

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

2.1.1 Penggunaan PCM pada PATS

Penggunaan PCM pada PATS Cabeza dkk (2003) menyatakan penggunaan PCM pada tangki akan meningkatkan penyimpanan termal secara signifikan dan menurunkan proses pendinginan dari 40% menjadi 20% secara signifikan. Menggunakan modul PCM silinder yang berbeda dengan metode simulasi dan eksperimen numerik perbedaan eksplisit. Taherian dkk (2011) meneliti tentang investigasi eksperimental PATS sistem termosyphon adalah sistem pasif open - loop yang digunakan untuk keperluan rumah tangga. Sistem ini menggunakan termokopel untuk mengukur temperature dalam tangki melalui data logger. Hasil penelitian ini adalah temperature kolektor mencapai 90C dan suhu maksimum terjadi sekitar 1 jam setelah titik fluks radiasi matahari. Stratifikasi pada tangki penyimpan air mencapai 72C pada hari yang cerah. Energi termal yang diukur dengan membandingkan data dan peneliti lain adalah relatif sama.

Lin dkk (2012) meneliti tentang investigasi ekperimental peningkatan kerja PCM pada PATS sistem *termosyphon*. Modifikasi dilakukan pada pelat absorber dengan memasang PCM pada permukaan untuk meningkatkan area perpindahan panas. *Paraffin wax* digunakan sebagai penyimpan panas siang hari sedangkan air digunakan sebagai media pemindah panas pada tangki 120 liter. Pengujian dilakukan menggunakan PCM dan tanpa PCM. Temperatur PCM 38C dan temperatur air panas pada siang hari $52 \pm 2,2\%$. Hasil penelitian ini adalah PCM memberikan kinerja tertinggi dibanding tanpa menggunakan PCM.

Gultom (2013) meneliti PATS berisi PCM sebagai penyimpan panas pada kolektor. Data akuisisi yang dipakai terdiri dua bagian utama, yaitu *hobo microstation* untuk mengukur radiasi kecepatan angin, temperatur udara (lingkungan) dan agilent terdiri 20 buah termokopel untuk mengukur temperatur 5 pemanasair yang

dihubungkan ke komputer atau PC. Hasil penelitian ini adalah temperatur permukaan kolektor 107C, jumlah energi panas di dalam PCM 12,6 MJ dan efisiensi pemanas air 37,87 %. Sistem ini memiliki kehilangan panas yang signifikan yaitu sebesar 8,36 MJ.

Nadjib dan Suhanan (2014) meneliti PATS menggunakan kapsul pipa banyak (multitubes) yang berisi PCM berupa air dan *paraffin wax* dalam tangki air panas. PCM sebagai heat transfer fluid (HTF). Air dan *paraffin wax* digunakan sebagai material *thermal energy storage* (TES). Hasil penelitian ini proses perpindahan kalor dari kolektor ke HTF dan dari HTF ke PCM berlangsung efektif. Sedangkan penyimpanan kalor pada kapsul yang terpasang di bagian bawah tangki PATS kurang optimal.

Peneliti	Bentuk Penelitian	Tangki	PCM	Hasil
Cabeza dkk (2003)	Simulasi dan eksperimental	Vertikal	<i>Paraffin wax</i>	PCM meningkatkan penyimpanan termal dan menurunkan proses pendinginan
Taherian (2011)	Eksperimental	Horizontal	<i>Galvani zed iron</i>	Temperatur maksimum terjadi sekitar 1 jam titik <i>fluks</i> radiasi matahari

Peneliti	Bentuk Penelitian	Tangki	PCM	Hasil
Lin dkk (2012)	Eksperimental	Vertikal	<i>Paraffin wax</i>	PCM memberikan kinerja tertinggi dibanding tanpa menggunakan PCM
Gultom (2013)	Eksperimental	Horizontal	<i>Asam stearet (stearic acid)</i>	Panas yang tinggi pada plat kolektor mampu melelehkan PCM (53°C)
Najib dan Suhanan (2014)	Eksperimental	Horizontal	<i>Paraffin wax</i>	Perpindahan kalor dan kolektor ke HTF ke PCM berlangsung efektif

2.1.2 Paraffin sebagai PCM

Paraffin sebagai PCM Velraj dkk (2007) meneliti sistem TES sebagai penyimpan energi termal dimana *Paraffin wax* dan air sebagai PCM. Air digunakan sebagai fuida pemindah panas (HTF) untuk mentransfer panas ke kolektor dan bertindak juga sebagai

penyimpan panas (SHS). Hasil penelitian ini adalah tangki TES cocok pada aplikasi PATS.

