

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

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 tentang penyimpanan energi perubahan fasa dilakukan oleh Farid, M dkk (2004). *Latent heat storage* (LHS) adalah salah satu cara yang paling efisien untuk menyimpan energi panas. Metode LHS memberikan kepadatan penyimpanan yang tinggi, dengan perbedaan suhu yang lebih kecil antara menyimpan dan melepaskan panas. Terdapat beberapa contoh material perubahan fasa (PCM) yang meleleh dan mengeras pada berbagai suhu yakni *paraffin* dan garam terhidrasi. *Paraffin* memiliki kepadatan penyimpanan energi termal sedang dan konduktivitas termal yang rendah, sedangkan garam terhidrasi memiliki kepadatan penyimpanan energi dan konduktivitas termal yang lebih tinggi.

Nadjib Dkk, (2015) melakukan studi ekperimental penyimpanan energi termal pada tangki pemanas air tenaga surya yang berisi PCM dengan Serbuk Cu tanki pemanas air tenaga surya yang di dalamnya berisikan *phase change material* yang berupa *paraffin wax* dimasukkan dalam sekumpulan kapsul berbentuk silinder yang susunanya horisontal segaris. Kolektor sebagai sumber kalor bersama tanki dihadapkan ke matahari saat proses *charging*/pemanasan.

Kemudian temperatur HTF dan PCM diamati selama proses *charging*. Dari hasil data temperatur dapat diketahui kapasitas energi penyimpanan di dalam tanki.

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 tanki. Isolasi dalam tanki perlu mendapat perhatian agar rugi-rugi termal ke lingkungan dapat diminimalisir.

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 tanki TES (*thermal energy storage*) yang dipasang secara horizontal disisi atas kolektor. Tanki 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 numerik untuk mengetahui cara mengatasi kekurangan dari *Solar Water Heater* (SWH) pernah dilakukan Jufrizal dkk (2015) yaitu dengan memakai *Thermal Energy Storage* (TES) dengan berisi *paraffin wax*. Proses *discharging* ini menggunakan model plat datar yang didalamnya terdapat TES dengan sumber panas yang berasal 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 dari *paraffin wax* ditransfer ke air sehingga air menyerap kalor dan menyebabkan *paraffin wax* berubah dari fasa cair menjadi fasa beku.

Ilmi, A dkk (2014) telah melakukan penelitian tentang perancangan *thermal energy storage* pada kolektor surya berbentuk tabung silinder. Model kolektor surya pada perancangan ini adalah menggunakan jenis *batch*. Komponen utama dari kolektor surya ini adalah kaca penutup, TES, isolasi, dan rangka. Jenis kaca

yang digunakan memiliki nilai konduktivitas thermal sebesar 1,3 W/m.K. Dengan ukuran kaca 1,3 x 0,7 m. Perancangan wadah TES ini mempertimbangkan konduktivitas material dan faktor korosif maka bahan yang sesuai digunakan adalah alumunium dengan tebal 1 dan wadah berbentuk tabung silinder dengan volume 0.03m^3 , diameter tabung 22cm serta tinggi tabung 0,8m. Perancangan isolasi dan rangka terdiri dari 3 lapisan yaitu, alumunium, *glasswool*, dan alumunium. Material ini berfungsi supaya laju perpindahan panas dari ruang kolektor tidak keluar ke lingkungan

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

Penelitian yang dilakukan Al-Kayiem (2016) adalah dengan penambahan *nano material* tetapi hanya dengan campuran Cu atau tembaga. Pada penelitian ini *nano material* Cu pada *paraffin wax* sebagai PCM, bertujuan untuk menaikkan nilai konduktivitas termal yang digunakan tangki TES. *Nano material* 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 fraksiter besar. Penambahan Cu juga mempengaruhi tingkat efisiensi suatu PCM dan ketika pengujian fraksi 1% mengalami kenaikan efisiensi sebesar 1.7%.

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 di dalam 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 dari pada *discharging*, kecepatan *charging* dan *discharging* akan lebih cepat jika menggunakan kapsul yang lebih kecil, dan apa

bila 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.

