

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

2.1.1. Pemanas Air Tenaga Surya (PATS)

Sharma dan Chen (2009) melakukan percobaan pada sistem pemanas air domestik dengan menggunakan tangki berkapasitas 150 liter. Peneliti menyebutkan bahwa hasil percobaan saat pendinginan, rata-rata suhu air di dalam tangki turun di bawah pencairan PCM. Selama percobaan pemanasan ulang, PCM dapat meningkatkan suhu 14-36 liter air di bagian atas tangki. Efek ini terjadi dalam 10-15 menit. Asam stearat memberikan hasil terbaik untuk termal peningkatan kinerja tangki dengan efisiensi sebesar 74%.

Studi eksperimental dan perhitungan tentang aplikasi PCM pada sistem pemanas air domestik telah dilakukan oleh Sharif dkk (2015). Pada pengujian ini, peneliti menggunakan berbagai jenis PCM, bentuk dan bahan kapsul yang digunakan untuk membungkus PCM. Salah satu PCM yang digunakan adalah *paraffin wax* dengan kapsul *high density polyethylene* berbentuk bola. PCM ini dipasang pada *integrated collector storage* (ICS) dan PATS konvensional. Peneliti mendapatkan hasil bahwa efisiensi rata-rata dari *integrated collector storage* lebih rendah dari konvensional PATS. Selain itu, peneliti juga mengungkapkan bahwa pemilihan material PCM dengan *specific melting point* yang hampir sama dengan unjuk kerja alat akan sangat membantu dalam sistem PATS ini untuk mendapatkan hasil yang maksimal.

2.1.2. PCM sebagai Material Penyimpan Energi Termal

Bouadila dkk (2014) mengatakan bahwa salah satu bentuk penyimpanan energi panas yang dihasilkan dari PATS yaitu dengan menggunakan penyimpanan panas laten dalam *phase change material* (PCM). PCM memiliki keuntungan untuk bekerja dalam penurunan suhu yang kecil dan tekanan uap yang rendah. Beberapa

karakteristik diperlukan dalam pemilihan PCM seperti stabilitas kimia, tidak korosif, dan murah. Peran PCM adalah menyimpan energi ekstra sebagai panas laten selama pencairan PCM. Berdasarkan hasil eksperimental peneliti menyebutkan bahwa, suhu outlet tidak terpengaruh oleh fluktuasi radiasi matahari secara global yang signifikan. Peneliti menggunakan metode numerik *solid-liquid* dari model PCM digunakan untuk mengevaluasi fraksi volume leleh PCM, *liquid-solid interfaces*, suhu PCM dan aliran *melting/solidification* di rongga berisi PCM.

Berdasarkan hasil penelitian terhadap 2 tipe LHS sebagai PCM, Khan dkk (2016) menyatakan bahwa setelah berkali-kali melakukan *thermal cycles* atau *melting-cooling*, *paraffin wax* mempunyai *properties* yang tidak berubah. Di sisi lain, *salt hydrates* mengalami fase *segregation* dan *supercooling*. Berdasarkan hasil tersebut, peneliti menyimpulkan bahwa *paraffin wax* mempunyai *thermal* dan *chemical stability* yang lebih baik daripada *salt hydrates*.

Metode pengembangan untuk mengatasi kelemahan pada *solar water heater* (SWH) antara lain dengan penambahan *termal energy storage* (TES). Kemampuan TES di dalam kolektor surya plat datar diuji dengan jenis material berubah fasa yang digunakan adalah *paraffin wax* sebanyak 19,5 kg. Hasil pengujian pada proses *charging* dapat disimpulkan bahwa massa parafin *wax* yang melebur mencapai 18,81 kg dan efisiensi termal tertinggi 44,28%. Sedangkan pada proses *discharging* volume air panas terbanyak diperoleh 40 liter untuk temperatur minimum 35°C dan efisiensi termal tertinggi adalah 46,81% (Jufrizal dkk, 2014).

Pengujian eksperimental dilakukan oleh Nadjib dkk (2015) untuk mengetahui kapasitas penyimpanan energi termal pada sistem PATS yang di dalamnya berisi PCM. Pada pengujian ini, peneliti menggunakan *paraffin wax* sebagai PCM yang diintegrasikan dengan air sebagai HTF di dalam tangki PATS. Berdasarkan hasil pengujian menunjukkan bahwa tangki dengan volume 31,37 liter dapat menyimpan kapasitas total 4,8 MJ selama waktu *charging* 340 menit. Penggunaan PCM dapat berkontribusi sebesar 44,28% dari kapasitas penyimpanan energi termal total PATS. Hal ini terjadi karena *heat loss* selama proses *charging* yang menyebabkan hanya 3,97 MJ energi yang dapat tersimpan dalam pengujian

ini. Oleh sebab itu, perlu diperhatikan untuk desain sistem agar dapat meminimalisir *heat loss* terutama pada bagian isolasi PATS.

