

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASASAN TEORI

#### 2.1. Tinjauan Pustaka

##### 2.1.1. Penggunaan PCM pada PATS sistem *thermosyphon*

Penelitian PATS dengan sirkulasi *thermosyphon* pernah dilakukan oleh Canbagzoglu dkk (2005). Tangki yang dipakai yaitu tipe vertikal dan di dalam tangki tersebut terdapat kapsul bermaterial *polyethylene* yang berisikan PCM. PCM yang digunakan adalah ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), ( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ), ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), dan ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , *Glauber's salt*). Peneliti melakukan dua jenis eksperimen yaitu, PATS menggunakan PCM dan PATS tanpa PCM yang digunakan sebagai pembanding. Saat dilakukan proses penyimpanan air panas, PATS yang menggunakan PCM untuk produksi air panas lebih cenderung mengalami peningkatan jumlah kalor yaitu sebesar 2,59 – 3,45 kali dibanding dengan PATS tanpa PCM. Peneliti juga menemukan fakta, PCM yang berbahan ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) dan ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , *Glauber's salt*) mempunyai prestasi penyimpanan kalor yang paling baik.

##### 2.1.2. Penggunaan *paraffin* pada PATS sistem *thermosyphon*

Penelitian tentang penyimpan energi termal selama proses *charging* pada PATS sistem *thermosyphon* pernah dilakukan oleh Nadjib dan Suhanan (2013). Peneliti memakai tangki kapasitas 31,27 liter dimana air dan *paraffin wax* difungsikan sebagai PCM. *Paraffin wax* diwadahi kapsul yang berjumlah 16 buah yang berbentuk silinder dan massa total *paraffin wax* 8,95 kg. Selain itu, pipa kapsul yang digunakan panjangnya 1,63 m dan berdiameter luar 2,54 cm. Penelitian PATS sistem *thermosyphon* tentang integrasi air dan *paraffin wax* sebagai PCM mampu menyimpan energi kumulatif sebesar 3,95 MJ selama proses *charging* dengan waktu 340 menit. Disamping itu, sistem TES dapat menghasilkan temperatur rata-rata HTF tertinggi sebesar 65,39 °C dan temperatur PCM tertinggi adalah 67,58 °C.

Murali dkk (2015) pernah melakukan studi eksperimental PATS dengan mengintegrasikan air sebagai *heat transfer fluid* (HTF) dan *paraffin wax* tipe 56 sebagai PCM. Peneliti menempatkan PCM di dalam tangki dan PCM dikemas dengan kapsul yang berbahan aluminium. Tipe tangki yang dipakai adalah posisi vertikal bermaterial *stainless steel* dan volumenya 78 liter. PATS yang digunakan pada penelitian ini adalah tipe pasif *thermosyphon*. Pengujian yang telah dilakukan menghasilkan beberapa keuntungan diantaranya seperti, PATS dengan menggunakan PCM di dalam tangki memberikan performa yang lebih baik dibandingkan PATS tanpa PCM di dalam tangki. Waktu pelepasan energi termal untuk PATS memakai PCM adalah 1530 menit sedangkan waktu yang diperlukan tanpa PCM adalah 1110 menit. Melihat perbandingan waktu tersebut menunjukkan bahwa penggunaan PCM pada PATS meningkatkan kinerja dari PATS. Energi penyimpanan kalor cenderung mengalami peningkatan terutama pada saat intensitas radiasi matahari tinggi. Efisiensi maksimal tercapai sebesar 82,44% terutama pada pukul 02:00 siang.

Mozafari dkk (2015) pernah membuat penelitian dengan sistem TES menggunakan *paraffin* produk komersial sebagai material penyimpan kalor laten selama proses *charging*. Unit penyimpan energi terbuat dari pipa tembaga berjumlah 7 buah diameter masing-masing pipa yaitu 10 mm dimana HTF berupa air yang disirkulasikan di dalam pipa, sementara PCM diposisikan tepat di dalam tangki tipe vertikal yang dikemas di dalam tabung dengan material aluminium. PATS pada penelitian ini mempunyai kapasitas 84 liter. Peneliti menyatakan bahwa *paraffin* yang digunakan sebagai PCM sangat efektif untuk penyimpanan kalor pada PATS. Temperatur maksimal rata-rata di dalam tangki pada pukul 13.00 mencapai 75,8 °C sedangkan temperatur maksimal rata-rata pada pukul 17.00 adalah 57,8 °C.

Penelitian PATS tentang peningkatan kapasitas penyimpan energi termal pernah dilakukan oleh Suharti dkk (2015). PATS terdiri dari kolektor matahari, tangki air horisontal dan pipa-pipa sirkulasi serta *paraffin wax* difungsikan sebagai PCM. Peneliti menyimpulkan bahwa dengan penambahan *paraffin*, temperatur

keluaran tertinggi diperoleh sebesar 89 °C yang diakibatkan oleh tingginya intensitas radiasi matahari sekitar PATS mencapai 1490 W/m<sup>2</sup>.