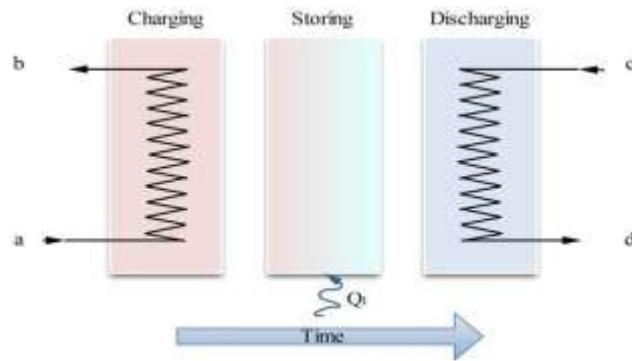
Penelitian tentang pemanas air tenaga surya yang dilakukan oleh Sharif dkk (2015) yaitu penelitian yang menggunakan PCM jenis *paraffin wax*. *Paraffin wax* ini dimasukan kedalam kapsul atau pipa berbahan tembaga berdiameter 80 mm. PCM akan dipasang dan dibandingkan pemakaiannya pada PATS dengan *Integrated Collector Storage* (ICS). Hasil dari penelitian ini adalah PATS memiliki efisiensi rata-rata yang lebih tinggi dari *integrated collector storage*. PATS akan mendapatkan hasil yang maksimal jika material PCM yang digunakan memiliki *melting point* yang tidak jauh berbeda dengan unjuk kerja alat.

2.2. Landasan Teori

2.2.1. Thermal Energy Storage

Thermal Energy Storage (TES) didefinisikan sebagai alat penyimpanan sementara energi termal dalam bentuk zat panas atau pun dingin. Kebutuhan energi dapat bervariasi pada kebutuhan harian, mingguan ataupun musiman. Dengan kebutuhan yang bervariasi ini sistem TES dapat menjadi solusi karena dapat mengatasi sistem ini dapat menyimpan energi dan mengeluarkan pada saat waktu yang dibutuhkan. Sistem TES memiliki potensi untuk meningkatkan penggunaan peralatan energi termal secara efektif. Pemilihan sistem TES bergantung pada banyak faktor termasuk durasi penyimpanan, ekonomi, persyaratan suhu dari energi, kapasitas penyimpanan, dan ruang yang tersedia, (Socaciu, 2012).

Keseluruhan sistem TES yang lengkap meliputi 3 Proses: *Charging*, *Storing*, dan *Discharging*. Dalam beberapa kasus, langkah-langkah dari proses ini dapat terjadi secara bersamaan (misalnya pengisian dibarengi dengan penyimpanan) dan setiap langkah dapat terjadi lebih dari satu kali dalam setiap siklus penyimpanan.

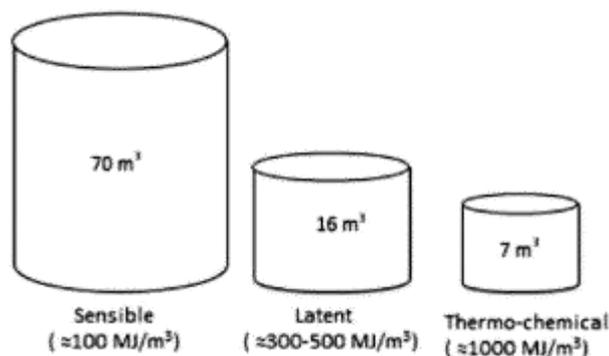


Gambar 2.1 Tiga Proses Dalam sistem TES

Pada Gambar 2.1 diilustrasikan siklus penyimpanan sederhana dimana ada 3 proses. Dimana Panas Q_1 akan masuk dan bernilai positif. Jika Panas akan dikeluarkan maka Q_1 akan negatif. Keseluruhan dari sistem TES ini dapat dikelompokkan menjadi 3 macam, yaitu *sensible heat storage (SHS)*, *Latent Heat Storage (LHS)*, dan *thermo-chemical storage*.