2.1.3. Karakteristik PCM

Pengkajian eksperimental tentang penyimpanan energi termal dengan menggunakan kapsul PCM berbentuk bola dilakukan oleh Bellan dkk (2014). Pada uji eksperimental ini, peneliti menggunakan sodium nitrat sebagai PCM dan minyak sintetik temperatur tinggi (*Therminol 66*) sebagai HTF. Aliran dari HTF dianggap simetris dengan sumbu axis sehingga aliran di dalam tangki dianggap hanya 2 dimensi. Peneliti menyimpulkan bahwa (1) waktu yang diperlukan PCM dalam proses *charging* lebih cepat daripada *discharging*, (2) kecepatan *charging* dan *discharging* akan lebih cepat jika menggunakan kapsul yang lebih kecil, (3) apabila *stefan number* (*St*) meningkat maka *Constant Melt Temperature Zone* (CMTZ) dan *Heat Exchange Zone* (HEZ) akan menurun. Hal ini dapat meningkatkan waktu yang diperlukan dalam *discharging* dan penggunaan total.

Berdasarkan hasil eksperimental yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik dari LHS pada tahap perubahan fase dari *solid* menjadi *liquid* dan sebaliknya Murray dan Groulx (2014), menyatakan bahwa efek konveksi natural yang signifikan selama proses *melting* dan *melted* dalam proses *charging*. Namun, hasil konveksi natural sangat kecil sehingga dapat diabaikan selama *solidification*. Peneliti juga menyebutkan untuk mengurangi waktu *charging* dan *discharging*, area permukaan yang lebih besar disarankan untuk *heat transfer* antara PCM dan HTF. Penggunaan pipa untuk membungkus HTF atau penggunaan banyak pipa dapat dilakukan. Keakuratan hasil penentuan jumlah total energi yang tersimpan dalam sistem selama *charging* diverifikasi dengan membandingkannya dengan kapasitas penyimpanan energi teoritis yang diharapkan dari sistem.

Penelitian tentang karakteristik *solar heat storage* pada proses *discharging* menggunakan kapsul-kapsul berbentuk bola dilakukan oleh Shuangmao dkk (2011). Peneliti menyebutkan bahwa kapsul-kapsul tersebut ditempatkan pada sebuah *packed bed*. Pada penelitian ini *paraffin* digunakan sebagai PCM dan air digunakan sebagai HTF. Peneliti menyatakan bahwa (1) pada *solar heat storage*

laju perpindahan kalor sangat cepat dan akan terus menurun ketika mendekati *liquid cooling stage*. Laju perpindahan kalor akan stabil pada *solidification cooling stage* sampai pada *solid cooling stage*. (2) Waktu yang diperlukan hingga mencapai *solid cooling stage* akan berkurang apabila laju aliran HTF ditingkatkan. Akan tetapi, hal ini tidak berlaku apabila laju aliran HTF melebihi 13 kg/menit. (3) jika dibandingkan dengan temperatur *inlet* HTF dan laju aliran, rembesan pada *packed bed* tidak terlalu berpengaruh.

2.1.4. *Solar Simulator* sebagai *Source of Energy*

Tinggi fluks pada *solar simulator* kali ini menggunakan *xenon arc* 7 kW *short focal length* diimprovisasi dengan potongan reflektor elips sebagai sumber cahaya. Pemetaan fluks digunakan untuk mengevaluasi kinerja fluks berdasarkan distribusi fluks, ketidakstabilan sementara, ketidakmerataan sebagian, puncak fluks, efisiensi konversi dan daya yang masuk pada *focal plane*. Arus *input* berkisar antara 113–153 A untuk memastikan ukuran puncak fluks minimum dan maksimum *output per-power setting* dari *solar simulator*. Alat ukur fluks dengan literatur yang sesuai telah diujicoba dan menghasilkan fluks optimal 491,46 kW m⁻² / mV per satuan lampu. Hal ini telah diuji coba kembali pada arus 153 A menghasilkan puncak fluks sebesar 3583 kW m⁻² secara keseluruhan. Kemudian, nilai ketidakstabilan sementara diperoleh kurang dari 3% dimana cahaya kumulatif sebesar 1,642 kW pada target radius lingkaran 110 mm pada *focal plane*. Sedangkan efisiensi konversi diperoleh nilai 47% pada 153 A dan radius lingkaran 110 mm. Hasil fluks rata-rata yang diperoleh menjadikan observasi ini dikategorikan pada *solar simulator* kelas A, sedangkan ketidakmerataan sebagiannya dikategorikan kelas B. Puncak fluks dapat menyentuh angka berkisar 2074–3583 kW m⁻² dimana temperatur stabil pada 1857 K (Sarwar dkk, 2013).

Samiudin dkk (2013) pada penelitiannya menggunakan *tungsten halogen* untuk aplikasi *solar simulator* dengan variasi intensitas radiasi 400 W/m², 600 W/m², 700 W/m², dan 900 W/m² dengan jumlah yang digunakan sebanyak 17 lampu. Masing-masing *tungsten halogen* memiliki intensitas radiasi 56 W/m²

dengan jarak lampu dan PV sejauh 1,6 meter. Pada tegangan dan arus masing-masing 240 V dan 11 A dilakukan ujicoba untuk mendapatkan nilai *heatloss* hasil iradiasi dan persentase ketidak-merataan yang diterima PV. Nilai *heatloss* tertinggi dan terendah masing-masing adalah $35,7 \text{ W/m}^2$ pada intensitas radiasi 900 W/m^2 dan 2 W/m^2 pada intensitas radiasi 400 W/m^2 . Sedangkan untuk nilai ketidak merataan tertinggi dan terendah masing-masing adalah 7% pada intensitas radiasi 400 W/m^2 dan 5% pada intensitas radiasi 900 W/m^2 .