## 2.2. Landasan Teori

### 2.2.1. Radiasi Matahari

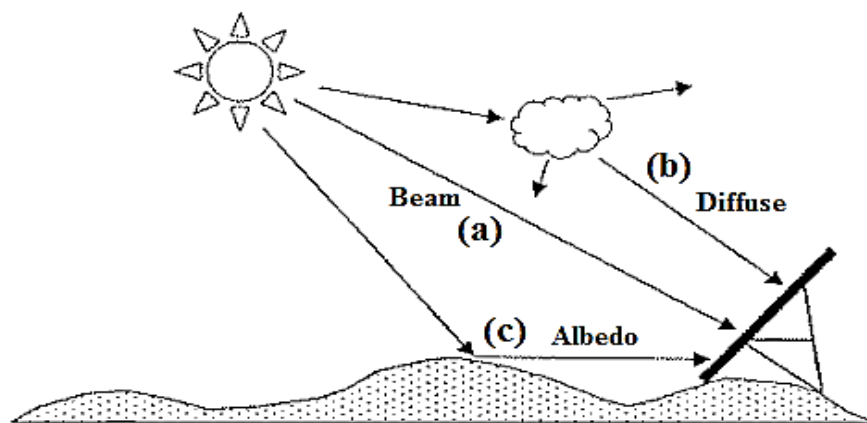
Radiasi adalah proses perpindahan kalor yang bersifat memancar ke segala arah dan dapat terjadi tanpa melalui media. Jika energi radiasi menimpa permukaan suatu bahan maka sebagian dari energi akan dipantulkan, serta sebagian lagi akan diserap dan sebagian yang lainnya akan ditransmisikan (Duffie dkk, 1980).

Matahari adalah bola raksasa yang berisikan zat gas yang mempunyai temperatur sangat tinggi berdiameter sekitar  $1,39 \times 10^9$  m. Temperatur efektif sebagai benda hitam adalah 5762 K sementara temperatur pada daerah inti berkisar  $8 \times 10^6 - 40 \times 10^6$  K (Duffie dkk, 1980). Matahari pada umumnya dapat diartikan reaktor fusi yang bergerak terus menerus dimana antara hidrogen dikonversi menjadi helium. *Oulput* dari reaksi fusi tersebut yaitu energi elektromagnetik. Energi keseluruhan keluaran matahari yang ada dipermukaan adalah mencapai 63 MW/m<sup>2</sup> serta dapat memancar ke segala arah. Radiasi matahari pada saat yang diterima oleh permukaan di batas luar atmosfer bumi yang tegak lurus radiasi matahari tersebut dinamakan ekstraterrestrial (*extraterrestrial radiation, G<sub>on</sub>*). Pada permukaan bagian luar atmosfer bumi pada jarak rata-rata di antara matahari dan bumi, jumlah energi matahari tiap satuan waktu yang diterima suatu luasan tegak lurus arah penyebaran radiasi adalah 1366,1 W/m<sup>2</sup> (Kalogirou, 2009). Nilai ini dapat disebutkan konstanta matahari (*solar constant, G<sub>sc</sub>*). Nilai radiasi ekstraterrestrial bersifat fluktuasi yaitu dapat mengalami perubahan tidak tetap sepanjang waktu tergantung pada ke-*n* dalam waktu satu tahun hal itu sesuai dengan persamaan 2.1 (Duffie dkk, 1980).

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365}\right) \quad (2.1)$$

Selanjutnya sesudah melewati ruang angkasa, radiasi matahari mulai memasuki atmosfer bumi. Radiasi matahari sebagian ada yang diserap oleh atmosfer, awan dan partike-partikel di sekitar atmosfer, serta sebagianya lagi untuk

dipantulkan kembali ke luar angkasa dan yang diserap bumi. Pada sekitar atmosfer bumi, diantaranya radiasi disebar dan hal itu dinamakan *diffuse radiation*. Radiasi sebaran pertama-tama ditampung dengan unsur pokok di udara seperti contohnya, uap air, CO<sub>2</sub>, debu, aerosol (contoh: partikel sulfat, jelaga, partikel garam laut), awan dan lain sebagainya. Setelah itu dilepas sebagai energi sebaran ke berbagai arah. Sebagian radiasi matahari ada yang secara langsung menuju permukaan bumi untuk mengikuti garis lurus tanpa disebar oleh atmosfer, radiasi tersebut dinamakan *beam radiation* atau *direct solar radiation*. Pada sisi permukaan bumi sama yaitu sama-sama menerima radiasi pantulan (*reflected radiation*) baik yang berasal dari awal ataupun dari permukaan bumi. Terjadinya radiasi matahari menuju permukaan bumi dengan beberapa cara yang berbeda-beda seperti yang disajikan pada Gambar 2.1.



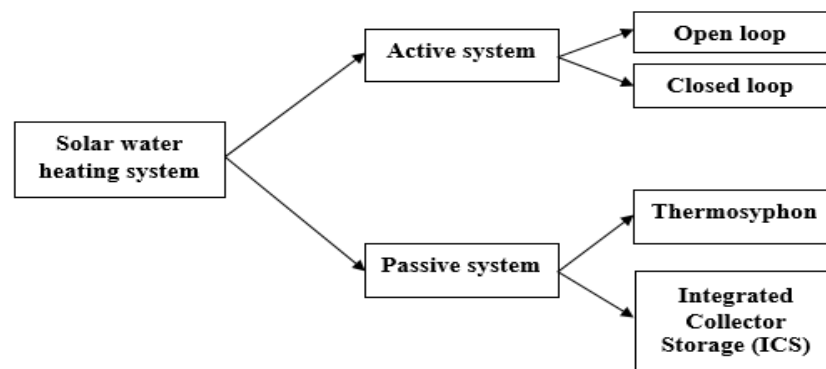
Gambar 2.1. Beberapa cara radiasi mencapai bumi (Anonim, 2009)  
(a) Secara langsung, (b) secara sebaran, (c) secara pantulan

