

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Studi yang dilakukan oleh Sharif dkk (2014) tentang *solar water heater* yaitu penelitian yang menggunakan bermacam jenis PCM yang salah satunya adalah *paraffin wax*. *Paraffin wax* diaplikasikan ke dalam pipa tembaga dengan diameter 80 mm. Kemudian dapat dilihat perbandingan pemakaiannya pada PATS menggunakan *integrated collector storage* (ICS). Hasil yang diperoleh adalah PATS memiliki jumlah efisiensi lebih tinggi dari *integrated collector storage*. Jika pemilihan material PCM dengan *melting point* tidak jauh berbeda dengan unjuk kerja alat, maka hasil dari PATS akan maksimal.

Studi numerik yang dilakukan Jufrizal dkk (2015) untuk mengatasi kekurangan dari *solar water heater* (SWH) dengan mengaplikasikan *termal energy storage* (TES) berisi *paraffin wax*. Proses *discharging* ini menggunakan model plat yang didalamnya berupa TES dengan sumber panas dari radiasi matahari. Air mengalir di dalam pipa tembaga melewati kotak aluminium yang berisi *paraffin wax*, kemudian air keluar dari kotak aluminium. Ketika proses *discharging*, panas ditransfer dari *paraffin wax* ke air yang akan menyerap kalor dan membuat *paraffin wax* menjadi fasa padat.

Penelitian mengenai penggunaan TES pada PCM pernah dilakukan oleh Nadjib (2016). PCM memakai *paraffin wax* yang ditempatkan di dalam pipa kapsul, kemudian termokopel dipasang disisi *heat transfer fluid* (HTF) dan PCM. Kapsul menggunakan pipa tembaga yang bertujuan menghantarkan panas dengan baik. Material PCM mampu menahan penurunan efisiensi energi ketika minimnya cahaya matahari. TES cukup efisien jika saat *discharging* perbedaan suhu antara *paraffin wax* dan HTF tidak begitu signifikan.

Peelitian yang dilakukan Sukamta dkk (2015) mengenai paraffin wax sebagai PCM yang disusun secara horizontal didalam kapsul tembaga. Sumber kalor yang di terima kolektor dihadapkan langsung ke arah matahari. Data temperatur HTF dan PCM diambil saat proses *charging* selama 340 menit. Dari data tersebut disimpulkan bahwa PCM mempunaya daya penyimpanan kalor yang baik jika memperhatikan isolasi di dalam tangki, karena rugi - rugi termal yang terbuang dapat di minimalisir.

Penelitian *nano fluid* yang dilakukan Eastman (1995) yaitu dengan menambahkan tembaga *nano phase* kedalam HTF konvensional. Hasil dari penelitian tersebut adalah meningkatkan nilai konduktifitas termal dan mengurangi perpindahan panas secara signifikan dengan penambahan tembaga *nano phase*.

Penelitian yang dilakukan Xiang-Qi (2007) tentang meningkatkan perpindahan kalor konveksi menggunakan nanomaterial terhadap fluida. Hasil dari penelitian adalah perpindahan panas konveksi dapat ditingkatkan dengan mengubah laju geometri dan meningkatkan konduktivitas termal fluida tersebut. Salah satu contoh nanomaterial yang digunakan adalah tembaga atau Cu. Fluida yang digunakan adalah oli, air dan minyak.

Penelitian Xuan & Li (1999) tentang peningkatan perpindahan panas dengan mencampur fluida dan nanomaterial. Akibat dari pencampuran ini adalah meningkatkan proses perpindahan panas secara signifikan karena nilai konduktivitas termal juga meningkat. Dampak yang ditimbulkan fraksi volume bentuk dimensi serta propertis dari nanofluid adalah meningkatnya konduktivitas termal. Metode pengukuran yang dilakukan menggunakan *hot wire* yang berfungsi untuk mengukur konduktifitas termal. Hasil yang diperoleh dari pengukuran ini menunjukkan bahwa kenaikan konduktivitas termal dengan menambahkan fraksi volume dari partikel nanomaterial.

Penelitian oleh Alomair (2017) mengenai paduan antara paraffin wax dengan nanomaterial *aluminium okside* dan *paraffin wax* dengan nanomaterial *copper oxide*

atau CuO. Tipe *paraffin wax* yang digunakan adalah tipe RT-18 dan nanomaterial berukuran 50 nm. Hasil dari penelitian adalah waktu *melting process* antara paduan aluminium oksida dan *paraffin wax* lebih lambat dibandingkan campuran *copper oxide* dan *paraffin wax*.

