

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

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

Penelitian tentang pemanas air tenaga surya yang menggunakan berbagai jenis macam PCM dilakukan oleh Anuar, dkk. (2015). Salah satu dari jenis PCM itu adalah *paraffin wax*. *Paraffin wax* ini kemudian dimasukkan kedalam kapsul yang terbuat dari pipa tembaga yang berdiameter 80 mm. PCM akan dipasang kemudian dibandingkan pemakainya pada PATS dengan *integrated collector storage* (ICS). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa PATS memiliki rata-rata efisiensi yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan *integrated collector storage*. Hasil yang maksimal ini didapat karena pemilihan material PCM dengan *melting point* yang tidak jauh berbeda dengan unjuk kerja alat.

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

Studi ekperimental yang dilakukan Nadjib, dkk. (2015) mengenai penyimpanan energi thermal pada tangki pemanas air tenaga surya yang berisi PCM

dengan sebuah tangki pemanas air tenaga surya yang didalamnya berisikan phase change material yang berupa *paraffin wax* di masukan dalam sekumpulan kapsul berbentuk silinder yang susunanya horisontal segaris. Kolektor sebagai sumber kalor bersama tangki dihadapkan ke matahari saat proses charging/pemanasan. Kemudian temperatur HTF dan PCM di amati selama proses charging. Dari hasil data temperatur dapat diketahui kapasitas energi penyimpanan di dalam tangki. Hasil Pengujian menunjukkan penyimpanan energi termal total yang didapat selama proses charging yang berdurasi 340 menit adalah Pats terbesar 4.5 MJ dan peranan dari penggunaan PCM adalah 44.28% dan energi tersimpan kumulatif 3.97 MJ. Perbedaan antara kapasitas penyimpanan energi dengan energi tersimpan kumulatif merupakan energi yang dilepas ke lingkungan. Berdasarkan hasil itu dapat diambil kesimpulan bahwa PCM telah mampu menyimpan energi termal di dalam tangki. Isolasi dalam tangki perlu mendapat perhatian agar rugi rugi termal ke lingkungan dapat diminimalisir.

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.

Penelitian dilakukan oleh Nadjib dan Suhanan, (2014) secara simulasi modeling dengan menggunakan *Ansys Fluent* untuk mengetahui perilaku termal saat proses pelelehan *paraffin wax* secara numerik pada pipa ganda konsentrik dengan sumber kalor yang konstan pada tangka TES sistem PATS *thermosyphon*. Fokus yang dikaji dalam penelitian tersebut yaitu menganalisis evolusi temperatur air sebagai HTF dan *paraffin wax* RT 52 sebagai PCM selama proses *charging*.

Hasil penelitian perpindahan kalor dari HTF ke PCM berlangsung efektif serta transfer kalor yang terjadi pada arah radial dan aksial.

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

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.

Peneliti Murray dan Groulx, (2014) melakukan penelitian tentang LHS. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik LHS, terutama pada tahap perubahan fase dari padat menjadi cair dan sebaliknya. Penelitian ini menggunakan tangki vertikal dan *dodecanoid acid* sebagai LHS. Hasilnya, peneliti menemukan adanya konveksi natural yang signifikan pada saat fase *melting* dan *melted* dalam proses *charging*, sedangkan saat *solidification* konveksi natural yang terjadi kecil sehingga dapat diabaikan. Kecepatan laju aliran dalam proses *charging* dapat mempengaruhi proses *melting*. Proses *discharging* semakin cepat laju aliran, maka proses *melting* akan lebih cepat. Sistem ini memiliki kelemahan pada proses *charging* dan *discharging* memerlukan waktu yang lama. Peneliti menyarankan untuk memperbesar luar permukaan yang akan digunakan sebagai perpindahan panas dari HTF ke PCM dan sebaliknya.

Tabel 2. 1 Ringkasan Tinjauan Pustaka

Nama	Tujuan	Hasil
Jufrizal, dkk. (2014)	Untuk mengetahui efisiensi termal dan massa <i>paraffin wax</i> yang melebur pada proses <i>charging</i> .	Hasil pengujian pada proses <i>charging</i> dapat disimpulkan bahwa massa parafin wax yang melebur terbanyak adalah 18,81 kg dan efisiensi termal tertinggi diperoleh 44,28%.
Anuar, dkk, (2015)	Membandingkan pemakaian PCM yang diterapkan pada PATS dan <i>intergrated coilector storage (ICS)</i> .	PATS memiliki rata-rata efisiensi yang lebih tinggi bila dibandingkan ICS.
Nadjib M, (2016)	Meneliti penggunaan material LHS sebagai PCM pada pemanas air tenaga surya (PATS).	PCM dapat mengendalikan penurunan efisiensi pengumpulan energi saat intensitas matahari mulai menurun.