Sejumlah *diffuse radiation* dan *beam radiation* sering disebut dengan istilah *global/total solar radiation*. Pada permukaan bumi saat siang hari yang cerah, total radiasi matahari dapat diperkirakan mencapai 1000 -1200 W/m<sup>2</sup> untuk pada bagian bidang tegak lurus ke arah radiasi (Sen, 2008). Alat pengukur radiasi secara langsung dan sebaran adalah piranometer. Alat pengukur radiasi ini mampu melakukan pengukuran permukaan horisontal dan permukaan miring. Alat ini

mempunyai kegunaan penting yaitu untuk melakukan pembacaan energi masuk bagi kolektor matahari.

### 2.2.2. Pemanas Air Tenaga Surya

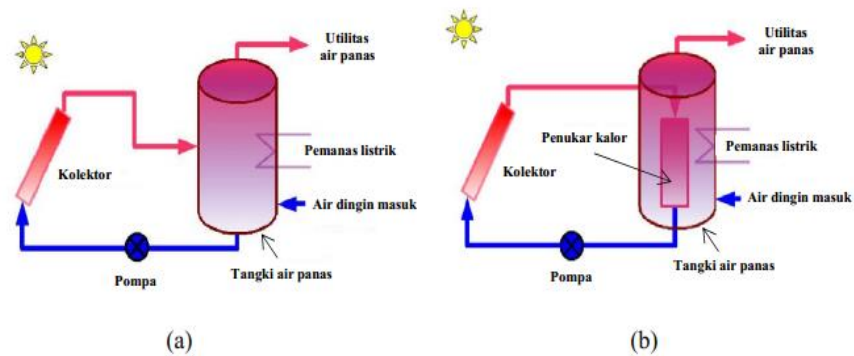
Pemanas air tenaga surya (PATS) adalah peralatan yang menghasilkan air panas dengan memanfaatkan radiasi matahari sebagai energi utamanya (Purnama dkk, 2015). PATS dapat dikelompokkan menjadi dua sistem yaitu sistem aktif dan pasif sebagaimana disajikan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Sistem PATS (Jamar, 2016)

#### a. PATS sistem aktif

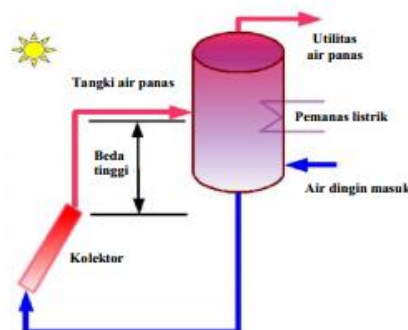
PATS sistem aktif menggunakan pompa untuk mensirkulasikan fluida kerja. Sistem ini pada umumnya disebut dengan istilah sistem sirkulasi paksa. PATS sistem aktif dikelompokkan menjadi 2 jenis yaitu, sistem aktif-langsung (*direct/open loop*) serta aktif-tak langsung (*indirect/close loop*) (Gambar 2.3). PATS sistem aktif-langsung merupakan sistem pemanas air dimana kolektor bekerja untuk memindahkan kalor dengan cara langsung menuju tangki penampungan air panas tanpa memerlukan perantara alat penukar kalor lainnya. PATS dengan sistem aktif-tak langsung merupakan sistem pemanas air dengan cara perpindahan kalor fluidanya tidak tercampur menjadi satu dengan fluida kerja yang berada di dalam tangki penyimpanan air panas tersebut.



Gambar 2.3 PATS sistem (a) aktif-langsung (b) aktif-tidak langsung (Dwivedi, (2009)

b. PATS sistem pasif

PATS dengan sistem pasif merupakan alat pemanas air bersumber energi matahari dimana sirkulasi fluida kerjanya tidak memakai alat mekanikal. Sirkulasi air pada PATS terjadi dengan cara konveksi alamiah dari kolektor menuju tangki penampung air panas ataupun sebaliknya yang disebut sirkulasi *thermosyphon*. Pada saat temperatur air bagian atas kolektor tinggi, massa jenis air rendah. Sementara untuk air pada bagian bawah kolektor serta yang ada di dalam tangki massa jenisnya akan relatif tinggi, oleh karena itu mengakibatkan terjadinya air dari kolektor bergerak menuju tangki dan air dingin yang ada pada tangki bersirkulasi menuju ke kolektor. Proses ini akan terjadi terus menerus sampai temperatur pada kolektor dan tangki mengalami kesetimbangan.



