

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Jufrizal dkk (2015) melakukan studi numerik untuk mengatasi kekurangan dari *solar water heater* (SWH) dengan memakai *termal energy storage* (TES) yang berisi *paraffin wax* sebanyak 19,5 kg. Proses *discharging* ini menggunakan model plat datar yang didalamnya berupa TES dengan sumber panas dari sinar matahari. Air mengalir di dalam pipa tembaga melewati kotak aluminium yang sudah terisi *paraffin wax*, kemudian air keluar dari kotak aluminium. Saat proses *discharging*, panas ditransfer dari *paraffin wax* ke air sehingga air menyerap kalor dan membuat *paraffin wax* menjadi fasa padat. Hasil dari pengujian saat proses *charging* dapat massa *paraffin wax* yang melebur terbanyak adalah 18,81 kg dan efisiensi termal tertinggi diperoleh 44,28%. Sedangkan proses *discharging* volume air panas diperoleh 40 liter untuk temperatur minimum 35 °C dan efisiensi termal tertinggi adalah 46,81%.

Penelitian tentang penggunaan TES pada PCM pernah dilakukan oleh Nadjib (2016). PCM disini menggunakan *paraffin wax* yang ditaruh dalam pipa kapsul, kemudian dipasang termokopel di sisi *heat transfer fluid* (HTF) dan PCM. Kapsul disini menggunakan pipa tembaga agar dapat megantarkan panas dengan baik. Terdapatnya PCM mampu menahan penurunan efisiensi energi pada saat cahaya menurun atau tidak adanya cahaya matahari. TES cukup efisien jika saat *discharging* perbedaan suhu antara *paraffin wax* dan HTF tidak berbeda jauh.

Studi tentang pemanas air tenaga surya yang dilakukan oleh Sharif dkk (2014) yaitu penelitian yang menggunakan bermacam-macam jenis PCM, salah satunya adalah *paraffin wax*. *Paraffin wax* ini dimasukan ke dalam kapsul atau pipa tembaga berdiameter 80 mm. PCM akan dipasang dan dibandingkan pemakaiannya pada PATS dengan *integrated collector storage* (ICS). Hasil dari penelitian ini adalah PATS memiliki rata-rata efisiensi yang lebih tinggi dari *integrated collector storage*. PATS akan

mendapatkan hasil yang maksimal jika pemilihan material PCM dengan *melting point* yang tidak jauh berbeda dengan unjuk kerja alat.

Penelitian yang dilakukan oleh **Sukamta dkk (2015)** tentang paraffin wax adalah penyimpanan panas menggunakan PCM. PCM disini menggunakan paraffin wax yang dimasukan pipa tembaga dan disusun secara horizontal atau segaris. Sumber panas menggunakan sinar matahari melalui perantara kolektor yang dihadapkan secara langsung ke arah matahari. Hasil data temperature HTF dan PCM diambil saat proses *charging* selama 340 menit. Berdasarkan hasil tersebut disimpulkan bahwa PCM dapat menyimpan kalor dengan baik jika memperhatikan isolasi dalam tangki, karena dapat meminimalisir rugi rugi termal yang terbuang.

**Stephen dkk (1995)** melakukan penelitian tentang nanofluid yaitu dengan cara menambahkan tembaga fasa-nano ke dalam HTF konvensional. Hasil penelitian yang diinginkan berupa perbandingan konduktifitas termal sebelum dan setelah penambahan tembaga fasa-nano. Hasil dari penelitian ini yaitu dengan penambahan nanophase tembaga dapat menaikkan nilai konduktifitas termal dan mengurangi daya pertukaran panas secara signifikan.

Penelitian yang dilakukan **Xuan & Li (1999)** tentang peningkatan transfer panas dengan mencampurkan nanomaterial dan fluida. Pencampuran ini meningkatkan proses transfer panas secara signifikan karena nilai konduktivitas termal naik. Kenaikan konduktivitas termal dipengaruhi oleh fraksi volume, bentuk, dimensi dan propertis dari nanofluid. Pengukuran konduktivitas termal pada penelitian ini menggunakan metode *hot wire*. Hasil pengukuran menunjukkan kenaikan konduktivitas termal dengan penambahan fraksi volume dari partikel nanomaterial.

