

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

2.1.1. Pemanas Air Tenaga Surya (PATS)

Sudrajat dan Santosa (2014) melakukan percobaan eksperimental pada sistem PATS dengan kolektor plat datar. Pengujian ini bertujuan agar sistem PATS dapat bekerja pada temperatur yang diinginkan (± 45 °C). Hasilnya temperatur rata-rata yang diperoleh dapat mencapai 52 °C meskipun pada kondisi cuaca mendung. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem PATS dapat memenuhi kebutuhan air panas untuk mandi.

Studi secara eksperimental dan perhitungan tentang aplikasi PCM pada sistem pemanas air domestik dilakukan oleh Sharif dkk (2015). Pada pengujian ini, peneliti menggunakan berbagai jenis PCM, bentuk dan bahan kapsul yang digunakan untuk membungkus PCM. Salah satu PCM yang digunakan adalah *paraffin wax* dengan kapsul *high density polyethylene* berbentuk bola. PCM ini nantinya akan dipasang pada *integrated collector storage* (ICS) dan PATS konvensional. Peneliti mendapatkan hasil bahwa efisiensi rata-rata dari *integrated collector storage* lebih rendah dari konvensional PATS. Selain itu, peneliti juga mengungkapkan bahwa pemilihan material PCM dengan *specific melting point* yang hampir sama dengan unjuk kerja alat akan sangat membantu dalam sistem PATS ini untuk mendapatkan hasil yang maksimal.

Pengkajian dan pengkategorian dalam aplikasi energi matahari pada sistem pemanas air dilakukan oleh Jamar dkk (2016). Salah satu sistem yang dibahas adalah sistem *thermosyphon*. Keunggulan dari sistem ini adalah tidak diperlukannya *mechanical devices* untuk mengalirkan air akibat adanya konveksi natural yang terjadi dan tidak memerlukan terlalu banyak *maintenance*. Di lain sisi, terdapat sistem yang hampir sama dengan sistem *thermosyphon* yaitu ICS. ICS memiliki konstruksi yang hampir sama dengan *thermosyphon*, hanya saja pada ICS, *collector* dan tangki menjadi satu bagian. Oleh karena itu, ICS memiliki

biaya konstruksi yang lebih murah jika dibandingkan dengan *thermosyphon*. Akan tetapi, *heat loss* yang terjadi pada sistem ICS lebih tinggi pada malam hari.

2.1.2. Penggunaan PCM sebagai *Thermal Energy Storage* (TES)

Canbazoglu dkk (2005) mengatakan dalam penelitiannya bahwa penggunaan PCM pada PATS sangat menguntungkan karena akan mengurangi fluktuasi temperatur, mengurangi volume dan menurunkan berat konstruksi dari PATS. Pada percobaannya, penggunaan PCM dapat mempertahankan temperatur di dalam tangki PATS selama 10 jam pada 45 °C ketika air panas tidak digunakan. Temperatur ini lebih tinggi 6 °C daripada sistem PATS tanpa PCM. Akan tetapi, penelitian ini dilakukan pada bulan november sehingga peneliti menambahkan bahwa penggunaan PCM dapat memberikan efek yang lebih besar apabila dilakukan pada musim panas.

Pengujian eksperimental dilakukan oleh Nadjib dkk (2015) untuk mengetahui kapasitas penyimpanan termal pada sistem PATS yang menggunakan PCM didalamnya. Pada pengujian ini, air digunakan sebagai HTF dan *paraffin wax* sebagai PCM. Tangki yang digunakan mempunyai volume 31,37 liter. Berdasarkan hasil pengujian *charging* yang dilakukan selama 340 menit, peneliti mengatakan bahwa kapasitas total penyimpanan energi termal pada sistem PATS ini sebesar 4,8 MJ. Penggunaan PCM dapat berkontribusi sebesar 44,28%. Akan tetapi, hanya 3,97 MJ energi yang dapat tersimpan dalam pengujian ini. Hal ini terjadi akibat adanya *heat loss* yang terjadi selama proses *charging*. Untuk itu, desain sistem yang dapat meminimalisir *heat loss* perlu diperhatikan, terutama pada bagian isolasi PATS.

Khan dkk (2016) mencoba membandingkan 2 tipe LHS sebagai PCM, yaitu *paraffin wax* dan *salt hydrates*. Setelah berulang kali melakukan *thermal cycles* atau *melting-cooling*, *paraffin wax* mempunyai *properties* yang tidak berubah. Di lain sisi, *salt hydrates* mengalami fase *segregation* dan *supercooling*. Berdasarkan hasil tersebut, peneliti menyimpulkan bahwa *paraffin wax* mempunyai *thermal* dan *chemical stability* yang lebih baik daripada *salt hydrates*.