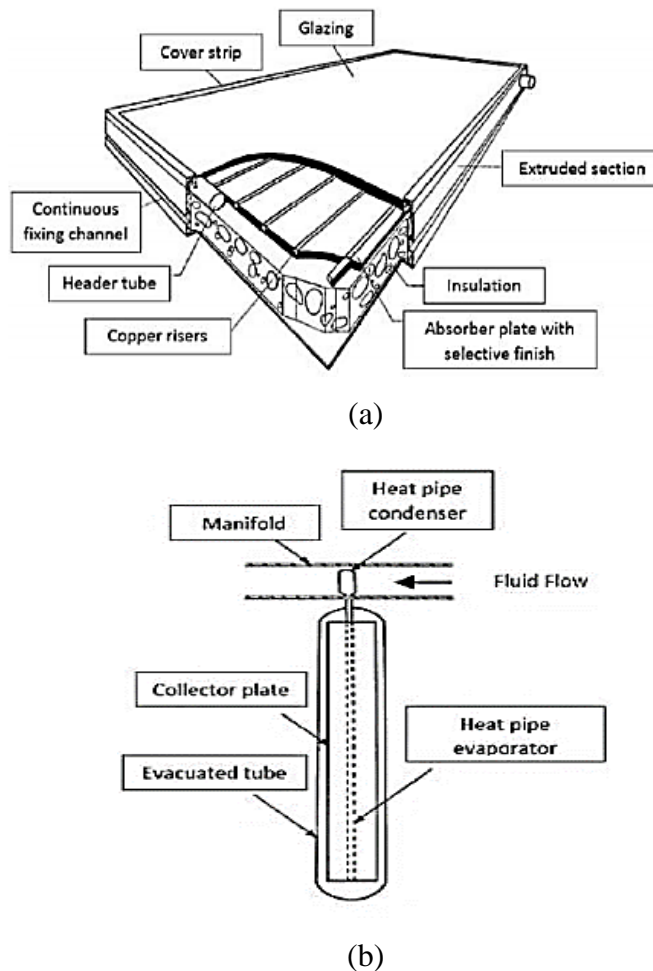
Gambar 2.4. PATS sistem *thermosyphon* (Dwivedi, 2009)

Kualitas dari sistem PATS dapat mempengaruhi keandalan fisik sistem serta prestasi termalnya seperti, kemampuan menyerap kalor, kemampuan penyimpanan kalor, unit kolektor termal surya, unit tangki penyimpan air panas, minimnya rugi-rugi kalor kedua unit dan kemampuan responsif pemanas tambahan (Manurung, 2015).

Komponen utama pendukung dari sistem PATS adalah kolektor matahari, tangki penyimpan dan sistem perpipaan.

#### 1. Kolektor matahari

Kolektor matahari yaitu alat utama penggerak yang ada pada sistem PATS. Cara kerja dari kolektor matahari adalah menyerap intensitas radiasi matahari serta mengkonversikan menjadi panas. Setelah itu panas yang dihasilkan didistribusikan ke air yang ada di dalam kolektor. Ada beberapa jenis kolektor penyerap panas adalah *Flat Plate Solar Collector System* (kolektor flat) dan *Evacuated Tube Solar Collector System* (kolektor tabung vacum) disajikan pada (Gambar 2.5).



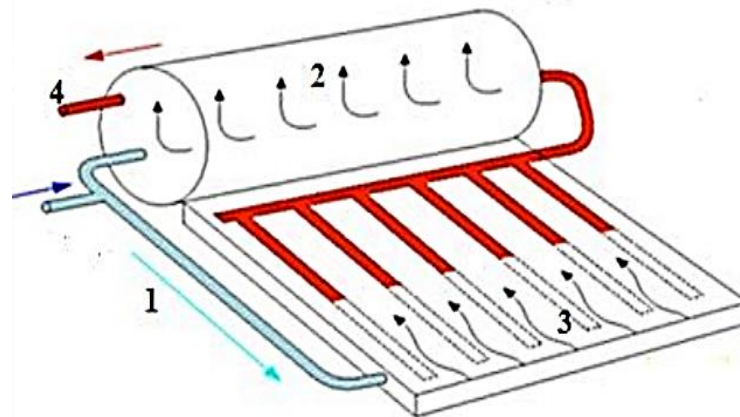
Gambar 2.5 (a) *Flat plate collector*, (b) *Evacuated tube solar collector* (Jamar, 2016)

## 2. Tangki penyimpanan

Tangki penyimpanan adalah tempat untuk menyimpan air yang sudah diproses dengan pemanasan dari kolektor matahari penyerap kalor. Agar tetap efisien dan efektif, tempat penyimpanan air panas dilapisi menggunakan pelapis sistem insulasi dengan tujuan supaya kalor yang ada di dalam tangki air tidak banyak yang hilang (*heat loss*).

Berikut ini beberapa komponen pendukung PATS yaitu, pemanas listrik dan katup pengaman (Gambar 2.6).





Gambar 2.6. Skema aliran air PATS sistem *thermosyphon* (Manurung, 2015)

Keterangan :

1. Pipa Air Dingin
2. Tangki Penyimpanan Air
3. Kolektor Matahari
4. Pipa Air Panas

### 3. Sistem perpipaan

Sistem perpipaan adalah komponen utama yang berfungsi sebagai penghubung untuk PATS. Pipa penghubung untuk PATS berupa pipa turun air dingin (*down pipe*), pipa naik air panas (*raiser pipe*) yang menghubungkan kolektor dengan tangki. Instalasi sistem perpipaan mempengaruhi performansi sistem PATS oleh karenanya penting untuk diperhatikan pada pemasangannya baik jarak pemasangan, ketinggian, sudut elevasi dan komponen penyambungannya.