Penelitian yang dilakukan **Shchukina (2018)** tentang penggunaan nanoencapsulation pada PCM. PCM merupakan penyimpanan panas dalam jumlah besar saat fase transisi dan untuk meningkatkan efisiensi saat perpindahan panas. Pada penelitian ini dengan tambahan nanoencapsulation bertujuan memberikan

perlindungan PCM dari lingkungan eksternal dan untuk meningkatkan luas permukaan spesifik yang berguna dalam perpindahan panas. Penelitian ini menyoroti teknik enkapsulasi baik PCM organik dan anorganik dengan menggunakan nanoencapsulation ukuran 1 nm.

Adapun penelitian [Xiang-Qi \(2007\)](#) lainnya tentang penggunaan nanomaterial pada fluida untuk meningkatkan perpindahan panas secara konveksi. Pada penelitian ini perpindahan panas konveksi dapat ditingkatkan melalui mengubah laju geometri dan meningkatkan konduktivitas termal fluida tersebut. Pencampuran nanomaterial pada fluida dapat meningkatkan konduktivitas termal, salah satu contoh nanomaterial yang digunakan pada penelitian adalah Cu atau tembaga. Fluida pada umumnya yang digunakan adalah air, minyak dan oli.

Penelitian yang sama dilakukan oleh [Alomair \(2016\)](#) yaitu campuran paraffin wax dengan nanomaterial aluminium oksida dan campuran *paraffin wax* dengan nanomaterial CuO atau *copper oxide*. Penelitian tersebut menggunakan *paraffin wax* tipe RT-18 dan nanomaterial yang digunakan berukuran 50 nm. Hasil dari penelitian tersebut adalah waktu pelelehan campuran aluminium oksida dengan paraffin wax lebih lambat jika dibandingkan dengan campuran *copper oxide* dengan *paraffin wax*.

[Al-Kayiem \(2016\)](#) juga melakukan penelitian 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 untuk tangki TES. Nanomaterial Cu disini menggunakan ukuran 20 nm dan memiliki beberapa fraksi yaitu 0.5%, 1%, 1.5%, dan 2%. Hasil setelah penelitian yaitu konduktivitas termal naik sebesar 14.0%, 23.9%, 42.5% dan 46.3% sesuai fraksi terkecil sampai terbesar. Penambahan Cu ternyata mempengaruhi pada tingkat efisien suatu PCM, ketika pengujian fraksi 1% mengalami kenaikan efisiensi sebesar 1.7%. Kesamaan dengan penelitian ini adalah sama-sama menggunakan PCM dari campuran paraffin wax dengan serbuk tembaga.

Fokus dari penelitian ini menggunakan PCM sebagai penyimpanan panas dan air digunakan sebagai HTF. Penyimpanan panas disini menggunakan campuran Cu 10% berat dengan *paraffin wax* sebagai media PCM dan sumber panas memakai cahaya panas matahari.

## **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.

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

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.

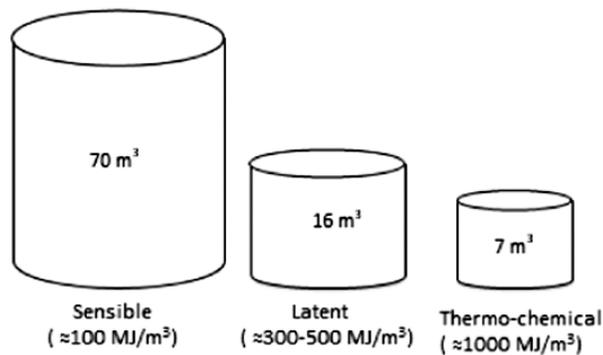
#### 2.2.1.2. Sensible Heat Storage

*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).

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m c_p \Delta T = m c_{ap} (T_f - T_i) = \rho V c_{ap} (T_f - T_i) \quad (2.2)$$

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 2.1. Volume dari *storage* untuk penyimpanan (1800 kWh)

(Levevre dan Tezel, 2017)

### 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°C. Sehingga air tidak dapat maksimal digunakan untuk penyimpanan panas yang biasanya suhu kerja di atas 0°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).