2.1.3. Karakteristik PCM

Shuangmao dkk (2011) melakukan penelitian tentang karakteristik *solar heat storage* pada proses *discharging* menggunakan kapsul-kapsul berbentuk bola. Kapsul-kapsul tersebut ditempatkan pada sebuah *packed bed*. Pada penelitian ini *paraffin* digunakan sebagai PCM dan air digunakan sebagai HTF. Peneliti menyatakan bahwa (1) laju perpindahan kalor pada *solar heat storage* sangat cepat dan akan terus menurun ketika mendekati *liquid cooling stage*. Laju perpindahan kalor akan stabil pada *solidification cooling stage* sampai pada *solid cooling stage*. (2) Waktu yang diperlukan hingga mencapai *solid cooling stage* akan berkurang apabila laju aliran HTF ditingkatkan. Akan tetapi, hal ini tidak berlaku apabila laju aliran HTF melebihi 13 kg/menit. (3) Pengaruh dari rembesan pada *packed bed* tidak terlalu berpengaruh jika dibandingkan dengan temperatur inlet HTF dan laju aliran.

Penelitian tentang LHS dilakukan oleh Murray dan Groulx (2014). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik dari LHS, terutama pada tahap perubahan fase dari padat menjadi cair dan sebaliknya. Tangki vertikal dan *dodecanoid acid* sebagai LHS digunakan dalam penelitian ini. Hasilnya, peneliti menemukan adanya konveksi natural yang signifikan pada saat fase *melting* dan *meltd* dalam proses *charging*. Akan tetapi pada saat *solidification*, konveksi natural yang terjadi kecil sehingga dapat diabaikan. Kemudian, kecepatan laju aliran dalam proses *charging* dapat mempengaruhi proses *melting*. Semakin cepat laju aliran, maka proses *melting* akan lebih cepat. Hal ini juga berlaku pada proses *discharging*. Kelemahan dari sistem ini adalah proses *charging* dan *discharging* yang memerlukan waktu yang lama. Peneliti menyarankan untuk memperbesar luar permukaan yang akan digunakan sebagai perpindahan panas dari HTF ke PCM dan sebaliknya. Penggunaan pipa untuk membungkus HTF atau penggunaan banyak pipa dapat dilakukan.

Pengkajian eksperimental tentang penyimpanan energi termal dengan menggunakan kapsul PCM berbentuk bola dilakukan oleh Bellan dkk (2014). Pada uji eksperimental ini, peneliti menggunakan sodium nitrat sebagai PCM dan minyak sintetik temperatur tinggi (*Therminol 66*) sebagai HTF. Aliran dari HTF

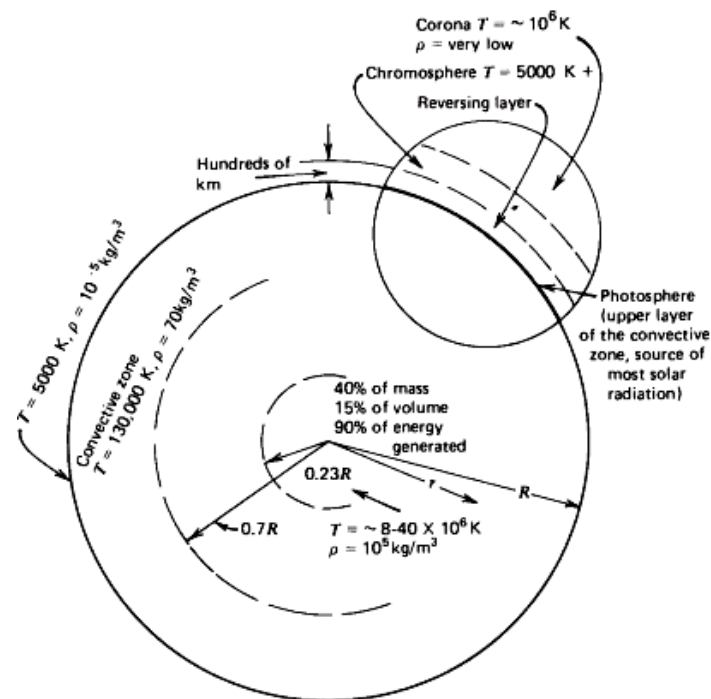
dianggap simetris dengan sumbu axis sehingga aliran di dalam tangki dianggap hanya 2 dimensi. Peneliti menyimpulkan bahwa (1) waktu yang diperlukan PCM dalam proses *charging* lebih cepat daripada *discharging*, (2) kecepatan *charging* dan *discharging* akan lebih cepat jika menggunakan kapsul yang lebih kecil, (3) apabila *stefan number* (St) meningkat maka *Constant Melt Temperature Zone* (CMTZ) dan *Heat Exchange Zone* (HEZ) akan menurun. Hal ini dapat meningkatkan waktu yang diperlukan dalam *discharging* dan penggunaan total.

2.2. Landasan Teori

2.2.1. Energi matahari

Matahari merupakan kumpulan senyawa gas panas berbentuk bola raksasa dengan diameter $1,39 \times 10^9$ m. Matahari terbentuk karena adanya reaksi fusi yang terjadi terus-menerus dari bermacam-macam gas dan tertahan oleh gaya gravitasi sehingga terlihat seperti bola api. Salah satu reaksi yang terjadi dan merupakan reaksi yang penting dalam pembentukan matahari adalah reaksi hidrogen untuk membentuk helium. Dalam reaksi ini, massa dari *helium nucleus* kurang dari 4 proton yang dimiliki oleh hidrogen sehingga mengakibatkan sisa dari reaksi tersebut terkonversi menjadi energi (Duffie dan Beckman, 2013). Skema struktur dari matahari digambarkan pada Gambar 2.1.