Nadjib, M., dkk. (2015)	Meneliti penggunaan tangki PATS yang didalamnya terdapat kapsul dan berisi PCM/ <i>paraffin wax</i> .	PCM mampu menyimpan energi termal di dalam tangki.
Regin, dkk. (2009)	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.
Nadjib M dan Suhanan, (2014)	Menganalisis evolusi suhu air sebagai HTF dan <i>paraffin wax</i> sebagai PCM selama proses <i>charging</i> .	Perpindahan kalor dari HTF ke PCM berlangsung efektif.
Longeon, dkk. (2013)	Menguji dan memvisualisasi untuk menganalisis pengaruh fluida perpindahan panas (HTF).	Hasil pengujian menggunakan dimodelkan menggunakan <i>software</i> CFD.
Khan, dkk. (2011)	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>
Bellan, dkk. (2014)	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> .
Murray dan Groulx, (2014)	Bertujuan mengetahui karakteristik LHS, terutama saat perubahan fasa.	Adanya konveksi natural yang signifikan pada saat fasa melting dan melted dalam proses <i>charging</i> .

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Definisi Tangki TES (Thermal Energy Storage)

Thermal Energy Storage (TES) didefinisikan sebagai alat penyimpan sementara energi termal dalam bentuk zat panas ataupun dingin. Kebutuhan energi dapat divariasikan pada kebutuhan harian, mingguan maupun musiman. Dengan kebutuhan yang bervariasi maka sistem TES dapat dijadikan solusi karena sistem ini dapat menyimpan energi dan mengeluarkan pada saat waktu yang dibutuhkan. Sistem TES memiliki potensi untuk meningkatkan penggunaan peralatan energi termal secara efektif. Sistem TES terdiri atas tiga jenis, yaitu

- a. Penyimpanan panas sensibel dengan menggunakan media penyimpanan cair dan padat.
- b. Penyimpanan panas laten menggunakan bahan perubahan fase (PCM), dari keadaan padat menjadi keadaan cair.
- c. Penyimpanan termokimia (TCS) menggunakan reaksi kimia untuk menyimpan dan melepaskan energi panas.

Menurut Gil, dkk. (2010) 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 temperature 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.

2.2.2. Sensible Heat Storage

Sensible heat storage (SHS), energi tersimpan di dalam sistem ditandai 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 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, dkk. (2009).

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

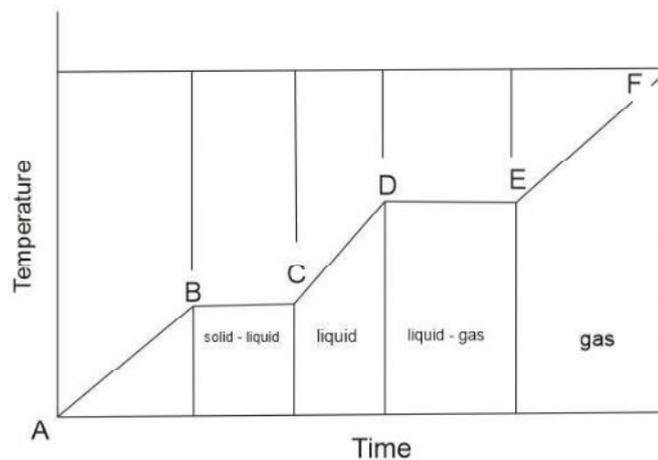
Selisih temperature akhir (T_f) dan temperature awal (T_i) dalam °C; massa material penyimpanan (m) dalam kg; kalor jenis rata – rata material penyimpanan saat proses (c_{ap}) dalam J/kg.°C; massa jenis (ρ) dalam kg/m³ dan volume material (V) dalam m³.

2.2.3. 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 2.1 dan jumlah kalor dalam satuan joule terdapat pada persamaan 2.2 Regin, dkk. (2008).

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

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-padat (L_p), kalor *latent* perubahan padat-cair (L), dan kalor *latent* perubahan cair-gas (L_g) dalam kJ/kg.



Gambar 2. 1 Grafik temperature-waktu pada pemanasan suatu zat

(Sumber: Regin, dkk 2008)

2.2.4. 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 melepasi 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.