Syuhada dkk (2012) meneliti paraffin - Al₂O₃ sebagai penyimpan panas dengan melakukan pengujian sifat termal *paraffin wax* menggunakan *differential Scanning Colorimetry* (DSC) dan pengujian karakteristik dengan menaburi alumina (Al₂O₃) pada fraksi massa 2%, 4%, 6%, 8% dan 10%. Hasil penelitian ini adalah paraffin Al₂O₃ memiliki kapasitas penyimpan yang kecil dibandingkan *paraffin wax*. Ambarita dkk (2012) meneliti tentang rancang bangun inkubator bayi menggunakan PCM sebagai pemanas. PCM yang digunakan adalah *paraffin wax* sebagai penyimpan panas karena titik lelehnya 53C. Pada proses charging suhu mencapai 57C digunakan untuk memanaskan ruang inkubator dengan suhu 35C – 37C. Panas ini dapat bertahan selama 3 jam 20 menit. Efisiensi solar box 49,97% dan efisiensi inkubator 63,04%.

Nadjib dan Suhanan (2013) meneliti tentang penyimpanan energi termal proses *charging* pada PATS sistem *thermosyphon* menggunakan air dan *paraffin wax* sebagai PCM dengan kapasitas tangki 31,27 liter. *Paraffin wax* diisikan pada 16 kapsul yang berbentuk silinder sebanyak 8,95 kg. panjang kapsul 1,63 m dengan diameter luar 2,54 cm. Hasil penelitian ini adalah integrasi HTF dan PCM pada PATS tipe *thermosyphon* mampu menyimpan energi kumulatif 3,95 MJ selama waktu charging 340 menit.

Peneliti	Bentuk penelitian	Tangki	PCM	Hasil
Velraj dkk (2007)	Eksperimental	Vertikal	<i>Paraffin Wax</i>	Tangki TES cocok pada aplikasi PATS
Syuhada (2012)	Eksperimental	Vertikal	<i>Paraffin-Al₂O₃</i>	<i>Paraffin - Al₂O₃</i>
Ambarita (2012)	Eksperimental	Horizontal	<i>Paraffin wax (C₂₅H₅₂)</i>	Efisiensi solar box 49,97 % dan efisiensi incubator 63,04 % menggunakan paraffin wax sebagai PCM

Peneliti	Bentuk penelitian	Tangki	PCM	Hasil
Nadjib dan Suhanan (2013)	Eksperimental	Horizontal	<i>Paraffin Wax</i>	Integrasi HTF dan PCM pada PATS tipe <i>thermosyphon</i> mampu menyimpan energi kumulatif 3,95 MJ selama waktu charging 340 menit

2.1.3 Macroencapsulation PCM

Paraffin sebagai PCM Velraj dkk (2007) meneliti sistem TES sebagai penyimpan energi termal dimana *Paraffin wax* dan air sebagai PCM. Air digunakan sebagai fluida pemindah panas (HTF) untuk mentransfer panas ke kolektor dan bertindak juga sebagai penyimpan panas (SHS). Hasil penelitian ini adalah tangki TES cocok pada aplikasi PATS.

Syuhada dkk (2012) meneliti paraffin - Al₂O₃ sebagai penyimpan panas dengan melakukan pengujian sifat termal *paraffin wax* menggunakan *differential Scanning Colorimetry* (DSC) dan pengujian karakteristik dengan menaburi alumina (Al₂O₃) pada fraksi massa 2%, 4%, 6%, 8% dan 10%. Hasil penelitian ini adalah paraffin Al₂O₃ memiliki kapasitas penyimpanan yang kecil dibandingkan *paraffin wax*. Ambarita dkk (2012) meneliti tentang rancang bangun inkubator bayi menggunakan PCM sebagai pemanas. PCM yang digunakan adalah *paraffin wax* sebagai penyimpan panas karena titik lelehnya 53C. Pada proses charging suhu mencapai 57C digunakan untuk memanaskan ruang inkubator dengan suhu 35C – 37C. Panas ini dapat bertahan selama 3 jam 20 menit. Efisiensi solar box 49,97% dan efisiensi inkubator 63,04%.