Berdasarkan tinjauan pustaka di atas disebutkan bahwa penelitian sebelumnya tentang PATS sistem aktif secara *outdoor* umumnya dilakukan selama proses *charging* dan *discharging*. Hasilnya peneliti menyebutkan bahwa *heat flux* yang didapatkan berfluktuatif. Kekurangan pada penelitian yang telah dilakukan tersebut perlu diperoleh informasi tentang perilaku termal untuk memprediksi kandungan energi termal selama proses *charging* (pemanasan). Oleh karena itu, penelitian ini penting dilakukan untuk mengetahui karakteristik termal pada tangki PATS sistem aktif menggunakan *heat flux* konstan selama proses *charging* dengan metode *indoor*.

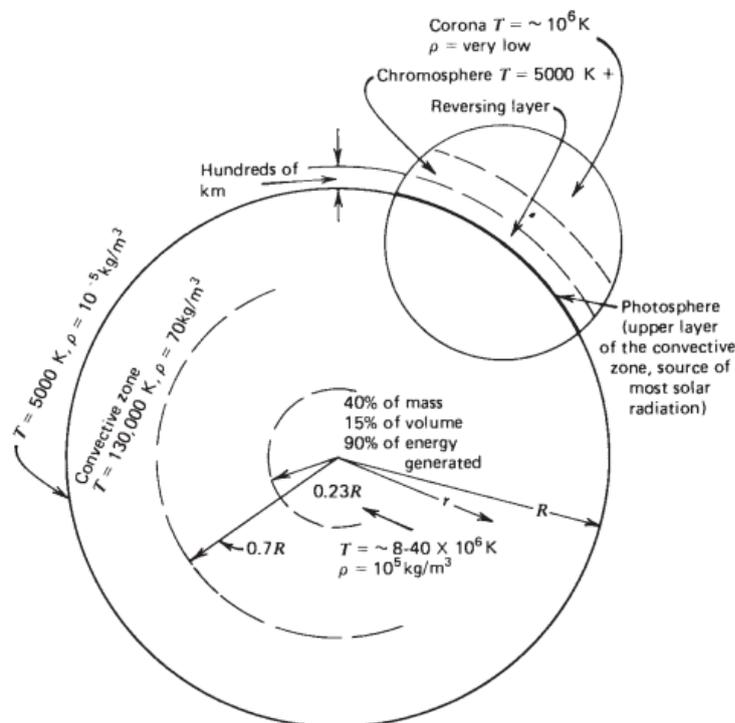
2.2 Landasan Teori

2.2.1. Energi matahari

Matahari adalah bola materi gas yang sangat panas dengan diameter $1,39 \times 10^9 \text{ m}$ dan memiliki temperatur *blackbody* efektif 5777 K. Suhu di daerah pusat matahari diperkirakan 8×10^6 hingga $40 \times 10^6 \text{ K}$ dan kerapatan diperkirakan sekitar 100 kali dari air. Matahari terbentuk karena adanya reaksi fusi yang terjadi terus-menerus dari bermacam-macam gas dan tertahan oleh gaya gravitasi sehingga terlihat seperti bola api. Salah satu reaksi yang terjadi dan merupakan reaksi yang penting dalam pembentukan matahari adalah reaksi hidrogen untuk membentuk helium. Dalam reaksi ini, massa dari *helium nucleus* kurang dari 4 proton yang dimiliki oleh hidrogen sehingga mengakibatkan sisa dari reaksi tersebut terkonversi menjadi energi. Energi yang dihasilkan di interior bola matahari ditransfer ke permukaan dan kemudian diradiasikan. Melalui proses radiasi dan konvektif terjadi

dengan emisi berturut-turut (Duffie dan Beckman, 2013). Skema struktur dari matahari disajikan pada Gambar 2.1.

Matahari menyinarakan beberapa unsur klimatologi sebagai kekuatan matahari yang melebihi 120 W/m^2 . Matahari memancarkan energinya dalam bentuk radiasi dengan rentang panjang gelombang yang sangat lebar. Para ilmuwan mengelompokkannya menjadi 3 pita gelombang, di antaranya adalah pita gelombang ultraviolet, infra merah, dan cahaya tampak. Selain dikelompokkan berdasarkan gelombangnya, cahaya matahari juga dikelompokkan menjadi *direct radiation* dan *diffuse radiation*. *Direct radiation* merupakan radiasi yang langsung ke permukaan bumi, sedangkan *diffuse radiation* adalah radiasi yang berasal dari hamburan atmosfer. Radiasi yang tiba di permukaan bumi berbeda-beda di setiap tempat. Insolasi merupakan radiasi matahari yang tiba di permukaan bumi per satuan luas dan waktu. Fluktuasi lama penyinaran akan semakin besar seiring bertambah jauh jarak dari garis ekuator (Hamdi, 2014).