#### 2.2.3. *Phase Change Material*

*Phase change material* (PCM) sebagai material yang dapat mengalami perubahan fasa pada saat menyerap dan melepaskan panas dimana struktur maupun susunan kimia tidak mengalami perubahan (Agyenim dkk, 2010).

Sharma dan Sagara (2005) menyatakan bahwa PCM mengalami beberapa perubahan seperti perubahan fasa dari padat ke cair yakni dinamakan proses endotermik oleh karenanya PCM menyerap kalor pada saat proses *charging*. Begitu

juga dengan perubahan fasa proses cair ke padat yaitu dinamakan eksotermik PCM yang melepaskan kalor pada saat proses *discharging*.

Pada saat pengujian dengan proses *charging*, PCM mulai mengalami pelelehan (*melting point*) tetapi dengan catatan proses pelelehan PCM dapat mencapai temperatur maksimal kemudian temperaturnya tetap tidak berubah (konstan) sampai proses *melting point* selesai. Saat kalor disimpan pada waktu proses *melting point* dinamakan dengan istilah kalor laten atau (*latent heat of fusion*).

Jenis material yang direkomendasikan digunakan sebagai PCM yaitu mempunyai kemampuan panas laten tinggi serta harus konduktivitas termal tinggi. Selain itu PCM mempunyai temperatur *melting point* yang dapat bekerja dengan rentang temperatur yang diizinkan, material PCM tidak reaktif, biaya kecil, reaksi kimia tidak berubah-ubah serta tidak menyebabkan korosi pada daerah sekitar PCM (Cabeza dkk, 2011).

PCM dikelompokkan menjadi 2 jenis, yaitu *organik* dan *non organik*. PCM jenis organik adalah media penyimpan kalor yang terdapat dari beberapa golongan hidrokarbon, asam, alkohol, freon serta polimer. Salah satu kelebihan menggunakan jenis media penyimpan kalor organik adalah sifat kimia dan fisik cenderung tidak fluktuasi (stabil) dan karakteristik termalnya sangat baik. Selain mempunyai kelebihan penyimpan kalor organik juga mempunyai kekurangan adalah, densitas cukup rendah, titik lebur rendah, konduktivitas termal rendah, mudah terbakar dan mudah mengalami perubahan volume (Guston, 1996).

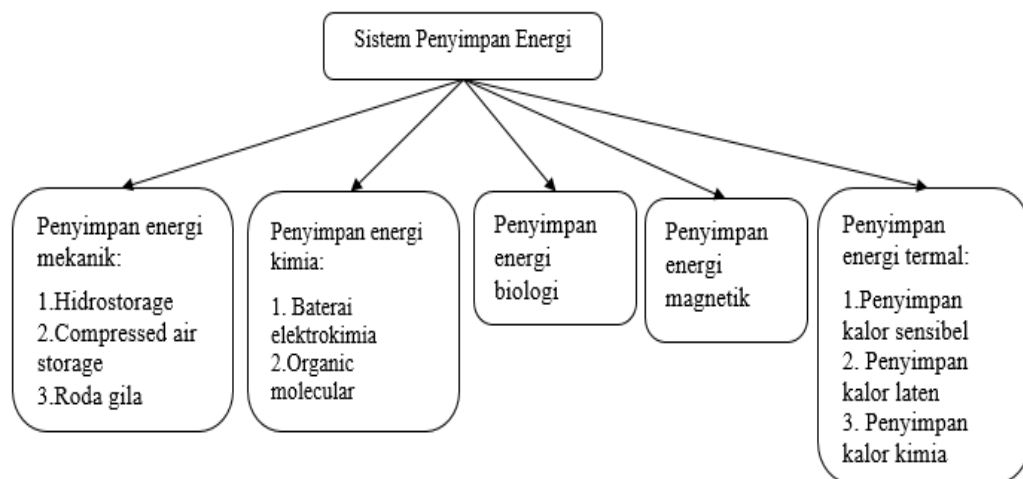
PCM non organik merupakan hasil perpaduan unsur metal pembentuk garam. Beberapa kelebihan menggunakan PCM non organik yaitu daya simpan energinya tinggi dan kemungkinan terbakarnya kecil. Pada lain pihak penyimpan kalor non organik juga ada kekurangan seperti, mudah korosif dan penurunan temperaturnya begitu cepat (Barrenechea dkk, 2010).

#### 2.2.4. Sistem Thermal Energy Storage

##### 2.2.4.1. Penyimpan energi

Dincer dan Rosen (2011) menyatakan bahwa penyimpan energi (*energy storage*) merupakan penyimpanan dari sejumlah bentuk energi yang dapat dipakai

pada saat akhir untuk memenuhi tujuan tertentu. Adapun media yang digunakan sebagai penyimpan energi pada umumnya dinamakan akumulator. Beberapa macam energi diantaranya, energi potensial (contohnya *chemical*), energi listrik dan energi kinetik semua bentuk jenis energi tersebut dapat ditampung dengan metode, sistem serta teknologi yang lainnya. Dari aplikasi penyimpanan energi termal tersebut memberikan kelebihan seperti, meminimalkan penggunaan energi, menjaga ketersediaan energi fosil dan yang terakhir adalah mengurangi polusi udara seperti, CO<sub>2</sub>. Sistem penyimpan energi terdiri dari beberapa macam seperti yang disajikan pada Gambar 2.7.