Radiasi matahari memiliki panjang gelombang yang bervariasi sehingga ilmuwan mengelompokkannya menjadi 3 pita gelombang, yaitu gelombang ultraviolet, infra merah, dan cahaya tampak. Selain dikelompokkan berdasarkan gelombangnya, cahaya matahari juga dikelompokkan menjadi *direct radiation* dan *diffuse radiation*. *Direct radiation* merupakan radiasi yang langsung ke permukaan bumi, sedangkan *diffuse radiation* adalah radiasi yang berasal dari hamburan atmosfer. Radiasi yang tiba di permukaan bumi berbeda-beda di setiap tempat. Insolasi merupakan radiasi matahari yang tiba di permukaan bumi per satuan luas dan waktu (Hamdi, 2014).



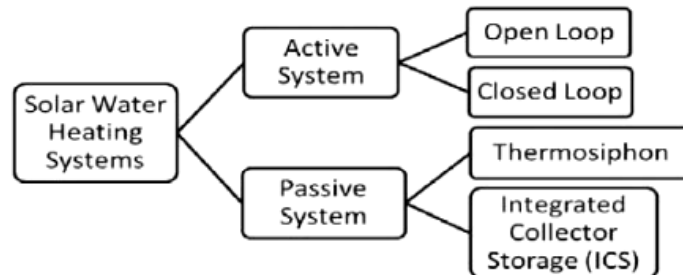
Gambar 2.1. Skema struktur matahari (Duffie dan Beckman, 2013)

2.2.2. Sistem 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 dibangun atas 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 (*down pipe* dan *raiser pipe*) serta penyambung pipa agar pipa-pipa penghubung dapat tersambung ke kolektor surya ataupun tangki. Selain itu, adapun beberapa komponen lain yang digunakan antara lain adalah sebagai berikut.

- 1) Elemen pengikat berfungsi agar tangki dan kolektor tetap padaudukannya.
- 2) Katup pengaman tekanan berfungsi untuk melindungi sistem agar tetap bekerja pada tekanan yang diijinkan.

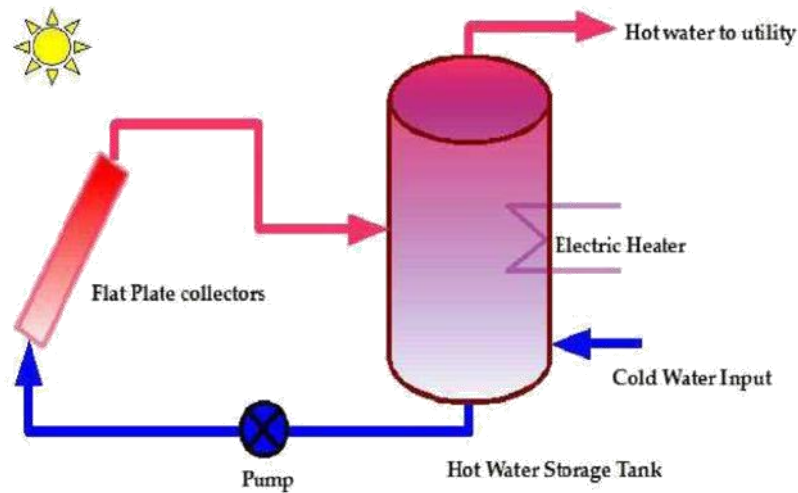
- 3) Pemanas tambahan digunakan karena energi matahari yang diserap kolektor tidak dapat memanaskan air sesuai kebutuhan(SNI 3021, 1992).



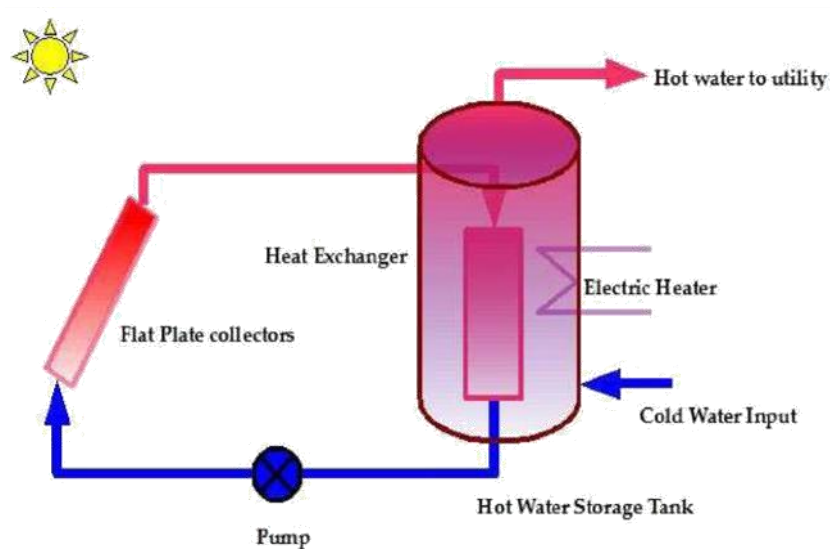
Gambar 2.2. Sistem PATS (Jamar, 2016)

2.2.2.1. Sistem Aktif

Menurut Jamar dkk (2016), ciri khusus dari sistem aktif adalah penggunaan pompa dan perangkat pengontrol otomatis untuk mengontrol pendistribusian energi termal pada HTF. Oleh karena itu, pada dasarnya penggunaan sistem aktif pada PATS masih memerlukan energi listrik. Sistem aktif masih dapat dibagi lagi menjadi 2, yaitu sistem terbuka dan sistem tertutup yang dapat dilihat pada Gambar 2.2. Perbedaan dari keduanya hanya pada saat pendistribusiannya. Terlihat pada Gambar 2.3, sistem terbuka tidak memerlukan alat penukar kalor saat pendistribusiannya, sedangkan sistem tertutup masih memerlukan alat penukar kalor.



