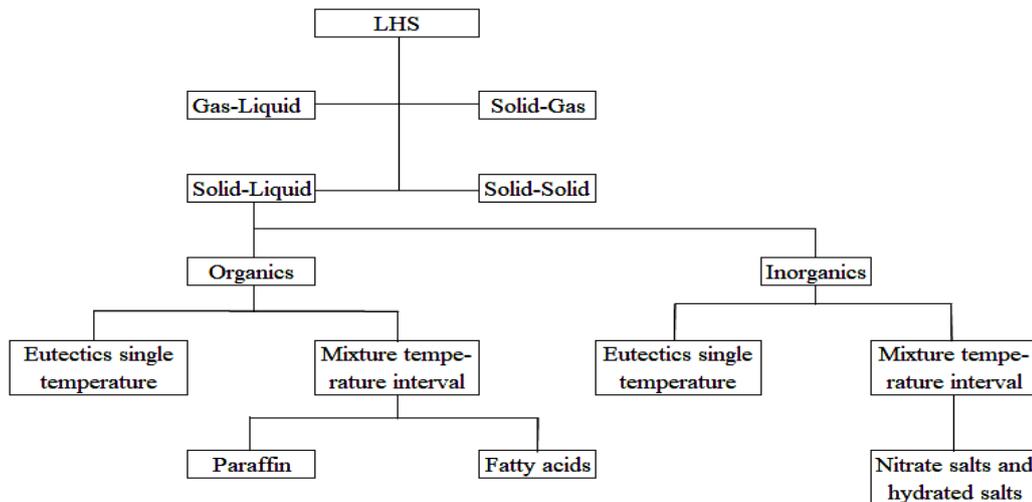
PCM mempunyai beberapa fungsi, salah satunya pada bangunan yaitu sistem pemanas di bawah lantai untuk menyimpan panas dan mendukung pengaturan suhu ruangan. Fungsi lainya yaitu sebagai pemanas air tenaga surya (PATS), dimana PCM digunakan untuk menyimpan panas secara efisien (Hasenöhr, 2009). Material PCM yang digunakan untuk PATS pada umumnya yaitu *paraffin wax*, karena mempunyai sifat densitas energi yang tinggi (~ 200 kJ/kg), konduktivitas termalnya rendah (~ 0,2 W/m.°C) dan sifat termalnya stabil di bawah 500°C Nadjib dkk, (2015).

Media air merupakan PCM yang dapat mendinginkan makanan atau minuman dengan es, karena air mempunyai titik leleh pada 0°C. Sehingga air tidak dapat maksimal digunakan untuk penyimpanan panas yang biasanya suhu kerja di atas 0°C. Hal tersebut merupakan contoh dalam kehidupan tentang kalor yang dapat diserap dalam perubahan fasa (Hasenöhr, 2009).

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 rendah.	Memiliki sifat kimia yang stabil.	Tersedia banyak.
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	

Menurut Agyenim, dkk (2010) menjelaskan bahwasannya 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 fase padat-gas atau cair-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 besaar dan kompleks. Klasifikasi jenis PCM dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Klasifikasi phase change material (PCM)  
(Sumber: Gil, dkk 2010)

### 2.2.3 Perpindahan Panas Konduksi

Konduksi merupakan perpindahan panas yang terjadi tanpa disertai gerakan makroskopik molekul mediumnya. Konduksi bisa terjadi pada medium cair, padat, dan gas dengan catatan medium tersebut tidak bergerak. Terdapat perpindahan kalor dalam satuan waktu, satuan luas, serta laju perpindahan kalor dapat dinyatakan dengan Hukum Fourier yang dijabarkan pada persamaan 2.3, 2.4, dan 2.5.

1. Perpindahan kalor (satuan waktu)

$$Q = \int_0^{\Delta t} Q \dot{d}T \quad (\text{J})$$

$Q$  adalah Kalor total yang dipindahkan. Menggunakan Satuan energi (Joule).

$$Q = Q \cdot \Delta t \quad (\text{J})$$

$Q \dot{d}$  adalah kecepatan pemindahan kalor. Menggunakan satuan daya (Joule/detik atau Watt).

Jika  $Q \dot{d}$  konstan terhadap  $t$

$$\text{Maka} \quad Q \dot{d} = \frac{Q}{\Delta t} \quad (2.3)$$

Perpindahan kalor per-satuan waktu, selanjutnya disebut dengan laju perpindahan kalor.

2. Perpindahan kalor (satuan luas)

$$q_{\text{dot}} = \frac{Q_{\text{dot}}}{A} \quad (\text{W/m}^2)$$

Laju perpindahan kalor per-satuan luas yang selanjutnya disebut fluks kalor.