Nadjib dan Suhanan (2013) meneliti tentang penyimpanan energi termal proses charging pada PATS sistem *thermosyphon* menggunakan air dan *paraffin wax* sebagai PCM dengan kapasitas tangki 31,27 liter. *Paraffin wax* diisikan pada 16 kapsul yang

berbentuk silinder sebanyak 8,95 kg. panjang kapsul 1,63 m dengan diameter luar 2,54 cm. Hasil penelitian ini adalah integrasi HTF dan PCM pada PATS tipe *thermosyphon* mampu menyimpan energi kumulatif 3,95 MJ selama waktu charging 340 menit.

Peneliti	Bentuk penelitian	Tangki	PCM	Hasil
Velraj dkk (2007)	Eksperimental	Vertikal	<i>Paraffin Wax</i>	Tangki TES cocok pada aplikasi PATS
Syuhada (2012)	Eksperimental	Vertikal	<i>Paraffin-Al₂O₃</i>	<i>Paraffin-Al₂O₃</i>
Ambarita (2012)	Eksperimental	Horizontal	<i>Paraffin wax (C25 H52)</i>	Efisiensi solar box 49,97 % dan efisiensi incubator 63,04 % menggunakan paraffin wax sebagai PCM
Nadjib dan Suhanan (2013)	Eksperimental	Horizontal	<i>Paraffin Wax</i>	Integrasi HTF dan PCM pada PATS tipe <i>thermosyphon</i> mampu menyimpan energi kumulatif 3,95 MJ selama waktu charging 340 menit

2.1.4 Stratifikasi termal pada tangki PATS

Cabeza dkk (2003) meneliti tentang penggunaan PCM pada PATS untuk meningkatkan stratifikasi. Menggunakan modul PCM yang berbeda yang berbentuk silinder menggunakan tangki dengan dinding kaca akrilik. Hasil penelitian ini adalah dengan menambahkan PCM dibagian atas tangki, kapasitas penyimpanan meningkat

secara signifikan, proses pendinginan dari lapisan atas dapat ditunda secara signifikan dari 40% menjadi 20%.

Castell dkk (2010) meneliti tentang karakteristik stratifikasi dalam tangki air pada proses *discharging* dengan laju aliran rendah. Percobaan dilakukan dengan laju aliran yang berbeda serta membandingkan parameter untuk mengetahui karakteristik stratifikasi air di dalam tangki. Hasil penelitian ini menunjukkan bilangan Richardson adalah bilangan terbaik untuk menentukan stratifikasi air dalam tangki.

Priyanto dan Waluyo (2015) meneliti stratifikasi temperatur dan unjuk kerja tangki dengan variasi debit aliran pada sistem PATS menggunakan tangki PET bagian bawah dan atas berdiameter dalam 200 mm dan 300mm, tangki penampung air dingin dan air panas (flow water), pompa, gate valve, difuser, termokopel. Hasil penelitian ini stratifikasi tangki PET dengan variasi debit aliran 1,85 liter/menit memiliki harga kelengkungan gradien termoklit yang lebih besar dari pada debit 1,65 dan 1,39 liter/menit. Penggunaan debit 1,85 liter/menit memiliki unjuk kerja yang lebih bagus, karena mempunyai ketebalan termoklin yang lebih tipis, mempunyai kapasitas penyimpanan energi yang lebih besar dan efisiensi termal Half Figure of Merit yang lebih besar. Menghasilkan data yang baik perlu memilih material tahan panas yang baik dan proses pengujian alat dan bahan harus sesuai dengan SNI 3021. Selain itu harus menentukan parameter temperatur pada PATS.