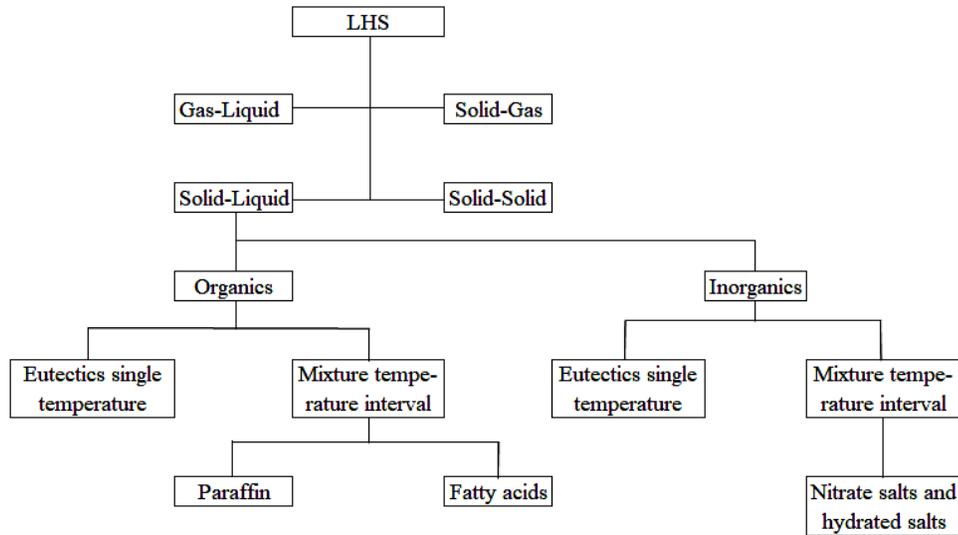
PCM mempunyai beberapa fungsi, salah satunya pada bangunan yaitu sistem pemanas di bawah lantai untuk menyimpan panas dan mendukung pengaturan suhu ruangan. Fungsi lainnya yaitu sebagai pemanas air tenaga surya (PATS), dimana PCM digunakan untuk menyimpan panas secara efisien (Hasenöhrl, 2009). Material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

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

Tabel 2.1. 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 tinggi	Tidak terjadi <i>supercooling</i> ketika dingin	Tidak beracun, mudah terbakar dan meledak	
		Cocok dengan kapsul	

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.



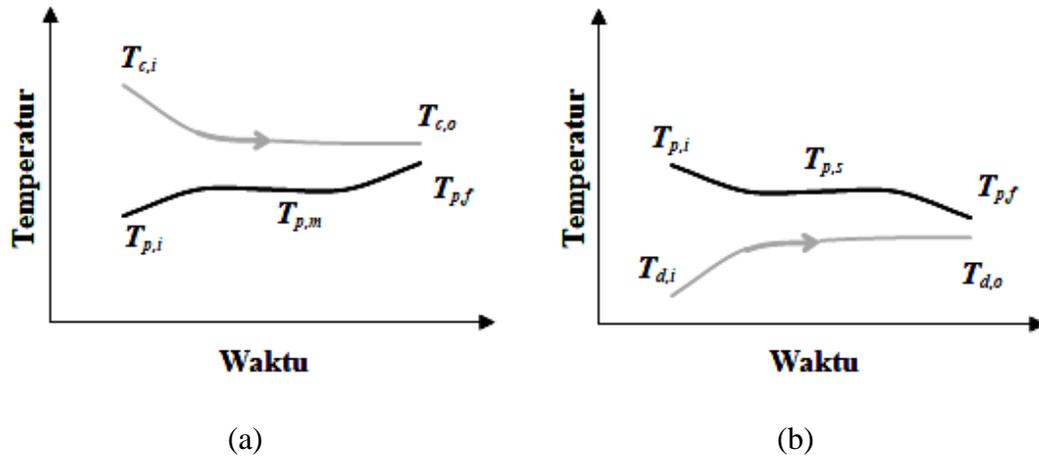
Gambar 2.2. Klasifikasi PCM (Gil dkk, 2010)

### 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 2.3. Grafik temperatur pada LHS (a) *charging* (b) *discharging*