(a)



(b)

Gambar 2.3. PATS sistem aktif (a) Sistem terbuka, (b) Sistem tertutup (Dwivedi, 2009)

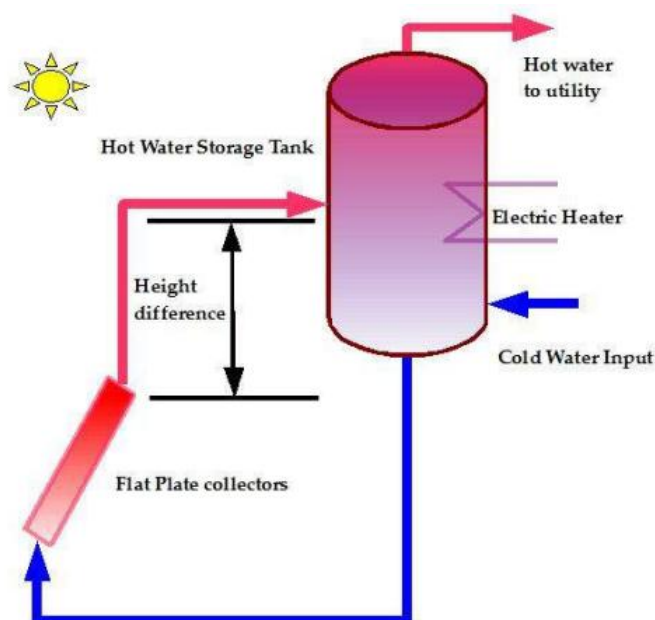
2.2.2.2. Sistem Pasif

Sistem pasif adalah sistem PATS yang menggunakan konveksi natural sebagai penggerak HTF. Hal ini dapat terjadi karena pengurangan *fluid density* yang dipanaskan sehingga HTF di kolektor dapat naik ke dalam tangki dan HTF di tangki dapat turun ke kolektor. Sirkulasi ini akan terus berulang hingga tidak

ada pemanasan yang terjadi di dalam kolektor. Keunggulan dari sistem pasif adalah tidak adanya instrumen pengontrol sirkulasi HTF sehingga tidak memerlukan perawatan yang rumit.

a. *Thermoshypon*

Sistem *thermoshypon* merupakan teknologi PATS sistem pasif yang banyak digunakan masyarakat. *Thermosyphoning* akan terjadi ketika HTF di dalam tangki mengembang dikarenakan *density* yang mengecil akibat pemanasan sehingga mendorong HTF untuk naik ke dalam tangki. Kemudian, dikarenakan HTF di dalam kolektor masuk ke dalam tangki sehingga mendorong HTF di dalam tangki untuk turun ke kolektor. *Thermosyphoning* akan terus berlanjut hingga temperatur hingga temperatur HTF di dalam sistem sama. Meskipun begitu, untuk menghindari aliran terbalik yang kemungkinan terjadi pada malam hari, sebaiknya pemasangan tangki TES diletakkan cukup tinggi di atas kolektor surya. (Dwivedi, 2009)



Gambar 2.4. Sistem *thermosyphon* dengan pemanas tambahan (Dwivedi, 2009)

b. *Integrated Collector Storage*

Integrated Collector Storage (ICS) merupakan contoh lain dari sistem pasif. Kolektor dan TES yang menjadi satu bagian merupakan ciri khusus dan keunggulan dari sistem ICS. Seddegh dkk (2015) mengatakan penggunaan teknologi ICS sangat menjanjikan pada kebutuhan domestik, pertanian, dan industrial karena harganya yang lebih ekonomis dibandingkan sistem PATS yang lain. Akan tetapi, insulasi yang tidak dapat dipasang pada seluruh bagian ICS mengakibatkan *heat loss* terjadi lebih cepat.

2.2.3. *Thermal Energy Storage*

Thermal Energy Storage (TES) merupakan penyimpanan energi yang mampu menyimpan energi termal. Penggunaan *storage* berfungsi agar energi yang tersimpan dapat digunakan pada saat yang diinginkan. Lefebvre dan Tezel (2017) membahas bahwa energi termal dapat tersimpan atau terlepas dalam TES karena adanya proses *cooling, heating, melting, solidifying, vaporizing* atau proses *thermo-chemical* yang lain di dalam sistem. Energi matahari merupakan salah satu bentuk energi termal. Energi matahari yang hanya memancarkan energinya pada siang hari sehingga membuat sistem TES menjadi sangat penting. Ada beberapa faktor penting yang diperhitungkan dalam penggunaan TES, antara lain :

- Durasi penyimpanan
- Temperatur kerja sistem
- Kapasitas penyimpanan
- *Heat loss*
- Ketersediaan tempat
- Ekonomis

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 penyimpanan energi jangka panjang.