Penelitian yang dilakukan Al-Kayiem (2016) adalah dengan penambahan nanomaterial tetapi hanya dengan campuran Cu atau tembaga. Pada penelitian ini nanomaterial Cu pada *paraffin wax* sebagai PCM, bertujuan untuk menaikkan nilai konduktivitas termal yang digunakan tangki TES. Nanomaterial Cu menggunakan ukuran 20 nm dengan beberapa fraksi yaitu 0.5%, 1%, 1.5%, dan 2%. Hasil penelitian yaitu konduktivitas termal naik sebesar 14%, 23.9%, 42.5% dan 46.3% sesuai fraksi terkecil sampai fraksi terbesar. Penambahan Cu juga mempengaruhi tingkat efisiensi suatu PCM dan ketika pengujian fraksi 1% mengalami kenaikan efisiensi sebesar 1.7%. Fokus penelitian ini adalah PCM sebagai penyimpanan panas dan air digunakan sebagai HTF. Penyimpanan panas menggunakan campuran Cu 20% dengan *paraffin wax* sebagai media PCM dan sumber panas memakai cahaya radiasi matahari.

Berikut rangkuman penelitian yang diacu dalam penelitian ini:

Tabel 2 1. Rangkuman penelitian

No	Peneliti (tahun)	Parameter yang diamati	Yang diteliti	Hasil penelitian
1	Sharif dkk (2014)	perbandingan pada PATS menggunakan integrated collector storage (ICS)	Paraffin wax diaplikasikan kedalam pipa tembaga dengan diameter 80 mm.	Hasil yang diperoleh adalah PATS memiliki efisiensi lebih tinggi dari ICS

2	Jufrizal dkk (2015)	Mengatasi kekurangan pada Solar water heater (SWH)	<i>Termal energy storage TES</i> berisi <i>paraffin wax</i>	Tangki TES mampu menyimpan energi panas secara efisien
3	Nadjib (2016)	Penggunaan PCM untuk menahan penurunan efisiensi energi ketika minimnya cahaya matahari	Paraffin wax	TES cukup efisien jika saat discharging perbedaan suhu antara paraffin wax dan HTF tidak begitu signifikan.
4	Sukamta dkk (2015)	Paraffin wax disusun secara horizontal didalam kapsul tembaga	Paraffin wax	PCM mampu menyimpan kalor dengan baik jika memperhatikan isolasi didalam tangki, karena rugi-rugi aliran dapat diminimalisir
5	Eastman (1995)	Penambahan tembaga <i>nanophase</i> kedalam HTF konvensional	Tembaga <i>nanophase</i>	Meningkatkan konduktifitas termal dan mengurangi perpindahan panas secara signifikan

6	Xiang – Qi (2007)	penggunaan nanomaterial pada fluida untuk meningkatkan perpindahan panas secara konveksi.	nanomaterial yang digunakan adalah Cu	Pencampuran nanomaterial pada fluida dapat meningkatkan konduktivitas termal
7	Xuan & Li (1999)	Penggunaan nano material terhadap fluida	nanomaterial	Perpindahan panas konveksi dapat ditingkatkan dengan mengubah laju geometri dan meningkatkan konduktivitas termal fluida
8	Alomair (2017)	membandingkan campuran paraffin wax dengan nanomaterial AlO dan paraffin wax dengan nanomaterial CuO	paraffin wax aluminium oksida dan CuO	waktu pelelehan campuran aluminium oksida dengan paraffin wax lebih lambat jika dibandingkan dengan campuran copper oxide

9	Al-Kayiem (2016)	penambahan nanomaterial Cu pada paraffin wax sebagai PCM dengan fraksi 0.5%, 1%, 1.5%, dan 2%.	Paraffin wax dan Cu	konduktivitas termal naik sebesar 14.0%, 23.9%, 42.5% dan 46.3% sesuai fraksi terkecil sampai terbesar.
10	Lefebvre dan Tezel (2017).	Media penyimpan energi panas	Tangki TES	Tangki TES berguna untuk menyimpan energi panas saat panas matahari tidak optimal atau saat malam hari

## 2.2. Dasar Teori

### 2.2.1. Thermal Energy Storage

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

TES pada aplikasinya dikelompokkan menjadi 3 macam, yaitu *latent heat storage* (LHS), *sensible heat storage* (SHS), dan *thermo-chemical storage*.