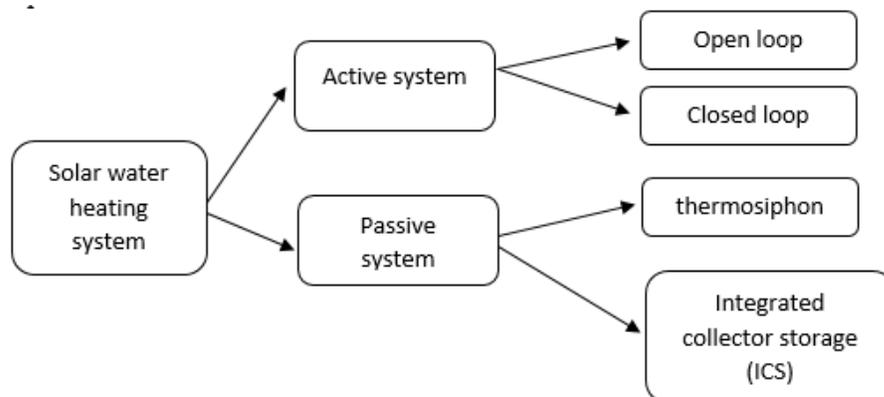
Penelitian	Bentuk penelitian	Tangki	PCM	Hasil
Cabeza dkk (2003)	Eksperimental	Vertikal	<i>Paraffin wax</i>	Lapisan air di bagian atas Tangka memperoleh kalor dari kapsul PCM pada saat <i>discharging</i>
Castell (2010)	Eksperimental	Vertikal	Air	Bilangan Richardson adalah bilangan terbaik untuk menentukan

				stratifikasi air dalam tangki
Penelitian	Bentuk Penelitian	Tangki	PCM	Hasil
Priyanto dan waluyo (2015)	Eksperimental	Vertikal	Air	Stratifikasi dapat di lihat Dengan ketebalan termoklin, energi kumulatif dan half figure of merit (FOM 1/2)

2.2 Dasar Teori

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

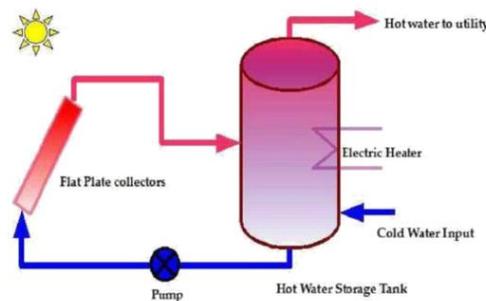
Sistem pemanas air tenaga surya (PATS) merupakan salah satu aplikasi dari pemanfaatan energi matahari dengan menggunakan kolektor untuk menyerap energi yang dipancarkan matahari. PATS memiliki bermacam-macam bentuk berdasarkan cara kerjanya, tetapi PATS memiliki 3 komponen utama, yaitu kolektor, tangki, 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.



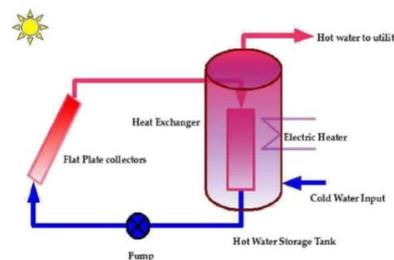
Gambar 2.1 Sistem PATS (Jamar, 2016)

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

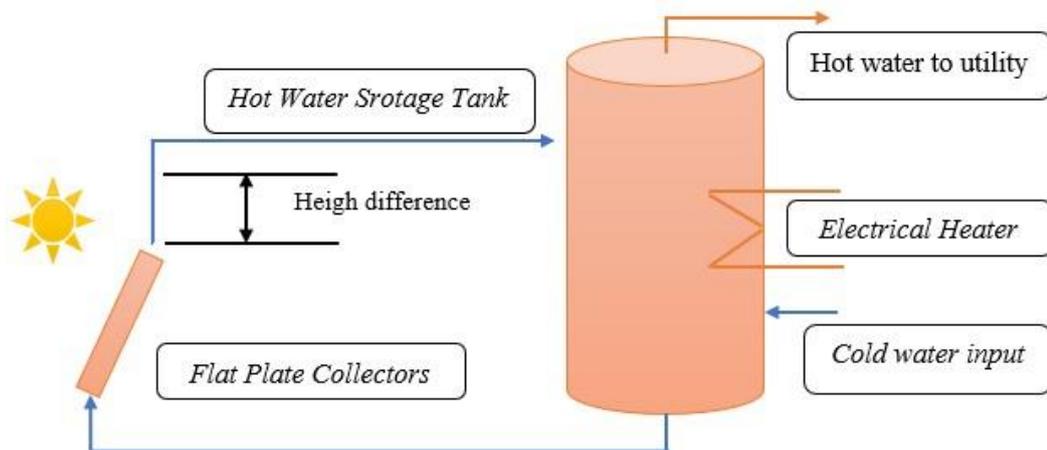
Pemanas air tenaga surya seringkali dimanfaatkan di dalam ruang lingkup rumah tangga dengan menggunakan sistem *thermosyphon*. Sistem ini merupakan sistem yang mengandalkan perbedaan massa jenis fluida sehingga alat untuk mengalirkan fluida seperti pompa tidak diperlukan. Sistem *thermosyphon* terdapat sirkulasi fluida yang akan terus terjadi hingga temperatur seluruh sistem sama (Jansen, 1995). 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.