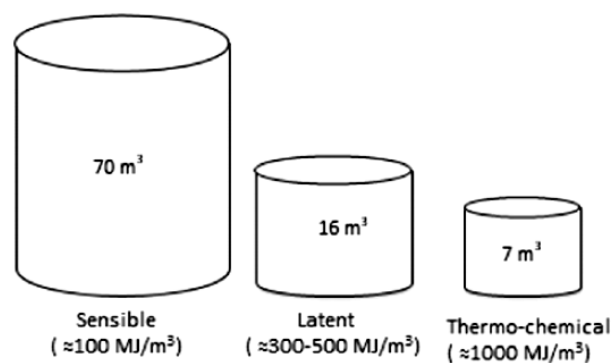
2.2.3.1. *Sensible Heat Storage*

Pada *sensible heat storage* (SHS), energi tersimpan di dalam sistem ditandai dengan perubahan temperatur pada material penyimpanan 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* seperti terlihat pada Gambar 2.5. Akibatnya SHS memerlukan *volume storage* yang besar. Selain itu, pada SHS terjadi *heat loss* yang sangat merugikan sebagai material penyimpan energi. Besarnya energi yang tersimpan (dalam *Joule*) dapat dihitung dengan persamaan 2.1 berikut (Sharma, 2009).

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mc_p dT = mc_{ap}(T_f - T_i) = \rho Vc_{ap}(T_f - T_i) \quad (2.1)$$

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.



Gambar 2.5. Volume dari *storage* yang dibutuhkan untuk menyimpan energi (1800 kWh) (Lefebvre dan Tezel, 2017)

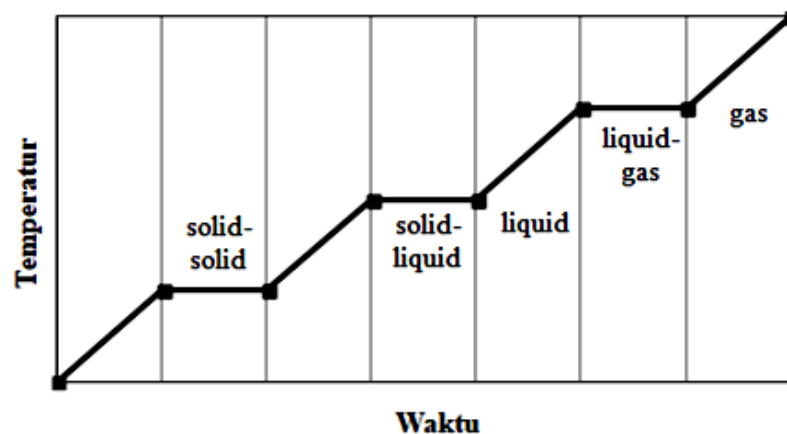
2.2.3.2. Latent Heat Storage

Pada *latent heat storage* (LHS), perubahan fase dari material penyimpan energi merupakan tanda penyerapan atau pelepasan energi terjadi pada sistem ini.

Pada umumnya, perubahan fase *liquid-solid* lebih banyak digunakan sebagai *energy storage* dibandingkan dengan fase *liquid-vapor* karena volume yang dibutuhkan dalam perubahan fase *liquid-solid* lebih sedikit. Tahapan perubahan fase pada suatu zat digambarkan pada Gambar 2.6 dan jumlah kalornya (dalam *Joule*) memenuhi persamaan 2.2 (Regin dkk, 2008).

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

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



Gambar 2.6. Diagram temperatur-waktu pada pemanasan suatu zat (Regin dkk, 2008).

2.2.3.3. Thermo-Chemical Storage

Thermo-chemical storage merupakan teknologi terbaru dalam bidang penyimpanan energi termal. Pada prosesnya, *Thermo-chemical storage* menggunakan reaksi termokimia untuk menyerap energi termal. Energi tersimpan melalui *reversible reaction* dan melepas ketika reaksi tersebut dibalik. Meskipun *thermo-chemical storage* memiliki *energy density* yang tinggi, tetapi sistem ini

memerlukan *catalyst* untuk melepas energi dan mengontrol reaksi termokimia dan hal itu tidak diinginkan.