2.2.1.1. Sensibel Heat Storage

Sensibel heat storage (SHS) merupakan salah satu metode dari TES yang menggunakan dua macam media penyimpanan panas yaitu padat dan cair. Contoh pada media padat adalah logam sedangkan pada media cair dapat seperti air, minyak dan *molten salts*. Sistem ini memiliki kelebihan yang signifikan pada segi pembuatannya yang relatif murah dan mudah didapat. Namun sistem ini juga memiliki kekurangan yaitu mempunyai *heat loss* yang besar serta densitas yang rendah diantara sistem TES yang lain. Perbandingan dari segi energi serta ukuran dapat dilihat pada gambar 2.2 Lefebvre dkk, (2017).



Gambar 2.2 Perbandingan dari volume yang dibutuhkan untuk menyimpan energi tahunan pada rumah hemat energi (1800 kWh).

Total dari energi pada sistem SHS ini dapat dicari dengan rumus persamaan 2.1 sharma, (2009)

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

Dengan,

- temperatur awal (T_i) dalam satuan °C
- temperatur akhir (T_f) dalam satuan °C
- massa material penyimpan (m) dalam satuan kg
- massa jenis (ρ) dalam satuan kg/m^3
- kalor jenis rata-rata material penyimpanan saat proses (C_{ap}) dalam satuan ($\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)
- volume material (V) dalam satuan m^3 .

2.2.1.2. Latent Heat Storage

Latent Heat Storage adalah salah satu bentuk aplikasi sistem TES yang menyimpan energi dalam bentuk energi latent. *Phase Change Material* (PCM) merupakan bahan penyimpanan panas laten. Ketika suhu naik maka ikatan dalam PCM terpecah yang mengubah material menjadi berubah fasa dari padat menjadi cair (seperti halnya PCM padat-cair). Perubahan fase sendiri adalah proses *endotermik* yang menyebabkan PCM itu akan menyerap panas. Panas yang disimpan selama proses peleburan ini dinamakan panas laten *Medved dkk*, (2010). *Latent heat storage* ini memiliki dua keunggulan utama, yaitu :

- a) Dapat menyimpan panas yang besar dengan perubahan suhu yang kecil dan karenanya memiliki kepadatan penyimpanan yang tinggi.
- b) Karena perubahan fasa pada suhu konstan membutuhkan waktu untuk selesai, hal ini dapat untuk menghaluskan variasi suhu.

2.2.2 Phase Change Material

Perbedaan paling esensial antara PCM dan media penyimpanan panas konvensional seperti air atau batu adalah jarak suhu kerja dari titik leleh. Pada dasarnya, air merupakan PCM. Contohnya adalah penggunaan es dalam mengawetkan makanan. Namun, karena titik leleh air adalah 0°C , sehingga tidak memungkinkan untuk digunakan sebagai PCM untuk aplikasi penyimpanan panas

dimana kisaran suhu kerja yang baik di atas 0 °C. Kasus di atas merupakan contoh sehari hari yang menunjukkan seberapa banyak panas mampu diserap dalam perubahan fasa, peleburan es ke air membutuhkan energi yang sama seperti pemanasan air yang dari 0 ke 80 derajat Hasenohrl, (2009)

Material suatu PCM dikatakan baik sebagai media penyimpanan panas apa bila memiliki kalor laten yang tinggi. PCM sendiri memiliki beberapa fungsi salah satunya yaitu digunakan pada pengaturan suhu ruangan yang dimana PCM tersebut berfungsi sebagai sistem pemanas dibawah lantai. Fungsi lainnya yaitu sebagai pemanas air tenaga surya (PATS), PCM berfungsi sebagai media penyimpanan panas yang efektif dalam alat tersebut. Material PCM yang digunakan untuk PATS pada umumnya yaitu *paraffin wax*, karena mempunyai sifat densitas yang tinggi (~ 200 kJ/kg), konduktivitas termalnya rendah (~ 0,2 W/m.°C) dan sifat termalnya stabil di bawah 500 °C (Nadjib dkk, 2015). PCM dapat dikelompokkan menjadi 4 kategori yang dapat dilihat pada tabel 2.1 berikut :