b. Sistem pasif

PATS sistem pasif adalah pemanas air tanpa menggunakan energi listrik maupun pompa dengan memanfaatkan energi matahari. Aliran air dapat mengalir secara alami dari tangki pemanas ke kolektor atau sebaliknya (*thermosyphon*). Ketika air berada di bawah kolektor dan dalam tangki memiliki densitas yang tinggi sehingga mengakibatkan air dari kolektor dapat bergerak menuju tangki dan air dingin pada tangki mengalir ke kolektor. Sedangkan temperatur air di bagian atas kolektor tinggi, densitas pada air rendah. Siklus ini dapat berulang sampai suhu air dalam tangki dan kolektor sama. Sistem *thermosyphon* dengan pemanas tambahan dapat di lihat dalam gambar 2.3



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. Menurut Cabeza, dkk (2011)

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).

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

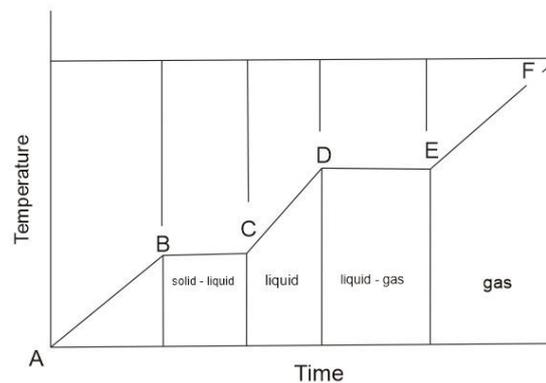
Selisih temperatur akhir (T_f) dan temperatur awal (T_i) dalam °C; massa material penyimpan (m) dalam kg; kalor jenis rata – rata material penyimpan saat proses (c_{ap}) dalam J/kg.°C; massa jenis (ρ) dalam kg/m³ dan volume material (V) dalam m³.

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.

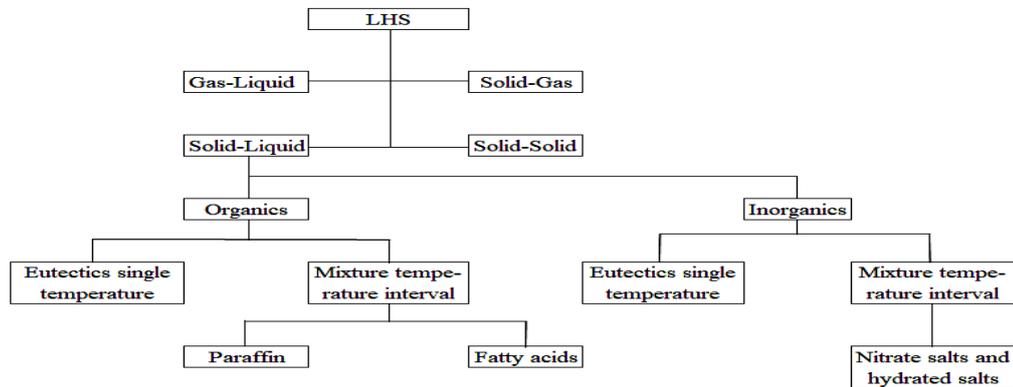
2.2.8 Phase Change Material

Menurut Marsah, (2014) menjelaskan bahwan *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 mel epas 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 ($\sim 0,2$ W/m. $^{\circ}$ 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.
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 *latent heat value*. Semakin tinggi nilai *specific heat* dan *latent 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.