Gambar 2.1. Skema struktur matahari (Duffie dan Beckman, 2013)

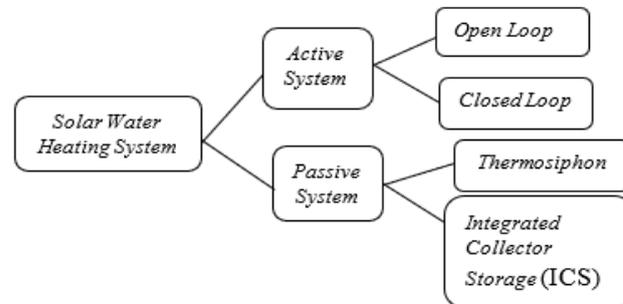
2.2.2. Sistem Pemanas Air Tenaga Surya

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, untuk menunjang prinsip kerja sistem PATS dengan *additional heaters* dibangun atas 4 komponen utama, yaitu kolektor, tangki, aksesoris dan pemanas tambahan. Pemanas tambahan digunakan karena energi matahari yang diserap kolektor tidak dapat memanaskan air sesuai kebutuhan. Selain itu, ada beberapa komponen aksesoris yang digunakan antara lain adalah sebagai berikut.

- 1) Elemen pengikat berfungsi agar tangki dan kolektor tetap padaudukannya.
- 2) Katup pengaman tekanan berfungsi untuk melindungi sistem agar tetap bekerja pada tekanan yang diijinkan.
- 3) Pipa-pipa penghubung yang berfungsi sebagai penghubung antar kolektor surya dan penghubung antara tangki dengan kolektor (*down pipe* dan *raiser pipe*) serta penyambung pipa agar pipa-pipa penghubung dapat tersambung ke kolektor surya ataupun tangki. (SNI 3021, 1992).

Gambar 2.2. memberikan informasi bahwa pengkajian dan pengkategorian dalam aplikasi energi matahari pada sistem pemanas air terbagi menjadi dua, yaitu pasif dan aktif sistem. Salah satu jenis sistem pasif adalah sistem *thermosyphon*. Keunggulan dari sistem ini adalah tidak diperlukannya *mechanical devices* untuk mengalirkan air akibat adanya konveksi natural yang terjadi dan tidak memerlukan terlalu banyak *maintenance*. Di lain sisi, terdapat sistem yang hampir sama dengan sistem *thermosyphon* yaitu ICS. ICS memiliki konstruksi yang hampir sama dengan *thermosyphon*, hanya saja pada ICS, *collector* dan tangki menjadi satu bagian. Oleh karena itu, ICS memiliki biaya konstruksi yang lebih murah jika dibandingkan dengan *thermosyphon*. Akan tetapi, *heat loss* yang terjadi pada sistem ICS lebih tinggi pada malam hari. Sedangkan keunggulan dari aktif sistem adalah diperlukannya *mechanical devices* untuk mengalirkan air sehingga proses sirkulasi

air pada sistem aktif dapat berjalan lebih cepat dari pada sistem pasif (Jamar dkk, 2016).

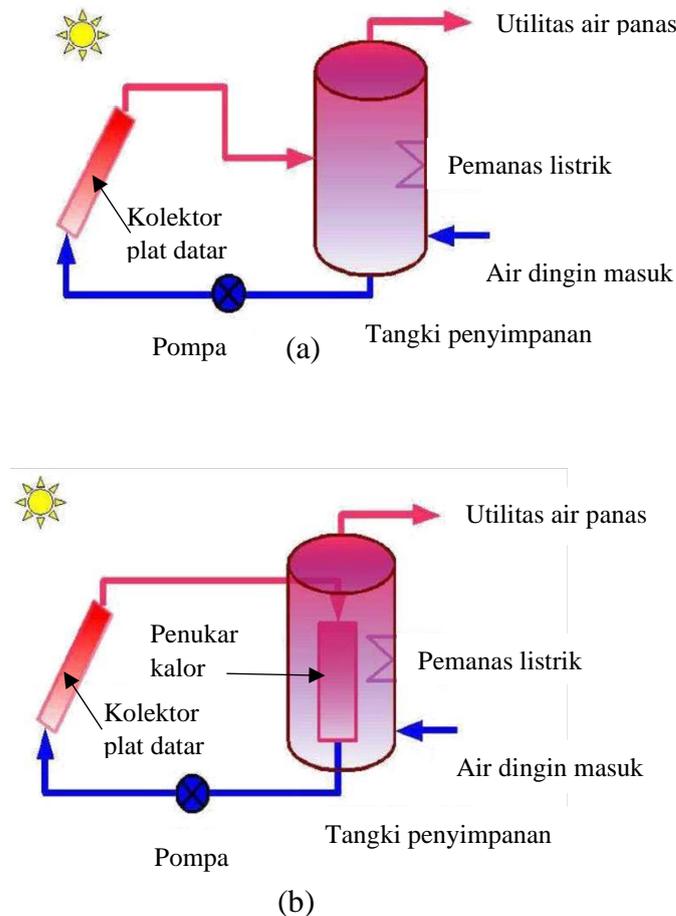


Gambar 2.2. Sistem PATS (Jamar dkk, 2016)

2.2.2.1. PATS Sistem Aktif

Jamar dkk (2016) menyebutkan pada hasil tinjauan sistem PATS bahwa ciri khusus dari sistem aktif adalah penggunaan pompa dan perangkat pengontrol otomatis untuk mengontrol sirkulasi energi termal pada HTF. Hal ini mendasari bahwa penggunaan sistem aktif pada PATS masih memerlukan energi listrik. Sistem aktif dapat dibagi lagi menjadi 2, yaitu sistem terbuka dan sistem tertutup yang dapat dilihat pada Gambar 2.3. Perbedaan dari keduanya hanya pada saat pendistribusiannya. Terlihat pada Gambar 2.3. saat pendistribusiannya sistem terbuka tidak memerlukan *heat exchanger*, sedangkan sistem tertutup masih memerlukan *heat exchanger*.