2.2.4. Phase Change Material

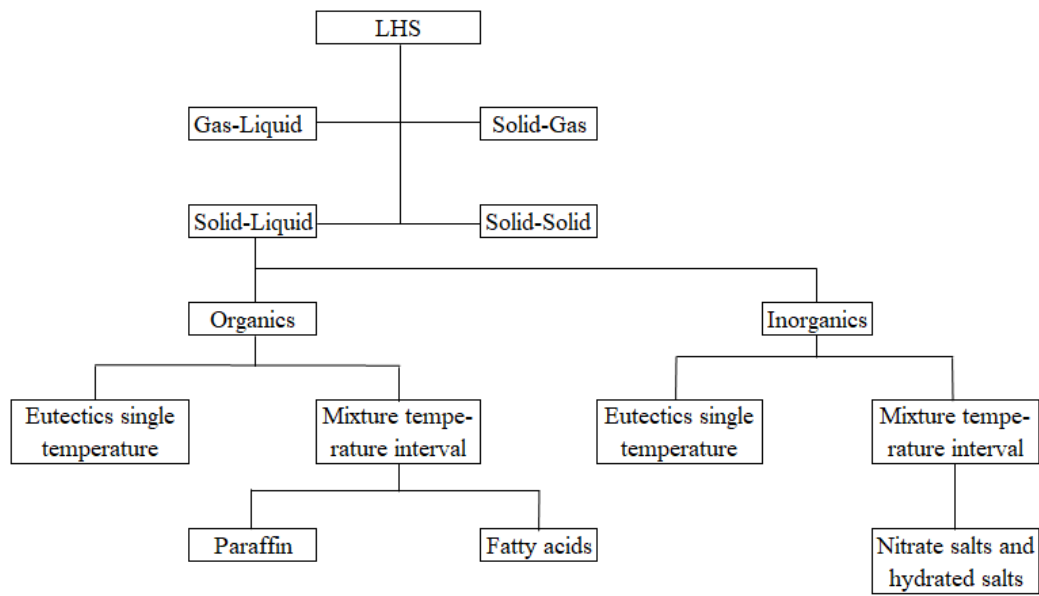
Menurut Regin dkk (2008) dan Khan dkk (2016), *phase change material* (PCM) adalah material penyimpan energi yang memiliki penyimpanan energi termal lebih tinggi daripada *sensible heat storage* (SHS) dan mampu menyerap ataupun melepas energi secara konstan pada saat *melting* (*solid-liquid*) atau *sodification* (*liquid-solid*). Penggunaan PCM dapat menyimpan energi termal 5-14 kali lebih banyak daripada SHS. Pemilihan material PCM sebagai penyimpanan termal harus memiliki karakteristik seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Karakteristik PCM yang diinginkan pada sistem PATS (Regin dkk, 2008)

Sifat termal	Sifat fisis	Sifat kimia	Faktor ekonomi
Temperatur perubahan fase dari material sesuai dengan temperatur kerja. Memiliki nilai <i>latent heat</i> dan <i>specific heat</i> yang tinggi.	Kerapatan material tinggi.	Memiliki sifat kimia yang stabil.	Tersedia banyak.
Konduktivitas termal yang tinggi (solid maupun liquid).	Perubahan kerapatan yang rendah ketika merubah fase. Tidak terjadi <i>supercooling</i> ketika pendinginan.	Tidak terjadi dekomposisi.	Tidak mahal.
		Tidak beracun, tidak mudah terbakar dan tidak meledak. Cocok dengan material pembungkus.	

Kapasitas penyimpanan dari PCM bergantung pada *specific heat* dan *latent heat values*. Semakin tinggi harga dari *specific heat* dan *latent heat values* dari PCM akan semakin baik karena kapasitas penyimpanannya akan semakin besar. Meskipun begitu, material PCM dengan perubahan fase *solid-gas* atau *liquid-gas* umumnya tidak digunakan sebagai penyimpanan energi. Alasannya

karena saat PCM berubah fase menjadi gas, volume material akan menjadi sangat besar sehingga memerlukan sistem yang besar dan kompleks (Agyenim dkk, 2010).



Gambar 2.7. Klasifikasi PCM (Gil dkk, 2010)

2.2.5. *Charging* dan *Discharging*

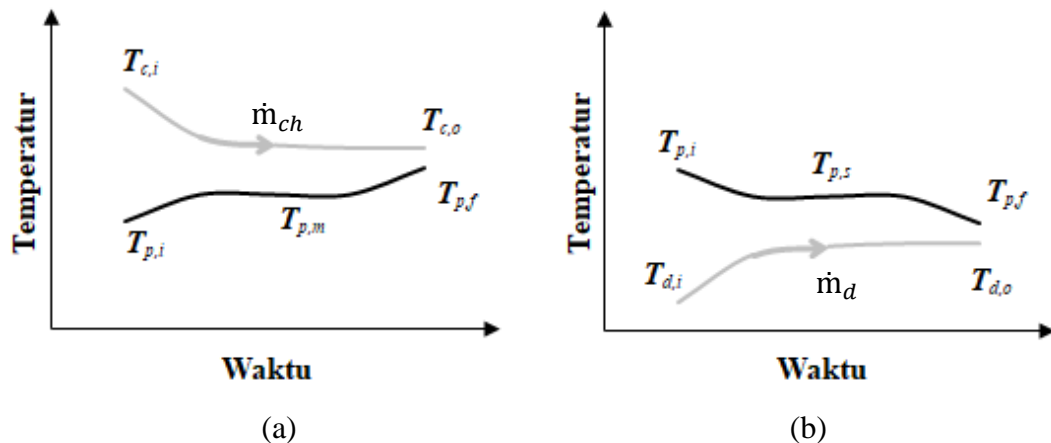
Proses *charging* diawali dengan penyerapan energi termal yang terjadi di dalam kolektor untuk menaikkan temperatur HTF. Kemudian, HTF di dalam kolektor pada temperatur $T_{c,i}$ bersirkulasi ke dalam tangki TES karena terjadi perbedaan temperatur HTF pada kolektor dan tangki. Di dalam tangki TES, energi termal pada HTF diserap oleh PCM yang memiliki temperatur $T_{p,i}$. PCM yang terus menyerap energi termal mulai mengalami pelelehan yang menandakan PCM telah memasuki temperatur leleh ($T_{p,m}$). Apabila energi termal pada HTF terus diserap setelah PCM meleleh sempurna, maka temperaur PCM menjadi $T_{p,f}$. Proses *charging* selesai saat HTF bertemperatur $T_{c,o}$. Kalor yang dilepas HTF selama proses *charging* dapat diketahui dengan persamaan 2.3.