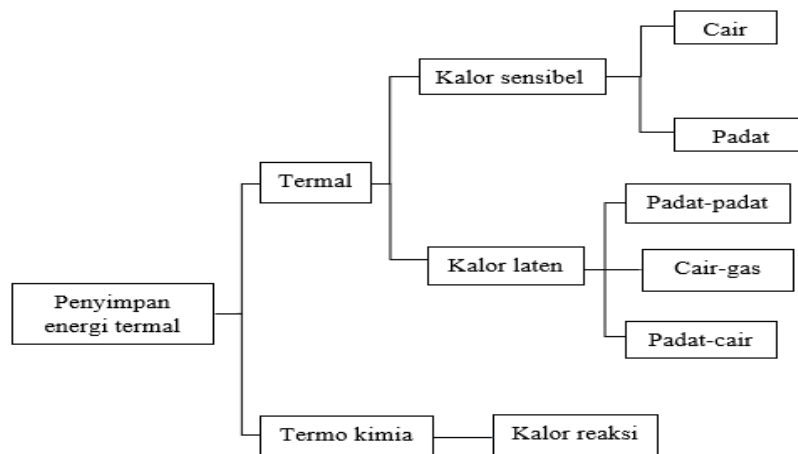
Gambar 2.7. Klasifikasi sistem penyimpanan energi (Gil dkk, 2010)

#### 2.2.4.2. *Thermal Energy Storage*

*Thermal energy storage* (TES) adalah penyimpanan energi dalam bentuk energi termal. Sistem pada TES memiliki kemampuan untuk meningkatkan efektivitas pemakaian instalasi energi termal. TES secara umum dimanfaatkan untuk meminimalisir adanya ketidaksesuaian antara suplai dengan permintaan energi.

Sistem TES dibagi menjadi beberapa klasifikasi yaitu *sensible heat storage* (SHS) dan *latent heat storage* (LHS). Kalor sensibel didefinisikan sebagai energi kalor yang dilepas (atau dihisap). Pada lain pihak, energi dibutuhkan sebagai pengubah benda padat ke benda cair (terjadinya perubahan wujud). Energi itu tersebut kalor peleburan (*heat of fusion*) sedangkan untuk perubahan fasa dari padat

menjadi cair disebut kalor penguapan (*heat of vaporization*) untuk perubahan fasa dari cair menjadi gas. Energi yang berhubungan dengan perubahan wujud benda disebut dengan kalor laten. Proses penyimpanan yang baik harus melibatkan beberapa tahap yaitu pengambilan energi (pada proses *charging*), penyimpanan energi (*storing*), serta terjadinya pelepasan energi (pada proses *discharging*). Dalam situasi tertentu, dalam tiga langkah tersebut kecil kemungkinan terjadi dengan cara bertahap. Pada Gambar 2.8. memberikan penjelasan tentang tipe-tipe penyimpanan energi termal pada penerapan energi surya.



Gambar 2.8. Tipe penyimpanan termal energi surya (Sharma dkk, 2010).

a. *Sensible Heat Storage*

Sistem *Sensible heat storage* (SHS), energi dalam bentuk kalor tersimpan dalam bentuk perbedaan temperatur (Gultom, 2013). Pada sistem SHS bekerja berdasarkan kapasitas kalor serta perubahan material pada waktu proses *charging* maupun *discharging*. Besarnya jumlah kalor yang tersimpan (dalam *joule*) bergantung pada kalor jenis rata-rata media saat proses ( $c_{ap}$ , J/kg. °C), selisih kisaran temperatur akhir ( $T_f$  °C) dan temperatur awal ( $T_i$  °C) media serta massa material penyimpan ( $m$ , kg) seperti persamaan 2.2 (Sharma, 2009).

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

$\rho$  dan  $V$  masing-masing yaitu massa jenis ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) dan volume material di tangki penyimpan ( $\text{m}^3$ ).

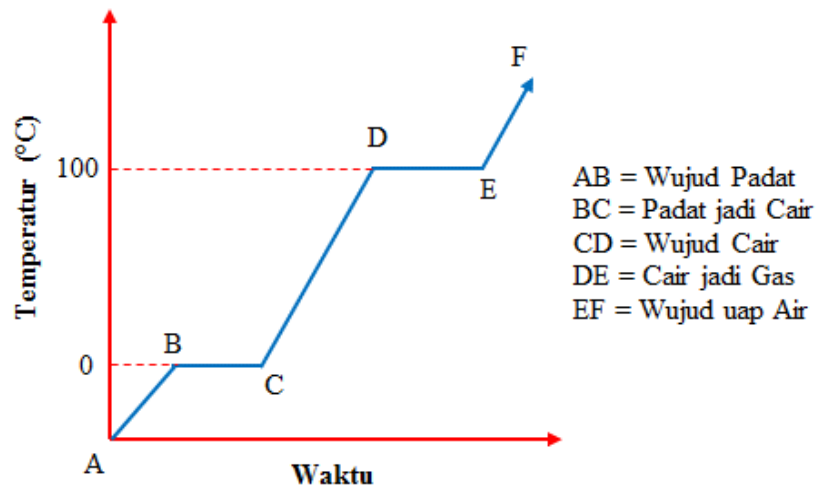
Beberapa contoh material yang dapat diaplikasikan pada SHS yaitu batu, bata merah, beton, serta air. SHS yang efektif digunakan yaitu air dengan berbagai pertimbangan tidak hanya keberadaanya cukup mudah didapat melainkan mempunyai kelebihan panas jenis yang tinggi. Sedangkan untuk memenuhi aplikasi temperatur di atas 100 °C dibutuhkan larutan tambahan seperti larutan garam dan logam cair. Pada aplikasi ini pemanasan udara biasanya digunakan batu untuk material penyimpan energi.