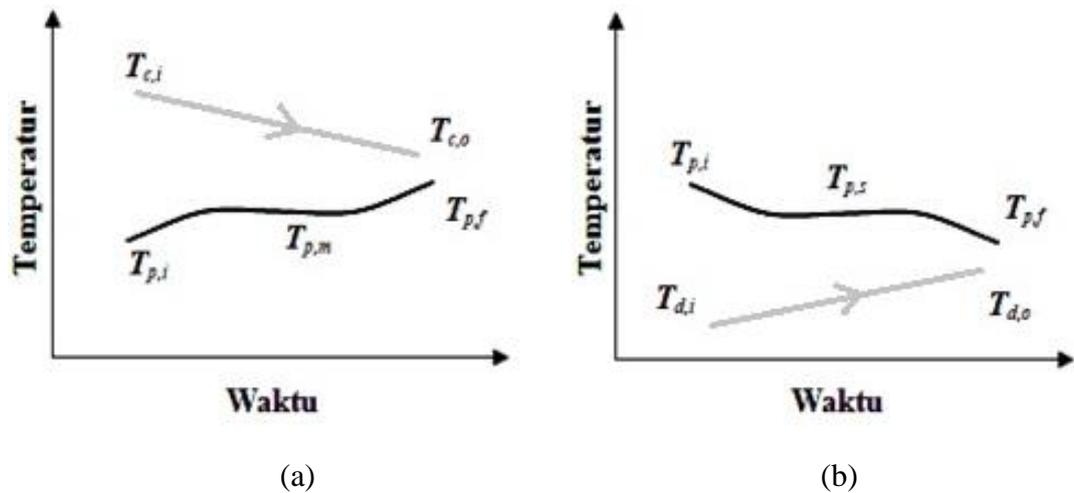
Gambar 2.5 Klasifikasi *phase change material* (PCM)

(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.



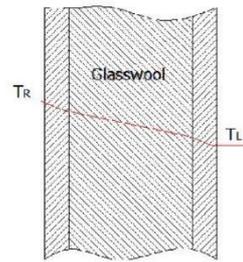
Gambar 2.6 Skema temperatur pada sistem LHS

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

2.2.10 Perancangan Tangki

Rancang bangun pemanas air tenaga matahari ini perlu adanya penambahan alat untuk menampung air yang dihasilkan dari kolektor pelat datar. Oleh karena itu penulis merancang tandon air panas yang memiliki kapasitas 50 Liter yang terbuat dari bahan stainless stel, pemilihan bahan tersebut dikarenakan stainless steel dapat menyimpan suhu panas air yang cukup baik dan tahan terhadap korosi. Tandon air panas ini memiliki 2 lapis tandon dimana tandon yang pertama sebagai wadah penyimpanan air panas kemudian tandon yang kedua sebagai isolator agar suhu panas air yang didalam dapat diminimalisir. Diantara 2 lapisan tandon tersebut masih ada ruang celah yang diberi busa isolator untuk menahan panas air yang ada didalam tandon. Air hasil proses pengolahan dari kolektor pelat datar yang terkumpul didalam tandon air panas kemudian air tersebut siap untuk digunakan kebutuhan sehari-hari (Budi raharjo,2017).

Sesuai dengan fungsinya dan berdasarkan sifat – sifat fisik material maka bahan isolasi yang di pilih adalah glasswool isolasi dan rangka kolektor terdiri dari tiga lapisan yaitu, lapisan alumunium, glasswool dan alumunium. Seperti pada Gambar 2.7. Diman TR dan TL adalah laju perpindahan panas dari ruang kolektor ke lingkungan (Abdullah dkk, 2014)



Gambar 2.7 Lapisan Isolasi (Abdullah dkk, 2014)

Isolasi dan rangka kolektor di bagi menjadi dua bagian yaitu bagian samping dan bagian bawah. Masing – masing ukuran dan konduktivitas termal bahan dapat di lihat pada Tabel 2.2

Tabel 2.2 Bahan dan sifat isolasi (Abdullah dkk, 2014)

No.	Bahan	k (W/m.K)	Tebal (m)
1	Aluminium	240	0,0008
2	Glasswool	0,04	0,07

a. Heater

Water bath ini maka dipilih heater jenis tubular heater di karenakan jenis heater ini terbuat dari pipa stainless steel yang dapat di bentuk sesuai dengan kebutuhan dari media produksi yang akan dianaskan. Tubular heater ini juga dapat di gunakan di media kering dan media cair seperti air, oli, kimia dan residu. Secara umum kegunaan tubular heater sangat luas karena dapat di bentuk sesuai dengan kebutuhan. Range daya tubular heater sangat luas mulai dari watt kecil puluhan watt sampai dengan watt besar ribuan watt bisa di buat dengan tubular heater (Mustaqin dan indra,2018)



Gambar 2.8 Immersion heater

b. Tube

Tube merupakan pemisah dan sebagai pengantar panas yang berbeda suhunya di antara dua zat yang berbeda di dalam suatu alat. Pemilihan tube ini harus sesuai dengan suhu, tekanan dan sifat korosi fluida yang mengalir. Tube ada dua macam yaitu tube polos (*bare tube*) dan tube bersirip (*finned tube*).