Temperatur HTF dan PCM saat awal mula proses *discharging* masing-masing adalah $T_{d,i}$ dan $T_{p,i}$. Kebalikan dari proses *charging*, *transfer* kalor terjadi

dari PCM ke HTF. PCM mulai mengalami pembekuan saat temperatur PCM mencapai $T_{p,s}$. Apabila temperatur HTF di bawah temperatur $T_{p,s}$, maka *transfer* kalor dari PCM akan terus berlangsung hingga temperatur PCM mencapai $T_{p,f}$. Temperatur akhir HTF saat proses *discharging* selesai adalah $T_{d,o}$. Kalor yang diterima HTF dari PCM selama proses *discharging* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.4. Proses di atas diilustrasikan pada Gambar 2.8 (Ramayya dan Ramesh, 1998).

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

$$Q_d = \dot{m}_d c_{p,d} (T_{d,i} - T_{d,o}) \quad (2.4)$$



Gambar 2.8. Skema variasi temperatur pada sistem LHS
(a) proses *charging* (b) proses *discharging*

2.2.6. Kalor Tersimpan Sesaat

Menurut Nallusamy dkk (2007), kalor tersimpan sesaat dapat dihitung berdasarkan temperatur masuk sesaat ($T_{w,in}(t)$, °C) dan temperatur keluar sesaat ($T_{w,out}(t)$, °C) dari HTF pada tangki TES seperti pada persamaan 2.5 berikut.

$$Q(t) = \dot{m} c_{p,w} (T_{w,in}(t) - T_{w,out}(t)) \quad (2.5)$$

Laju aliran massa air panas (\dot{m}) dalam kg/dt dan kalor jenis air panas ($c_{p,w}$) dalam (J/kg.°C).

2.2.7. Kapasitas Energi Tersimpan

Kapasitas energi tersimpan adalah besarnya energi yang dapat disimpan di dalam tangki TES. Jumlahnya dapat dihitung dengan mengetahui penyimpanan termal pada tangki TES, yaitu HTF, PCM, dan kapsul. Kapasitas energi yang tersimpan berupa kalor sensibel HTF, kalor laten PCM, kalor sensibel PCM, dan kalor sensibel kapsul. Oleh karena itu, kapasitas energi tersimpan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut. (Nallusamy dkk, 2007)

$$E(t) = m_w c_{p,w} (T_w(t) - T_{w,i}) + m_p \{ c_{p,ps} (T_m(t) - T_{p,i}) + L + c_{p,pl} (T_{p,am}(t) - T_m(t)) \} + m_c c_{p,c} \{ T_c(t) - T_{c,i} \} \quad (2.6)$$

m_w , m_p , dan m_c masing-masing adalah massa air, massa PCM, dan massa kapsul (kg). $c_{p,w}$, $c_{p,ps}$, $c_{p,pl}$, dan $c_{p,c}$ berturut-turut adalah kalor jenis air, kalor jenis PCM padat, kalor jenis PCM cair, dan kalor jenis dinding kapsul (kJ/kg.°C). T_w , $T_{w,i}$, T_m , $T_{p,am}$, $T_{p,l}$, T_c dan $T_{c,i}$ adalah temperatur air panas, temperatur awal air, temperatur leleh PCM, temperatur PCM di atas titik leleh, temperatur awal PCM, temperatur kapsul dan temperatur awal kapsul (°C). L adalah kalor laten pelelehan (J/kg).

2.2.8. Efisiensi Pengumpulan Kolektif

Efisiensi pengumpulan kumulatif adalah perbandingan antara jumlah kalor yang tersimpan di tangki dengan jumlah energi radiasi yang sampai ke permukaan kolektor selama periode waktu yang sama. Besarnya efisiensi kumulatif dapat dihitung dengan persamaan 2.7 sebagai berikut. (Esen dkk, 2005).

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

$T_{w,1}$ dan $T_{w,2}$ masing-masing adalah temperatur air awal dan akhir. $Q_{incident}$ merupakan energi matahari yang menimpa kolektor matahari. t adalah lama waktu proses pemanasan.