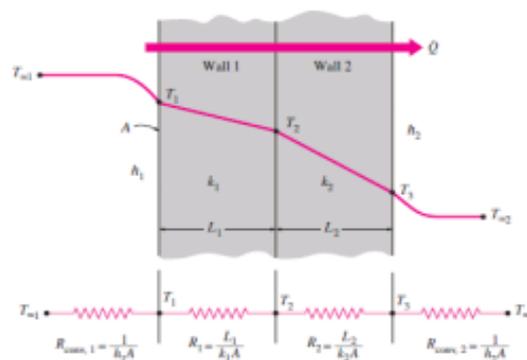
3. Laju perpindahan kalor konduksi (Hukum Fourier)

Laju perpindahan kalor konduksi dapat dinyatakan dengan Hukum Fourier :

$$Q = -k.A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.4)$$

Q merupakan laju perpindahan panas (Watt), tanda negatif menunjukkan bahwa kalor berpindah ke arah lokasi temperatur yang lebih rendah, k adalah konduktivitas termal (W/m.K), A adalah luas penampang yang terletak pada aliran panas ( $\text{m}^2$ ) dan  $\frac{\Delta T}{\Delta x}$  adalah perubahan atau perbedaan temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Skema perpindahan panas secara konduksi dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Skema perpindahan panas secara konduksi ( Sumber : Cengel,2002 )

### 2.2.4 Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan panas konveksi merupakan transfer panas antara permukaan padat dan fluida yang bergerak. Hal ini mengakibatkan efek kombinasi antara konduksi dan fluida bergerak. Fluida berupa dalam fasa cair

atau fasa gas, syarat utama mekanisme pada perpindahan panas secara konveksi yaitu adanya aliran fluida.

Perpindahan panas konveksi dapat dinyatakan pada persamaan sebagai berikut :

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.5)$$

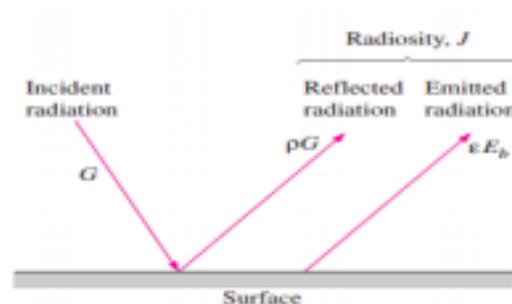
dimana  $Q$  merupakan laju perpindahan panas konveksi (W),  $h$  merupakan koefisien perpindahan panas konveksi ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ),  $A$  merupakan luas penampang ( $\text{m}^2$ ), dan  $\Delta T$  merupakan perubahan atau perbedaan temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ).

### 2.2.5 Perpindahan Panas Radiasi

Radiasi adalah perpindahan panas dari benda yang bertemperatur tinggi ke benda yang bertemperatur rendah tanpa bantuan perantara. Hal ini sangat jauh berbeda dengan mekanisme konduksi dan konveksi, radiasi tidak perlu medium perpindahan panas. Perpindahan radiasi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$Q = \sigma \cdot A (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.6)$$

Dimana  $Q$  merupakan laju perpindahan panas radiasi (W),  $\sigma$  merupakan konstanta Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$ ),  $A$  merupakan luas permukaan ( $\text{m}^2$ ),  $T_1$  dan  $T_2$  merupakan temperatur permukaan 1 dan 2 (K) (Ginting, 2018). Skema perpindahan panas radiasi dapat dilihat pada Gambar 2.6.

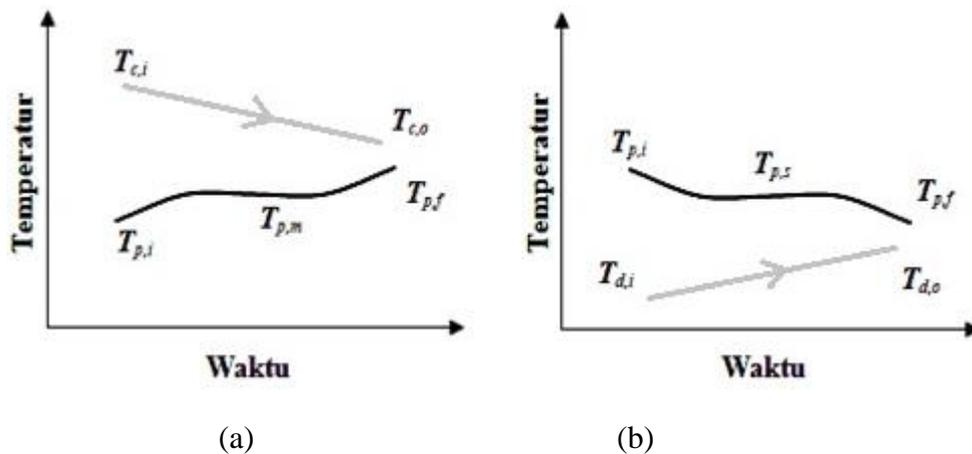


Gambar 2.6 Skema perpindahan panas radiasi (Sumber : Cengel, 2002)

### 2.2.6 Charging dan Discharging

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

Proses *discharging* sendiri adalah proses pelepasan energi panas yang telah tersimpan pada PCM saat proses *charging*. Pada proses ini temperatur awal tinggi lalu sedikit demi sedikit akan menurun dan terjadi perubahan fasa *liquid-solid* atau *solidification*. Selama proses ini temperatur PCM akan turun dan berhenti ketika temperatur PCM sama dengan temperature HTF. Grafik perubahan temperatur pada proses *charging* dan proses *discharging* dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Grafik temperatur pada LHS (a) proses charging (b) proses discharging