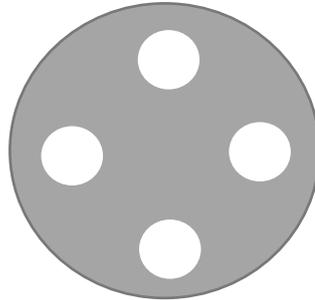
2.2.11 *Phase Change Material*

PCM mempunyai keunggulan yaitu fluktuasi temperatur cenderung stagnan saat proses pengisian dan penguapan, temperatur cenderung flaksibel dalam penggunaannya dan densitas penyimpanan energi yang tinggi. Salah satu jenis LSH yang di gunakan pada PATS adalah parafin wax. Dengan rendahnya konduktifitas termal pada LSH mengakibatkan unjuk kerja termal cenderung rendah, perlu adanya metode untuk meningkatkan nilai unjuk kerja sistem LSH. Metode yang di gunakan adalah memperluas permukaan, penggunaan beberapa PCM, menambahkan matrial dengan konduktifitas termal tinggi, dan pengkapsulan PCM (Najib dan suhanan, 2014).

2.2.12 Peningkatan Laju Transfer Kalor pada *Laten Heat Storage* (LSH)

PCM dengan matrial non logam memiliki konduktifitas rendah hal ini berdampak pada perpindahan kalor yang lambat antara PCM dan *heat transfer flude* (HTF), pada saat pengisian maupun penggunaan. Oleh karena itu peningkatan laju perpindahan panas pada PCM perlu di tingkatkan. Beberapa cara yang dapat di gunakan seperti perluasan permukaan, muktitube PCM, peningkatan konduktifitas termal, dan pengkapsulan PCM.

a. Multitube PCM



Gambar 2.9 Multitubs

Penggunaan multitube PCM berfungsi meningkatkan laju transfer kalor. Tujuan penggunaan multitube PCM adalah mempertahankan perbedaan temperatur konstan secara menyeluruh di dalam tangki TES antara PCM dan HTF selama *fase charging* dan *discarging* sehingga meningkatkan kinerja termal sistem LHS (ibrahim dkk, 2017) multitube dapat di lihat pada gambar 2.9

b. Pengkapsulan PCM

Ekapsulasi PCM juga dapat di klasifikasikan dengan berbagai ukuran seperti enkapsulasi microencapsulation dan macroencapsulation. Kapsul PCM juga bermacam – macam bentuk seperti bola, silinder, tubular atau persegi panjang. Macroencapsulation adalah ukuran kapsul yang lebih besar dengan *parafin wax* di dalamnya, *parafin wax* yang telah dienkapsulasi menunjukkan stabilitas termal dan struktural yang baik dan *thermal capacity storage* yang stabil. Sedangkan *microencapsulation* memiliki ukuran kapsul yang lebih kecil dan kekuatan mekanis *phasa change material* (PCM) yang dienkapsulasi dapat diidentifikasi dengan rasio inti terhadap pelapisan. Peningkatan rasio inti terhadap rasio pelapisan dalam menurunkan kekuatan lapisan dan meningkatkan kemungkinan kebocoran *phasa change material* (PCM) dari enkapsulasi, sedangkan penurunan inti menjadi rasio lapisan mengurangi jumlah *phasa change material* (PCM) dalam ekapsulasi (khan dkk,2016)

Najib dkk (2015) meneliti sistem PATS yang di dalamnya berisi PCM diletakkan di dalam tangki air panas dengan volume 31,37 liter. PCM berupa *parafin wax* yang di masukkan dalam sekumpulan kapsul tembaga berbentuk silinder. PCM berjumlah 16 buah disusun segaris dengan massa total 8,95 kg. Hasil penelitian ini adalah *parafin wax* dapat di integrasikan dengan air sebagai material penyimpanan energi termal dalam tangki PATS.