Sistem aktif menggunakan pompa listrik, pengontrol dan katup untuk mengalirkan air melalui kolektor. PATS sistem aktif menggunakan listrik untuk mentransfer energi panas melalui pompa. Termostatis diferensial digunakan untuk mengontrol sirkulasi air, ketika suhu air atas lebih tinggi dari suhu di dasar tangki. Katup cek diperlukan untuk mencegah sirkulasi air terbalik. Dibandingkan dengan sistem pasif, efisiensi sistem PATS aktif 35% dan 80% lebih dari sistem pasif yang dalam kisaran 30–50%. Keuntungan lain adalah bahwa kolektor sistem aktif dapat diletakkan jauh dari tangki. Akan tetapi, sistem aktif termasuk sistem yang lebih rumit sehingga tergantung kepada sistem pengoperasiannya. Hal tersebut dapat menjadi penyebab timbulnya biaya lebih tinggi dibandingkan sistem pasif (Wang dkk, 2015).



Gambar 2.3. PATS sistem aktif (a) Sistem terbuka, (b) Sistem tertutup (Dwivedi, 2009)

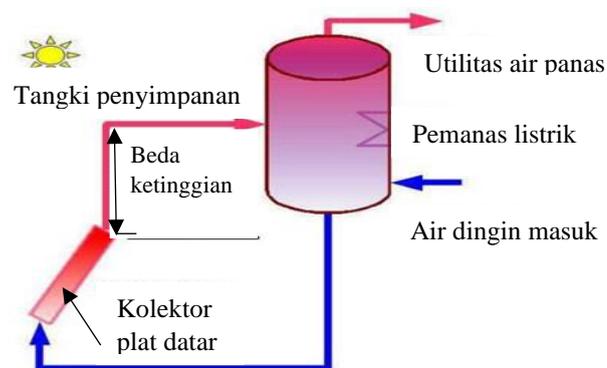
2.2.2.2. PATS Sistem Pasif

Sistem pasif adalah sistem PATS yang menggunakan konveksi natural sebagai penggerak HTF. Hal ini dapat terjadi karena pengurangan *fluid density* yang dipanaskan sehingga HTF di kolektor dapat naik ke dalam tangki dan HTF di tangki dapat turun ke kolektor. Sirkulasi ini akan terus berulang hingga tidak ada pemanasan yang terjadi di dalam kolektor. Keunggulan dari sistem pasif adalah tidak adanya instrumen pengontrol sirkulasi HTF sehingga tidak memerlukan perawatan yang rumit (Jamar dkk, 2016).

a. *Thermoshypon*

Sistem *thermoshypon* merupakan teknologi PATS yang banyak digunakan pada *Solar Domestic Heat Water* (SDHW). *Thermosyphoning* akan terjadi ketika

HTF di dalam tangki mengembang dikarenakan *density* yang mengecil akibat pemanasan sehingga mendorong HTF untuk naik ke dalam tangki. Selain dikarenakan HTF di dalam kolektor masuk ke dalam tangki sehingga mendorong HTF di dalam tangki untuk turun ke kolektor. *Thermosyphoning* akan terus berlanjut hingga temperatur HTF di dalam sistem sama. Meskipun begitu, untuk menghindari aliran terbalik yang kemungkinan terjadi pada malam hari, sebaiknya pemasangan tangki TES diletakkan cukup tinggi di atas kolektor surya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. (Dwivedi, 2009).



Gambar 2.4. Sistem *thermosyphon* dengan pemanas tambahan (Dwivedi, 2009)

b. *Integrated Collector Storage*

Integrated Collector Storage (ICS) merupakan contoh lain dari sistem pasif. Keunggulan dan ciri khusus dari sistem ICS yaitu kolektor dan TES yang menjadi satu bagian. Seddegh dkk (2015) mengatakan bahwa penggunaan teknologi ICS sangat menjanjikan pada kebutuhan domestik, pertanian, dan industrial karena harganya yang lebih ekonomis dibandingkan sistem PATS yang lain. Akan tetapi, insulasi yang tidak dapat dipasang pada seluruh bagian ICS mengakibatkan *heat loss* terjadi lebih cepat.

- | | |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> Durasi penyimpanan | <input type="checkbox"/> <i>Heat loss</i> |
| <input type="checkbox"/> Temperatur kerja sistem | <input type="checkbox"/> Ketersediaan tempat |
| <input type="checkbox"/> Kapasitas penyimpanan | <input type="checkbox"/> Ekonomis |

2.2.3. *Thermal Energy Storage*

Thermal Energy Storage (TES) merupakan sistem penyimpanan energi ramah lingkungan yang dapat menyimpan energi termal. Penggunaan *storage* berfungsi agar energi yang tersimpan dapat digunakan ketika diperlukan. Lefebvre dan Tezel (2017) membahas bahwa energi termal dapat tersimpan atau terlepas dalam TES karena adanya proses *cooling, heating, melting, solidifying, vaporizing* atau proses *thermo-chemical* yang lain di dalam sistem. Energi matahari merupakan salah satu bentuk energi termal. Energi matahari yang hanya memancarkan energinya pada siang hari sehingga membuat sistem TES menjadi sangat penting. Ada beberapa faktor penting yang diperhitungkan dalam penggunaan TES, antara lain :

TES dapat dikategorikan menjadi 3 jenis, yaitu *latent heat storage* (LHS), *sensible heat storage* (SHS), dan *thermo-chemical storage*. Pada aplikasinya, LHS dan SHS terjadi *heat loss* seiring dengan waktu hal ini kurang tepat jika digunakan sebagai penyimpan energi jangka panjang.