2.2.5. Phase Change Material

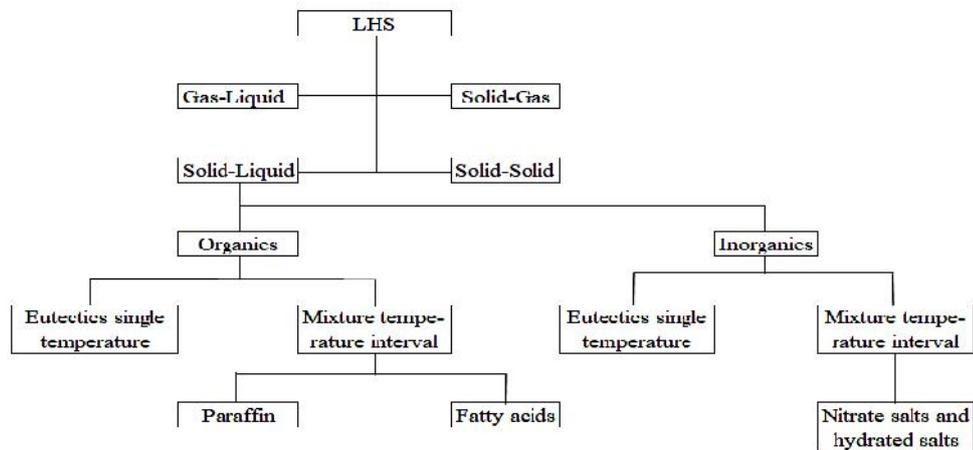
Menurut Marsah, (2014) menjelaskan bahwa *phase change material* (PCM) merupakan material yang memiliki panas dengan fusi yang tinggi, material ini dapat meleleh dan membeku pada suhu tertentu serta mampu menyimpan dan melepas energi dengan besaran tertentu. PCM menyerap dan melepas panas yang terjadi pada saat perubahan fase padat ke cair atau sebaliknya, jadi material PCM dapat simpulkan 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 material mencapai (~ 200 kJ/kg) dengan melting point kisaran antara 8 sampai 106°C serta siklus termalnya mampu bertahan selama 1500 siklus. Oleh sebab itu *paraffin wax* dianggap mempunyai dalam

menyimpan energi yang cukup besar. Material PCM yang harus digunakan harus memiliki karakteristik yang ditunjukkan pada tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Karakteristik material phase change material (PCM) yang digunakan pada sistem SWH menurut Regin, dkk (2008).

Sifat termal	Sifat fisis	Sifat kimia	Faktor ekonomi
Temperatur perubahan fase dari material sesuai temp kerja	Kerapatan material tinggi	Memiliki sifat kimia yang stabil	Tersedia banyak
Memiliki <i>laten heat</i> dan <i>specific heat</i> yang tinggi	Kerapatan rendah ketika berubah fase	Tidak terjadi dekomposisi	Tidak mahal
Konduktivitas termal rendah	Tidak terjadi <i>supercooling</i> ketika dingin	Tidak beracun, mudah terbakar dan meledak	
		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 fasa 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 besar dan kompleks. Klasifikasi jenis PCM dapat dilihat pada gambar 2.3.



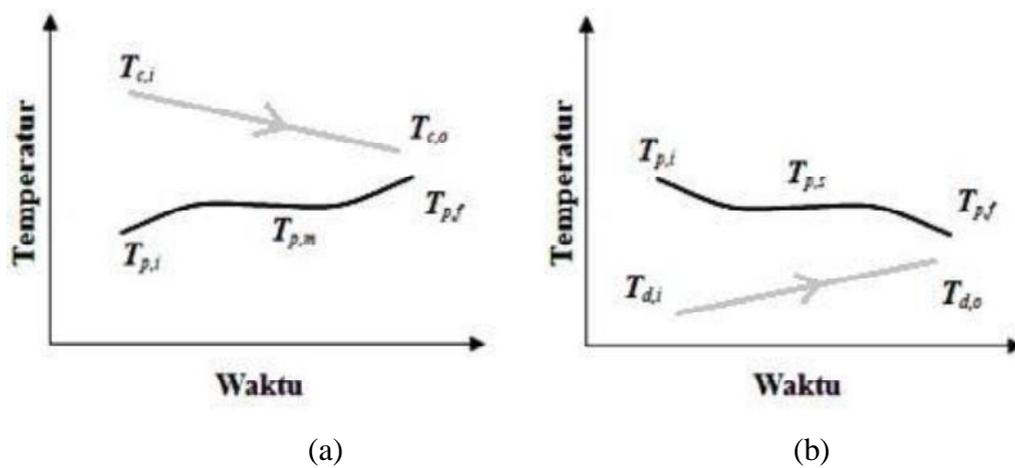
Gambar 2. 2 Klasifikasi phase change material (PCM)

(Sumber: Gil, dkk. 2010)

2.2.6. *Charging dan Discharging*

Proses charging adalah proses penyerapan kalor dari sumber panas yang dimiliki oleh HTF ke PCM yang berada di dalam TES. Proses ini berlangsung dari temperatur rendah ke temperature tinggi. Selama proses ini PCM akan menyerap energi panas dari HTF sampai mengalami perubahan fasa dari padat menjadi cair. Ketika proses charging selesai, diharapkan PCM telah meleleh dan temperatur PCM sama dengan HTF.

Proses discharging adalah proses yang berkebalikan dengan charging yaitu 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 dari cair menjadi padat 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 2.3.



Gambar 2. 3 Skema temperatur pada sistem LHS (a) proses charging (b) proses discharging