Tabel 2.1 Grup dari Phase Change Material Regin dkk, (2007)

Zat Organik	Zat An-organik	Asam Lemak	Komersial
Paraffin C ₁₃	Mn(NO ₃) ₂	Capric-lauric acid (45-55%)	RT25
1-Dodecanol	CaCl ₂ 6H ₂ O	34% Mistiric acid + 66% Capric	STL27
Paraffin C ₁₈	LiNO ₃ 3H ₂ O	Vinyl stearate	S27
1-Tetradecanol	Na ₂ SO ₄ 10H ₂ O	Capric acid	RT30
Paraffin C ₁₆₋₂₈	Na ₂ CO ₃ 10H ₂ O	Lauric acid	TH29
Paraffin wax	CaBr ₂ 6H ₂ O	Myristic acid	RT40
	Na ₂ HPO ₄	Palmitic acid	RT50
	Zn(NO ₃) ₂ 6H ₂ O	Stearic acid	TH58
	K ₃ PO ₄ 7H ₂ O		RT65
	Zn(NO ₃) ₂ 4H ₂ O		
	Na ₂ HPO ₄ 7H ₂ O		
	Na ₂ S ₂ O ₃ 5H ₂ O		
	Zn(NO ₃) ₂ 2H ₂ O		

Material yang dapat dikategorikan sebagai PCM apa bila memiliki karakteristik yang bisa dilihat pada tabel 2.2 berikut.

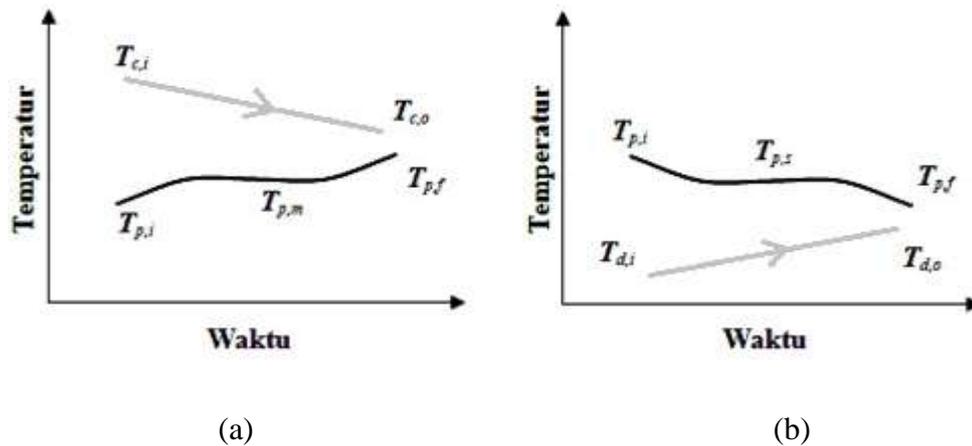
Tabel 2.2 Karakteristik utama yang diinginkan dari PCM

Sifat termal	Sifat fisis	Sifat kimia	Faktor ekonomi
Temperaturuf perubahan fase dari material sesuai temp kerja	Kerapatan material tinggi	Memiliki sifat kimia yang stabil	Tersedia banyak
Memiliki <i>laten heat</i> dan <i>spesific 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	

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 temperature 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) proses charging (b) proses discharging

2.2.4 Solar Water Heater

Pemanas air tenaga surya adalah sebagai sistem perpindahan panas yang menghasilkan energi panas dengan memanfaatkan radiasi sinar matahari sebagai sumber energi utama. Ketika cahaya matahari menimpa alat pada pemanas air tenaga surya, sebagian cahaya akan dipantulkan kembali ke lingkungan, sedangkan sebagian besarnya akan diserap dan dikonversi menjadi energi panas, lalu panas tersebut dipindahkan kepada fluida yang bersirkulasi di dalam pipa pemanas air. Dwivedi (2009).