#### 2.2.1.1. Latent Heat Storage

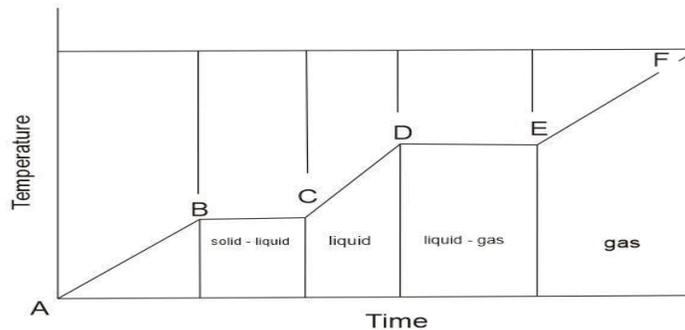
*Latent Heat Storage* adalah salah satu aplikasi dari TES yang menyimpan energi panas ke dalam bentuk energi laten. Energi laten tersimpan dalam material saat proses perubahan fasa padat PCM atau material penyimpanan panas. Proses

penyimpanan panas pada LHS yaitu karena terjadinya perubahan fasa dari padat ke cair. Fase cair ke padat lebih banyak digunakan pada penelitian daripada fase cair ke gas karena volume yang dibutuhkan lebih kecil. Salah satu kelebihan LHS yaitu mempunyai sifat densitas energi yang tinggi, sehingga dapat menyimpan energi yang besar dengan tempat yang tidak terlalu besar (Zhou dan Zhao, 2011).

Total energi dari material PCM dapat dicari atau dihitung dengan menggunakan persamaan 2.1.

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

Dimana massa ( $m$ ) dalam satuan kg ; kalor laten perubahan padat-cair ( $L$ ), kalor laten cair-gas ( $L_g$ ) dalam satuan J/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 satuan J/kg°C.



Gambar 2.1 Grafik temperatur waktu pada pemanasan suatu zat

### 2.2.1.2. Sensible Heat Storage

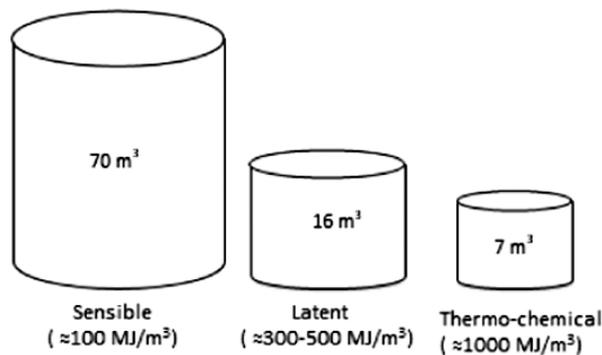
*Sensible Heat Storage* (SHS) merupakan salah satu aplikasi dari TES yang energi tersimpan didalamnya dengan perubahan suhu benda. Pada SHS terdapat dua macam media yaitu media cair dan padat. Media padat pada SHS contohnya logam sedangkan media cair yaitu seperti air, minyak, dan *molten salts* sebagai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

Perbandingan energi yang tersimpan dapat dilihat pada Gambar 2.2. yang mengakibatkan SHS membutuhkan volume ruang besar agar energi penyimpanannya besar.

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

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

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



Gambar 2.2 Volume dari storage untuk penyimpanan (1800 kWh)

### 2.2.1.3. Thermo-Chemical Storage

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

### 2.2.2. Phase Change Material

Perbandingan utama antara PCM dengan media penyimpan kalor konvensional misalnya batu atau air adalah selisih antara suhu kerja dari titik leleh. Media air merupakan PCM yang dapat mendinginkan makanan atau minuman dengan es, karena air mempunyai titik leleh pada  $0^{\circ}\text{C}$ . Sehingga air tidak dapat maksimal digunakan untuk penyimpanan panas yang biasanya suhu kerja di atas  $0^{\circ}\text{C}$ . Hal tersebut merupakan contoh dalam kehidupan tentang kalor yang dapat diserap dalam perubahan fasa (Hasenöhrl, 2009).

PCM dapat dikatakan baik dalam menyimpan panas apabila material tersebut mempunyai kalor laten yang tinggi. Kalor laten adalah material yang menyerap panas atau melepaskan panas ketika material tersebut melebur atau memadat. Material yang baik dapat menyimpan panas yang besar jika titik didih sesuai dengan suhu material leburnya (Hasenöhrl, 2009).