Menurut Nallusamy (2007), pada dasarnya ada tiga metode penyimpanan energi panas : *sensible, latent* dan *thermo-chemical heat storages*. Sistem *sensible heat storage* (SHS) merupakan teknologi sederhana dan dapat dikembangkan dengan baik, tetapi tidak efisien untuk penyimpanan energi karena kapasitas penyimpanan panas yang rendah. Sistem *latent heat storage* (LHS) menggunakan bahan perubahan fasa (PCM) sebagai media penyimpanan memiliki keuntungan seperti kapasitas penyimpanan panas tinggi dan ukuran unit kecil. Tetapi jenis sistem ini tidak digunakan secara komersial seperti sistem SHS karena tingkat transfer panas yang buruk selama penyimpanan panas.

2.2.3.1. *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 jenis, 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* seperti terlihat pada Gambar 2.5. Akibatnya SHS memerlukan *volume storage* yang besar. Selain itu, pada SHS terjadi *heat loss* yang sangat signifikan sebagai material penyimpan energi. Akibat rendahnya efisiensi pada proses penyimpanan, SHS tidak efektif digunakan sebagai teknologi penyimpanan energi panas. Besarnya energi yang tersimpan (dalam *Joule*) dapat dihitung dengan persamaan 2.1 berikut (Sharma, 2009).

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

dengan : T_f : temperatur akhir ($^{\circ}\text{C}$)

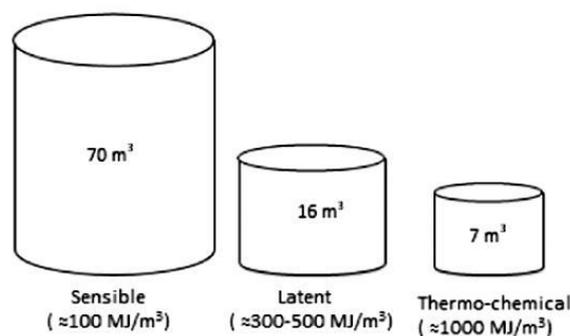
T_i : temperatur awal ($^{\circ}\text{C}$)

m : massa material penyimpan kalor (PCM) (kg)

C_{ap} : kalor jenis rata-rata material penyimpan saat proses ($\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)

ρ : massa jenis (kg/m^3)

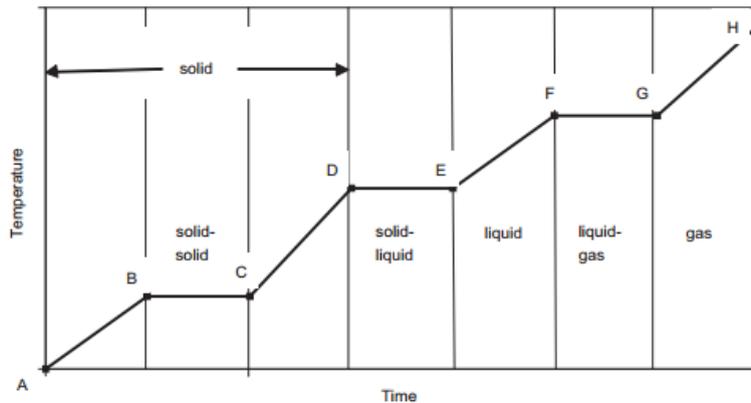
V : volume material (m^3)



Gambar 2.5. Volume dari *storage* yang dibutuhkan untuk menyimpan energi (1800 kWh) (Lefebvre dan Tezel, 2017)

2.2.3.2. Latent Heat Storage

Pada *latent heat storage* (LHS), perubahan fase dari material penyimpan energi merupakan tanda penyerapan atau pelepasan energi terjadi pada sistem ini. Pada umumnya, perubahan fase *liquid-solid* lebih banyak digunakan sebagai *energy storage* dibandingkan dengan fase *liquid-vapor* karena volume yang dibutuhkan dalam perubahan fase *liquid-solid* lebih sedikit. Tahapan perubahan fase pada suatu zat ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Diagram temperatur-waktu pada pemanasan suatu zat (Regin dkk, 2008)

2.2.3.3. *Thermo-Chemical Storage*

Thermo-chemical storage adalah salah satu teknologi baru dalam bidang penyimpanan energi termal. Pada prosesnya, *Thermo-chemical storage* menggunakan reaksi termokimia untuk menyerap energi termal. Energi disimpan melalui *reversible reaction* dan dilepas ketika reaksi tersebut dibalik. Meskipun *thermo-chemical storage* memiliki *energy density* yang tinggi, tetapi sistem ini memerlukan *catalyst* untuk melepas energi dan mengontrol reaksi termokimia sehingga hal itu tidak diinginkan.