Pemanas air tenaga surya menggunakan energi matahari sebagai sumber pemanasnya. Kelebihan jenis ini adalah energi yang dipakai dapat diambil dari alam dan ramah lingkungan. Namun pemanas air tenaga surya memiliki beberapa kekurangan seperti harga pemanas air yang mahal, pemasangan pemanas air yang tergolong rumit dan sulit karna dipasang diatas genteng. Serta penggunaanya sangat bergantung pada kondisi cuaca dan kapasitas air juga terbatas. Pemanas air tenaga surya dapat didefinisikan sebagai sistem perpindahan panas yang menghasilkan energi panas dengan memanfaatkan radiasi sinar matahari sebagai sumber energi utama. Ketika cahaya matahari menimpa pemanas air tenaga surya, sebagian cahaya akan dipantulkan kembali ke lingkungan, sedangkan sebagian besarnya akan diserap dan dikonversi menjadi energi panas, lalu panas tersebut dipindahkan kepada fluida yang bersirkulasi di dalam pipa - pipa pemanas air.

2.2.5. Tembaga

Tembaga (Cu) merupakan salah satu logam berat yang banyak digunakan dalam suatu industri, terutama pada industri rumah tangga. Keberadaan unsur tembaga di alam dapat ditemukan dalam bentuk logam bebas, akan tetapi lebih banyak ditemukan dalam bentuk persenyawaan. Cu termasuk ke dalam kelompok logam *essensial*, dimana dalam kadar yang rendah dibutuhkan oleh organisme sebagai *koenzim* dalam proses metabolisme tubuh, sifat racunnya baru muncul dalam kadar yang tinggi Rochayatun,dkk (2006).

2.2.6. Paraffin Wax

Paraffin wax merupakan bahan yang terdiri dari campuran ikatan hidrokarbon yang mempunyai titik leleh sekitar 48 °C sampai 66 °C. *paraffin Wax* ini pertama kali diproduksi secara komersil pada tahun 1867. *Paraffin wax* didapat dari petroleum melalui *lubricating oli stocks*. Biasanya *paraffin wax* ini digunakan untuk lilin, kertas *wax*, *cosmetic*, *saliva check buffer*, dan isolasi elektrik. *Paraffin wax* juga dapat ditambahkan parfum dari ekstrak bunga untuk obat salep dan juga untuk melapisi bahan kayu sebagai *waterproof*. *Paraffin wax* juga bisa digunakan untuk merangsang laju aliran saliva.

Paraffin wax sebagai salah satu jenis penyimpan kalor laten memiliki karakteristik seperti: harganya murah, densitas energinya cukup tinggi (~ 200 kJ/kg), dan konduktivitas termalnya rendah (~ 0,2 W/m.°C) (Farid et al., 2004); temperatur leleh beberapa produk *paraffin wax* bervariasi antara 8 sampai 106 °C (Kenisarin dan Mahkamov, 2007); tidak berbahaya dan tidak reaktif (Sharma dan Sagara, 2005); sifat termalnya stabil di bawah 500 °C (Sharma et al., 2009). Berdasarkan uraian di atas maka *paraffin wax* memungkinkan diaplikasikan pada PATS konvensional. Untuk itu perlu dikaji secara eksperimental sejauh mana kemampuan penyimpanan energi termal sistem PATS tipe *thermosyphon* yang mengintegrasikan air dan *paraffin wax* sebagai material penyimpan kalor, khususnya selama proses *charging*.

2.2.7. Perpindahan Kalor

2.2.7.1. Perpindahan Kalor Konveksi

Perpindahan panas konveksi adalah proses perpindahan dimana cairan atau gas yang suhunya tinggi mengalir ke tempat yang suhunya lebih rendah, memberikan panas pada permukaan yang suhunya lebih rendah. Perpindahan panas terjadi antara permukaan padat dengan fluida yang mengalir di sekitarnya. Jadi perpindahan panas ini memerlukan media penghantar berupa fluida (cairan atau gas). Perpindahan panas secara konveksi terjadi melalui 2 cara yaitu konveksi alami dan konveksi paksa.