2.2.9. Efisiensi tangki TES

Efisiensi merupakan faktor penting dalam suatu alat. Semakin tinggi efisiensi, maka semakin baik PATS karena energi yang dapat digunakan lebih banyak. Efisiensi yang dapat dihitung pada PATS ada 3, yaitu efisiensi *charging*, efisiensi *discharging*, dan efisiensi penyimpanan. Efisiensi *charging* (η_c) dapat dihitung dengan membandingkan antara energi tersimpan kumulatif dan kapasitas penyimpanan energi, sedangkan efisiensi *discharging* (η_d) merupakan perbandingan antara energi ekstraksi terhadap energi tersimpan kumulatif. Efisiensi penyimpanan (η_p) didapatkan dari perbandingan antara energi ekstraksi dan kapasitas. Oleh karena itu, efisiensi *charging*, *discharging* dan penyimpanan berturut-turut memenuhi persamaan 2.8, persamaan 2.9 dan persamaan 2.10 sebagai berikut.

$$\eta_c = \frac{\text{energi tersimpan kumulatif}}{\text{kapasitas penyimpanan}} \quad (2.8)$$

$$\eta_d = \frac{\text{energi ekstraksi kumulatif}}{\text{energi tersimpan kumulatif}} \quad (2.9)$$

$$\eta_p = \frac{\text{energi ekstraksi kumulatif}}{\text{kapasitas penyimpanan}} \quad (2.10)$$

2.2.10. Kebutuhan Air Panas

Air panas sudah menjadi kebutuhan yang sangat penting pada skala rumah tangga maupun perhotelan (Sudrajat dan Santosa, 2014). Penggunaannya dapat bermacam-macam, antara lain mandi, bercukur, keperluan dapur, mencuci pakaian, mencuci muka, mencuci tangan, dan lain-lain. Menurut Kalogirou

(2009), dibutuhkan 10-20 liter air untuk mandi dengan *shower*, sedangkan temperaturnya berkisar antara 42-45 °C untuk orang dewasa sesuai standar yang berlaku. Standar temperatur air panas pada tiap-tiap pemakaian dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Standar temperatur air panas sesuai jenis pemakaiannya (SNI 03 7065, 2005)

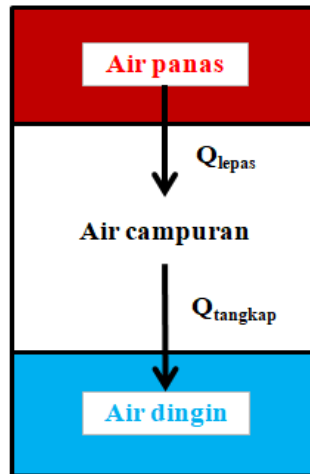
No	Jenis Pemakaian	Temperatur (°C)
1	Minum Bak	50 – 55
2	Mandi : Dewasa	42 – 45
	Anak	40 – 42
3	Cuci Muka dan cuci tangan	40 – 42
4	Pancuran mandi	40 – 43
5	Cuci tangan untuk keperluan pengobatan	43
6	Bercukur	46 -52
7	Dapur : macam-macam keperluan	45
	proses pencucian	45 – 60
	proses pembilasan	70 – 80
8	Cuci pakaian : macam-macam keperluan	60
	bahan sutera dan wol	33 – 49
	bahan linen dan katun	49 – 60
9	Kolam renang	21 – 27
10	Cuci mobil (di bengkel)	24 – 30

2.2.11. Pencampuran air panas dan air dingin

Pencampuran air panas dan air dingin akan menghasilkan suatu air campuran. Dengan asumsi tidak adanya rugi-rugi, kalor yang dilepas air panas dan kalor yang ditangkap air dingin mencapai kesetimbangan energi seperti digambarkan pada Gambar 2.9 dan memenuhi persamaan 2.11. Kemudian, jika harga Q_{lepas} dan $Q_{tangkap}$ pada persamaan 2.11 dijabarkan, maka akan menjadi persamaan 2.12.

$$Q_{lepas} = Q_{tangkap} \quad (2.11)$$

$$m_d \bar{c}_{p,ad} (T_c - T_d) = m_p \bar{c}_{p,ap} (T_p - T_c) \quad (2.12)$$



Gambar 2.9. Skema kesetimbangan energi pada campuran air panas dan air dingin.

m_d dan m_p adalah massa air dingin dan massa air panas. $\bar{c}_{p,ad}$ dan $\bar{c}_{p,ap}$ adalah kalor jenis rata-rata air dingin dan kalor jenis rata-rata air panas. T_c , T_d , dan T_p masing-masing adalah temperatur air campuran, temperatur air dingin dan temperatur air panas. Jika persamaan 2.12, dijabarkan sedemikian rupa, maka akan dihasilkan persamaan untuk mencari volume air panas (V_p) sebagai berikut.

$$V_p = \frac{V_c \rho_d c_{p,ad} (T_c - T_d)}{\rho_p c_{p,ap} (T_p - T_c) + \rho_d c_{p,ad} (T_c - T_d)} \quad (2.13)$$

ρ_d dan ρ_p adalah densitas air dingin dan densitas air panas. Berdasarkan persamaan 2.13, untuk mencari mencari volume dari air panas diperlukan harga kalor jenis air dan densitas air, panas maupun dingin. Harga tersebut dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut (Popiel dan Wojtkowiak, 1998).

$$\begin{aligned} \rho(T) = & 999,79684 + 0,068317355T - 0,010740248T^2 \\ & + 0,00082140905T^{2,5} - 0,000023030988T^3 \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} C_p(T) = & 4,2174356 - 0,0056181625T + 0,0012992528T^{1,5} \\ & - 0,00011535353T^2 + 0,00000414964T^{2,5} \end{aligned} \quad (2.13)$$