2.2.4. *Phase Change Material*

Menurut Regin dkk (2008) dan Khan dkk (2016), *phase change material* (PCM) adalah material penyimpanan energi yang memiliki penyimpanan energi termal lebih tinggi daripada *sensible heat storage* (SHS) dan mampu menyerap ataupun melepas energi secara konstan pada saat *melting* (*solid-liquid*) atau *sodification* (*liquid-solid*). Penggunaan PCM dapat menyimpan energi termal 5-14 kali lebih banyak daripada SHS. Pemilihan material PCM sebagai penyimpanan termal harus memiliki karakteristik seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Karakteristik PCM yang diinginkan pada sistem PATS (Regin dkk, 2008)

Sifat termal	Sifat fisis	Sifat kimia	Faktor ekonomi
Temperatur perubahan fase dari material sesuai dengan temperatur kerja. Memiliki nilai <i>latent heat</i> dan <i>specific heat</i> yang tinggi.	Kerapatan material tinggi.	Memiliki sifat kimia yang stabil.	Tersedia banyak.
	Perubahan kerapatan yang rendah ketika merubah fase.	Tidak terjadi dekomposisi.	Tidak mahal.
Konduktivitas termal yang tinggi (solid maupun liquid).	Tidak terjadi <i>supercooling</i> ketika pendinginan.	Tidak beracun, tidak mudah terbakar dan tidak meledak. Cocok dengan material pembungkus.	

Kapasitas penyimpanan dari PCM bergantung pada *specific heat* dan *latent heat values*. Semakin tinggi harga dari *specific heat* dan *latent heat values* dari PCM akan semakin baik karena kapasitas penyimpanannya akan semakin besar. Meskipun demikian, material PCM dengan perubahan fase *solid-gas* atau *liquid-gas* umumnya tidak digunakan sebagai penyimpanan energi. Hal ini dikarenakan saat PCM berubah fase menjadi gas, volume material akan menjadi sangat besar sehingga memerlukan sistem yang besar dan kompleks (Agyenim dkk, 2010).

2.2.5. *Charging* dan *Discharging*

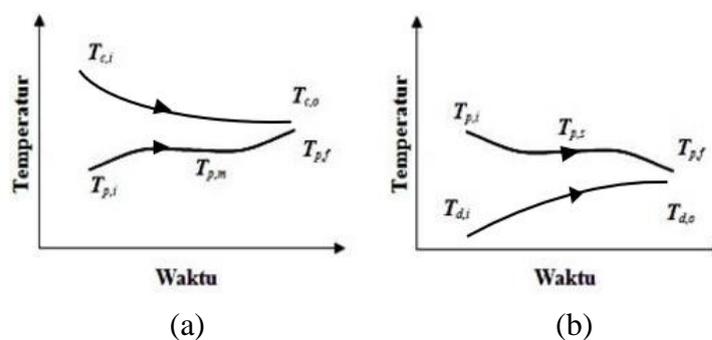
Proses *charging* diawali dengan penyerapan energi termal yang terjadi di dalam kolektor untuk menaikkan temperatur HTF. Kemudian, HTF di dalam kolektor pada temperatur $T_{c,i}$ bersirkulasi ke dalam tangki TES karena terjadi perbedaan temperatur HTF pada kolektor dan tangki. Di dalam tangki TES, energi termal pada HTF diserap oleh PCM yang memiliki temperatur $T_{p,i}$. PCM yang terus

menyerap energi termal mulai mengalami pelelehan yang menandakan PCM telah memasuki temperatur leleh ($T_{p,m}$). Apabila energi termal pada HTF terus diserap setelah PCM meleleh sempurna, maka temperaur PCM menjadi $T_{p,f}$. Proses *charging* selesai saat HTF bertemperatur $T_{c,o}$. Kalor yang dilepas HTF selama proses *charging* dapat diketahui dengan persamaan 2.2.

Temperatur HTF dan PCM saat awal mula proses *discharging* masing-masing adalah $T_{d,i}$ dan $T_{p,i}$. Kebalikan dari proses *charging*, *transfer* kalor terjadi dari PCM ke HTF. PCM mulai mengalami pembekuan saat temperatur PCM mencapai $T_{p,s}$. Apabila temperatur HTF di bawah temperatur $T_{p,s}$, maka *transfer* kalor dari PCM akan terus berlangsung hingga temperatur PCM mencapai $T_{p,f}$. Temperatur akhir HTF saat proses *discharging* selesai adalah $T_{d,o}$. Kalor yang diterima HTF dari PCM selama proses *discharging* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.3 (Ramayya dan Ramesh, 1998). Proses di atas diilustrasikan pada Gambar 2.7.

$$Q_c = \dot{m}_{ch} c_{p,ch} (T_{c,i} - T_{c,o}) \quad (2.2)$$

$$Q_d = \dot{m}_d c_{p,d} (T_{d,i} - T_{d,o}) \quad (2.3)$$



Gambar 2.7. Skema variasi temperatur pada sistem LHS proses (a) *charging* (b) proses *discharging*

2.2.6. Kalor Tersimpan Sesaat

Menurut Nallusamy dkk (2007), kalor tersimpan sesaat dapat dihitung berdasarkan temperatur masuk sesaat ($T_{w,in}(t)$, °C) dan temperatur keluar sesaat ($T_{w,out}(t)$, °C) dari HTF pada tangki TES seperti pada persamaan 2.4 berikut.

$$Q(t) = \dot{m} c_{p,w} (T_{w,in}(t) - T_{w,out}(t)) \quad (2.4)$$

Laju aliran massa air panas (\dot{m}) dalam kg/dt dan kalor jenis air panas ($c_{p,w}$) dalam (J/kg.°C).