b. *Latent Heat Storage*

Prinsip kerja *Latent heat storage* (LHS) berdasarkan pada kalor yang diserap maupun kalor yang dilepas material penyimpan melewati perubahan fasa dari perubahan padat ke cair atau sebaliknya dari perubahan cair ke padat. PCM adalah jenis Material yang sering digunakan pada LHS. Gambar 2.9. menyebutkan pertambahan energi bagian dalam apabila kalor ditambahkan dengan suatu zat lain. Pada Gambar itu menggambarkan proses pemanasan sensibel dan laten. Pertama-tama pada titik A bentuk zat masih dalam kondisi padat, Akan tetapi pada saat diberikan kalor secara berulang-ulang mula-mula memberikan dampak pemanasan sensibel zat padat (A - B) dengan diikuti terjadinya perubahan bentuk padat-padat dikarenakan ada perubahan struktur kristal (B - C), selanjutnya terjadi pemanasan sensibel zat padat lagi (C - D). Apabila kalor terus menerus ditambahkan, hal itu akan mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk zat padat ke cair (D - E), pemanasan sensibel fasa cair (E-F), perubahan bentuk cair ke gas (F - G) serta kemudian pemanasan sensibel gas (G - H). Menurut Regin dkk (2008) bahwa banyaknya kalor (dalam *Joule*) ketika proses berlangsung dapat diketahui dari persamaan sebagai berikut:

$$Q = m \left[ \int_{T_A}^{T_D} c_{p,s}(T) dT + L_p + L + \int_{T_E}^{T_F} c_{p,l}(T) dT + L_g + \int_{T_G}^{T_H} c_{p,g}(T) dT \right] \quad (2.3)$$

Besaran-besaran seperti persamaan (2.3) yaitu:  $m$  adalah massa material (kg);  $c_{p,s}$ ,  $c_{p,l}$  dan  $c_{p,g}$  berturut-turut yaitu kalor jenis zat fasa padat, fasa cair serta fasa gas (J/kg. °C); dan  $L_p$ ,  $L$  dan  $L_g$  masing-masing adalah pemanasan laten perubahan fasa pada ke padat, fasa padat ke cair dan cair ke gas (J/kg).



Gambar 2.9. Temperatur waktu pada saat proses pemanasan zat (Dwivedi, 2009).

c. *Chemical heat storage*

Sistem termo-kimia bergantung pada adanya energi yang diserap dan dilepas dalam pemisahan dan pembentukan ikatan molekular pada reaksi kimia yang reversibel sempurna. Dalam fenomena ini, kalor yang disimpan mengandalkan massa material penyimpan ( $m$ ), kalor endotermik saat reaksi ( $\Delta h_r$ ) dan fraksi yang bereaksi ( $a_r$ ), energi kalor total yaitu:

$$Q = a_r m \Delta h_r \quad (2.4)$$

Dari ketiga jenis penyimpanan kalor seperti yang ditunjukkan di atas, jenis penyimpanan kalor laten (*latent heat thermal energy storage*, LHTES) merupakan yang paling menarik sebab mempunyai massa jenis penyimpanan energi yang tinggi dan sifat fisiknya sebagai penyimpan kalor pada temperatur tetap.

2.2.5. Pengujian proses *charging* dan *discharging*

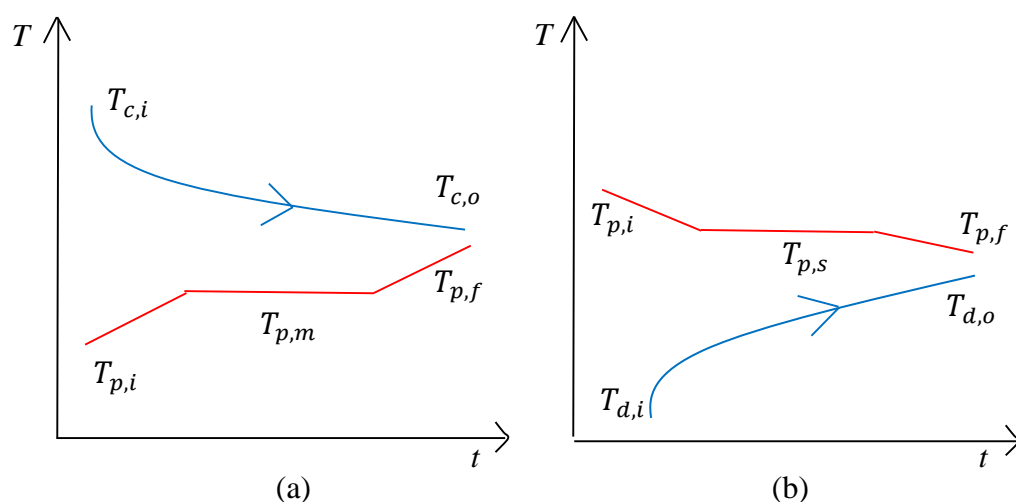
HTF pada temperatur awal konstan  $T_{c,i}$  (°C) disirkulasikan dengan PCM dengan laju aliran massa  $\dot{m}_{ch}$  (kg/detik). Pertama-tama temperatur awal PCM yaitu  $T_{p,i}$ . Selama proses *charging* pertama dipanaskan PCM dari  $T_{p,i}$  sampai dengan  $T_{p,m}$  (temperatur *melting point*) serta selanjutnya diikuti dengan proses pelelehan. Jika keseluruhan PCM sudah mengalami proses pelelehan dan pada temperatur