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

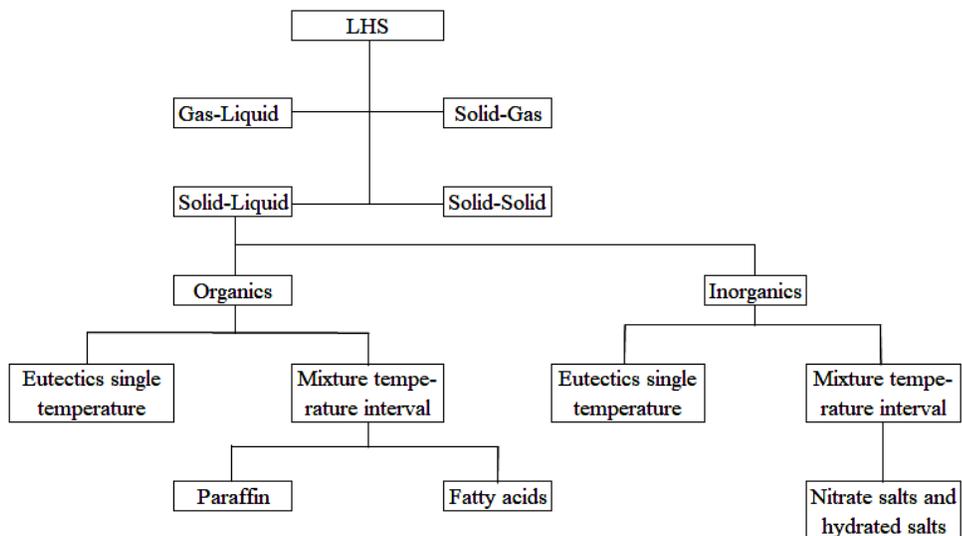
2.1. Karakteristik material yang dapat digunakan sebagai PCM terdapat pada tabel

Tabel 2.2 Karakteristik PCM menurut (Regin dkk, 2006)

Sifat termal	Sifat fisis	Sifat kimia	Faktor ekonomi
Temperatur perubahan fase dari material sesuai temperatur 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
Konduktifitas termal rendah	Tidak terjadi <i>supercooling</i> ketika membeku	Tidak beracun, mudah terbakar dan meledak	

Faktor yang berpengaruh dalam kapasitas penyimpanan PCM, yaitu dari besarnya nilai *laten heat* dan *specific heat*. Sehingga material yang mempunyai nilai *laten heat* dan *specific heat* yang tinggi maka semakin besar kapasitas penyimpanan panasnya. Klasifikasi jenis PCM dapat dilihat pada Gambar 2.2.

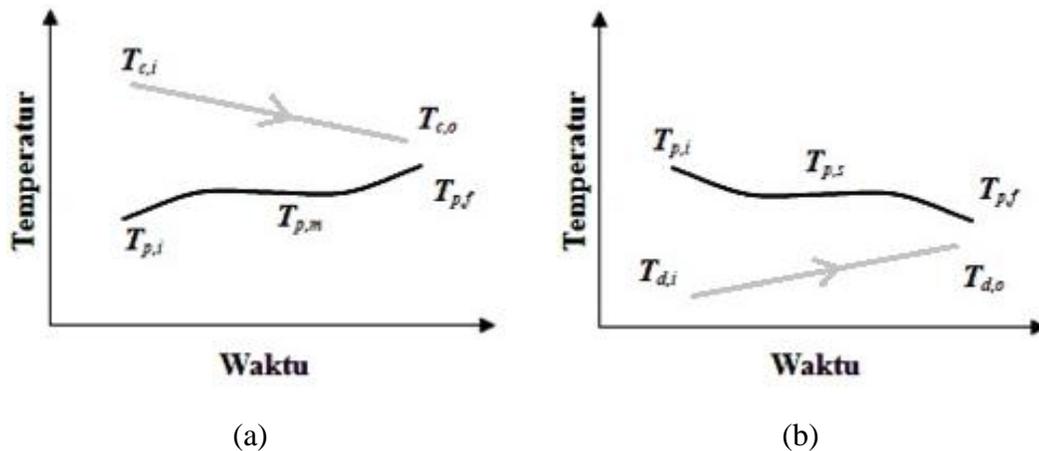


Gambar 2.3 Klasifikasi Phase Change Material PCM (Gil dkk, 2010)

### 2.2.3. Charging dan Discharging

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

Proses *discharging* sendiri adalah proses pelepasan energi panas yang telah tersimpan pada PCM saat proses *charging*. Pada proses ini temperatur awal tinggi lalu sedikit demi sedikit akan menurun dan terjadi perubahan fasa *liquid-solid* atau *solidification*. Selama proses ini temperatur PCM akan turun dan berhenti ketika temperatur PCM sama dengan temperature HTF. Grafik perubahan temperatur pada proses *charging* dan proses *discharging* dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.4 Grafik temperatur pada LHS (a) charging (b) discharging