ρ_d dan ρ_p adalah densitas air dingin dan densitas air panas. Berdasarkan persamaan 2.4, untuk mencari mencari volume dari air panas diperlukan harga kalor jenis air dan densitas air, panas maupun dingin. Harga tersebut dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut (Popiel dan Wojtkowiak, 1998).

$$\rho(T) = 999,79684 + 0,068317355T - 0,010740248T^2 + 0,00082140905T^{2,5} - 0,000023030988T^3 \quad (2.5)$$

$$C_p(T) = 4,2174356 - 0,0056181625T + 0,0012992528T^{1,5} - 0,00011535353T^2 + 0,00000414964T^{2,5} \quad (2.6)$$

2.2.7. Kapasitas Energi Tersimpan

Kapasitas energi tersimpan adalah besarnya energi yang dapat disimpan di dalam tangki TES. Jumlahnya dapat dihitung dengan mengetahui penyimpanan termal pada tangki TES, yaitu HTF, PCM, dan kapsul. Kapasitas energi yang tersimpan berupa kalor sensibel HTF, kalor laten PCM, kalor sensibel PCM, dan kalor sensibel kapsul. Oleh karena itu, kapasitas energi tersimpan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Nallusamy dkk, 2007).

$$E(t) = m_w C_{p,w} (T_w(t) - T_{w,i}) + m_p \{ C_{p,ps} (T_m(t) - T_{p,i}) + L + C_{p,pl} (T_{p,am}(t) - T_m(t)) \} + m_c C_{p,c} \{ T_c(t) - T_c \} \quad (2.7)$$

dengan :

- m_w : massa air (kg)
- m_p : massa PCM (kg)
- m_c : massa kapsul (kg)
- $C_{p,w}$: kalor jenis air (kJ/kg.°C)
- $C_{p,ps}$: kalor jenis PCM padat (kJ/kg.°C)
- $C_{p,pl}$: kalor jenis PCM cair (kJ/kg.°C)
- $C_{p,c}$: kalor jenis dinding kapsul (kJ/kg.°C)
- T_w : temperatur air panas (°C)
- $T_{w,i}$: temperatur awal air (°C)
- T_m : temperatur leleh PCM (°C)
- $T_{p,am}$: temperatur PCM di atas titik leleh (°C)
- $T_{p,i}$: temperatur awal PCM (°C)
- T_c : temperatur kapsul (°C)
- $T_{c,i}$: temperatur awal kapsul (°C)
- L : kalor laten pelelehan (J/kg)

2.2.8. *Solar simulator*

Sarwar dkk (2014) menyebutkan bahwa *solar simulator* menyediakan daya *output* kumulatif 960 W pada radius 35 mm dengan standar deviasi 107,8%, sementara pada target melingkar dengan jari-jari 110 mm; daya kumulatif sebesar 1642 W dengan efisiensi konversi 47%. *Solar simulator* dengan fluks tinggi sesuai digunakan untuk penelitian *indoor* dengan suhu panas matahari yang tinggi, termokimia dan sistem fotovoltaik terkonsentrasi di bawah simulasi iklim yang terkendali. Berdasarkan persyaratan radiasi *output*, *solar simulator* dapat menggunakan lampu busur pendek xenon yang berbeda *output* radiatif dengan penyesuaian lebih lanjut menggunakan builtin pengontrol.

Menurut Emery dkk (2014), *xenon arc* dalam operasinya mengharuskan tekanan tinggi karena sesuai dengan sumber titik intensitas. *Xenon arc* juga dinilai memiliki spektrum yang dekat kemiripannya dengan matahari dibandingkan lampu lain. Juga, dengan sumber integrasi optiknya mampu menghasilkan rendahnya tingkat ketidakmerataan ke seluruh area kolektor. Hanya saja memerlukan suplai daya yang tinggi dan kebutuhan alat pendukung dengan harga yang mahal. Pada *tungsten halogen* memiliki tingkatan tegangan yang digunakan. Perbedaan bohlam yang digunakan pun memiliki tipe dan spektrum masing-masing. Pemilihan tipe bohlam harus sesuai ketersediaan, tegangan, daya, dan harapan hidup.

Simulasi kondisi cahaya pada *solar simulator* penting dilakukan untuk mengetahui pengukuran intensitas cahaya halogen yang tidak stabil. Hal ini dilakukan dengan menguji lampu bekerja selama 30 menit sebelum dimulainya tes eksperimental. Lampu *solar simulator* membutuhkan waktu 20 - 30 menit untuk mencapai kondisi *steady state* dengan intensitas konstan. Dapat diamati bahwa suhu sekitar di bawah simulator surya meningkat seiring jarak antara kolektor surya dan sumber cahaya berkurang. Demikian pula intensitas matahari berkurang seiring dengan meningkatnya jarak. Ketidakmerataan dapat didefinisikan sebagai ukuran radiasi matahari bervariasi pada area yang dipilih (Shatat dkk, 2013).