HTF ketika itu berada di atas  $T_{p,m}$  maka temperatur PCM mengalami kenaikan menjadi  $T_{p,f}$ . Pada temperatur HTF akhir selama proses *charging* yaitu  $T_{c,o}$ . Saat proses *discharging* diawali ketika HTF dengan temperatur  $T_{d,i}$  dan pada laju aliran massa  $\dot{m}_d$  (kg/detik) melalui PCM dengan temperatur awal  $T_{p,i}$ . Pada Energi kalor akan mengalami perpindahan dari mulai PCM menuju HTF. Apabila pelepasan kalor sampai mencapai temperatur yang dingin ( $T_{p,s}$ ) dengan demikian maka PCM akan mengalami proses pembekuan. Pelepasan kalor yang terjadi di dalam PCM akan berlanjut terus menerus jika pada temperatur HTF masih berada di bawah  $T_{p,s}$  sampai PCM tersebut mencapai temperatur  $T_{p,f}$ . Temperatur akhir selama proses *discharging* yaitu  $T_{d,o}$ . Dari uraian di atas dapat diilustrasikan pada Gambar 2.13.

Menurut Ramayya dan Ramesh (1998) bahwa jumlah kalor yang dikeluarkan oleh HTF selama proses *charging* ( $Q_c$ , kW) dan kalor yang diterima oleh HTF selama proses *discharging* ( $Q_d$ , kW) dapat diketahui menggunakan persamaan (2.5) dan persamaan (2.6).

$$Q_c = \dot{m}_{ch} c_{p,ch} (T_{c,i} - T_{c,o}) \quad (2.5)$$

$$Q_d = \dot{m}_d c_{p,d} (T_{d,o} - T_{d,i}) \quad (2.6)$$



Gambar 2.10. Skema variasi temperatur pada sistem *latent heat storage* (LHS)  
(a) pengujian *charging*, (b) pengujian *discharging*

$c_{p,ch}$  dan  $c_{p,d}$  yaitu kalor jenis rata-rata dari HTF (KJ/kg.°C) selama proses *charging* dan *discharging*. Ramayya dan Ramesh (1998) menyebutkan kalor yang diterima PCM pada saat proses *charging* sama dengan persamaan (2.5) dan kalor yang dilepaskan PCM saat proses *discharging* sama dengan persamaan (2.6).

#### 2.2.6. Mekanisme Perpindahan Kalor

Apabila kapsul pada PCM dengan temperatur yang rendah berada di sekitar air panas dalam sebuah tangki dengan temperatur dan laju aliran massa tertentu, dapat menyebabkan terjadinya proses pelepasan energi kalor antara air panas dan diterima oleh PCM. Cara kerja selama proses *charging* PCM yaitu pertama-tama pada proses perpindahan kalor yang terjadi dengan cara konveksi artinya antara air panas dan permukaan luar kapsul. Terjadinya fenomena proses perpindahan energi antara air panas menuju permukaan luar kapsul disebabkan karena adanya besaran koefisien perpindahan kalor konveksi dan pada luasan permukaan. Nilai koefisien perpindahan kalor konveksi dapat dipengaruhi oleh laju aliran massa air panas. Pada proses berikutnya, kalor bersirkulasi secara konduksi melewati dinding-dinding kapsul oleh karena itu pada temperatur kapsul mengalami kenaikan (Agyenim dkk, 2010). Tipe dari kalor tersebut disebut dengan kalor laten. Apabila kalor diberikan secara kontinyu, pada akhirnya akan terjadi pemanasan sensibel sebagai mana mestinya PCM cair akan mengalami pengingkatan temperatur. Cara kerja selama proses *discharging* secara konsep kebalikan dari proses *charging*, perbedaannya hanya perpindahan kalor yang terjadi sebagian besar yaitu konduksi (Sari dan kaygusuz, 2002).

Nallusamy dkk (2007) menyatakan bahwa kalor yang tersimpan sesaat (*instantaneous heat stored*) dari proses di atas, dapat dihitung berdasarkan perbedaan temperatur masuk sesaat ( $T_{w,in}(t)$ , °C) dan temperatur keluar sesaat ( $T_{w,out}(t)$ , °C) dari HTF pada tangki air panas adalah sebagai berikut,

$$Q_{st} = \dot{m}_c c_{p,w} (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (2.7)$$

dimana  $\dot{m}$  sebagai laju aliran massa air panas (kg/detik) dan  $c_{p,w}$  kalor jenis air panas (J/kg.°C). Himran dkk (1994) mendefinisikan bahwa energi termal kumulatif



