

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

2.1.1. Pemanas Air Tenaga Surya Sistem Aktif

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

Badescu (2005) melakukan percobaan eksperimental pada sistem PATS sistem aktif dengan kolektor plat datar. Pada pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja suatu tangki. Hasilnya tangki vertikal bekerja lebih baik di musim gugur dan musim dingin, sedangkan tangki yang ditempatkan di atap (horizontal) bekerja lebih baik di musim panas. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem PATS aktif yang lebih cocok digunakan di Indonesia adalah tangki horizontal.

Percobaan eksperimental pada sistem PATS yang dilakukan oleh Hossain dkk (2011) dengan kolektor plat datar bertujuan untuk mengembangkan pemanas air tenaga surya. Sistem ini diasumsikan disuplai air panas pada suhu 50°C dan 80°C. Dari penelitian ini, ditemukan bahwa pemanas air tenaga surya dengan sistem *siphon* mencapai efisiensi karakteristik sistem 18% lebih tinggi daripada sistem konvensional dengan mengurangi kehilangan panas untuk pemanas air tenaga surya *thermo-siphon*.

Penelitian desain optimal dalam aplikasi energi matahari pada sistem pemanas air dilakukan oleh Hobbi dkk (2008). Salah satu sistem yang dibahas adalah sistem aktif, dengan menggunakan kolektor plat datar yang bertujuan untuk menentukan nilai-nilai optimal dari parameter sistem dan set kedua dilakukan untuk

menentukan nilai-nilai optimal dari parameter desain kolektor. Hasil menunjukkan bahwa dengan memanfaatkan energi matahari, sistem yang dirancang dapat menyediakan 83-97% dan 30-62% dari permintaan air panas di musim panas dan musim dingin, masing-masing. Juga ditentukan bahwa kolektor non-selektif buatan lokal dapat memasok sekitar 54% dari kebutuhan energi pemanas air tahunan oleh energi surya. Namun, disisi lain penyelidikan lebih lanjut diperlukan untuk kolektor plat datar dalam penggunaan perangkat skala besar penyimpanan energi termal.

2.1.2. *Solar Simulator* Sebagai Sumber Energi

Solar simulator adalah perangkat yang memberikan pencahayaan yang mendekati sinar matahari alami. Fungsi dari *solar simulator* adalah untuk menyediakan fasilitas pengujian dalam ruangan yang dapat dikendalikan dibawah kondisi laboratorium standar, yang biasanya digunakan untuk pengujian sel surya, plastik, dan bahan serta perangkat lain. (Mangkar dkk, 2018).

Matahari adalah salah satu energi terbarukan yang tidak dapat habis dan terus diperbarui. Itu juga dianggap ekonomis, dan ramah lingkungan, tetapi percobaan di bawah radiasi matahari secara langsung terdapat sebuah kendala. Hal ini disebabkan oleh faktor suhu udara dan radiasi matahari setiap hari yang dipengaruhi oleh kelembaban relatif atau massa udara dan juga pergerakan udara yang menyebabkan kehilangan panas lebih cepat melalui konveksi (Norhafana, 2015). Akan tetapi, seiring dengan perkembangan teknologi, pengujian modul surya bisa dilakukan di dalam ruangan dengan kondisi laboratorium standar. Hal ini memungkinkan adanya *solar simulator*.

Parupudi dkk (2018) melakukan beberapa simulasi yang dilakukan dengan memvariasikan panjang fokus reflektor parabola dan mengubah orientasi lampu (horizontal atau vertikal) untuk mengidentifikasi konfigurasi terbaik untuk mencapai keseragaman yang diinginkan. Ketidakteraturan untuk kombinasi lampu reflektor parabola yang dipilih diperkirakan $\pm 4,5\%$, lebih tinggi dari nilai target. Keseragaman iradiasi pada bidang fokus ini memenuhi syarat untuk klasifikasi kelas B yang ditetapkan oleh standar Amerika dan Eropa.

2.1.3. PCM Sebagai *Thermal Energy Storage*

(Khan & 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 yang dilakukan, peneliti menyimpulkan bahwa *paraffin wax* mempunyai *thermal* dan *chemical stability* yang lebih baik daripada *salt hydrates*.

Gasia dkk (2017) melakukan penelitian untuk menyeleksi PCM. Pengujian ini dilakukan dengan suhu perubahan fase antara 120 dan 200 °C. Di luar sifat PCM yang khas, enam belas PCM dipelajari dari sudut pandang stabilitas termal, serta dari sudut pandang bahaya kesehatan. Setelah 100 siklus leleh dan beku, tujuh kandidat dari enam belas menyajikan perilaku stabilitas yang sesuai dan lima di antaranya menunjukkan suhu termal-stabil maksimum lebih tinggi dari 200 °C. Dua kandidat akhir untuk pendekatan beban parsial ditemukan dalam kisaran suhu ini, bernama high density polyethylene (HDPE) dan asam adipat. Keduanya tidak mengalami kehilangan lebih dari 12% dari kapasitas penyimpanan termal. Oleh karena itu, prosedur pemilihan PCM menjadi langkah penting untuk operasi optimal proses termal dan sistem TES

Penelitian tentang sistem penyimpanan energi termal dengan kapsul berisi PCM berbentuk bola telah dilakukan oleh (Bellan dkk, 2014). PCM yang digunakan yakni sodium nitrat dan sebagai HTF berupa minyak sintetik temperatur tinggi. 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*.

Pengujian eksperimental yang dilakukan oleh Nadjib dkk (2015), bertujuan untuk mengetahui kapasitas TES pada sistem PATS yang di dalamnya terdapat PCM. Penelitian ini menggunakan PCM jenis *paraffin wax* yang diintegrasikan dengan air sebagai HTF di dalam tangki PATS. Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan jika tangki dengan volume 31,37 liter dapat menyimpan

kapasitas total 4,8 J selama proses *charging* 340 menit. Hal tersebut dapat terjadi karena PCM berkontribusi sebesar 44,28% dari kapasitas TES total PATS. Hal ini disebabkan *heat loss* selama proses *charging* hanya 3,97 MJ energi yang dapat tersimpan dalam pengujian ini. Oleh karena itu, perlu diperhatikan untuk desain sistem agar dapat meminimalisir *heat loss* terutama pada bagian isolasi PATS.

(Nadjib M., 2016) meneliti tentang penggunaan material LHS (latent heat storage) yang sering disebut *phase change material* (PCM) pada pemanas air tenaga surya 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.

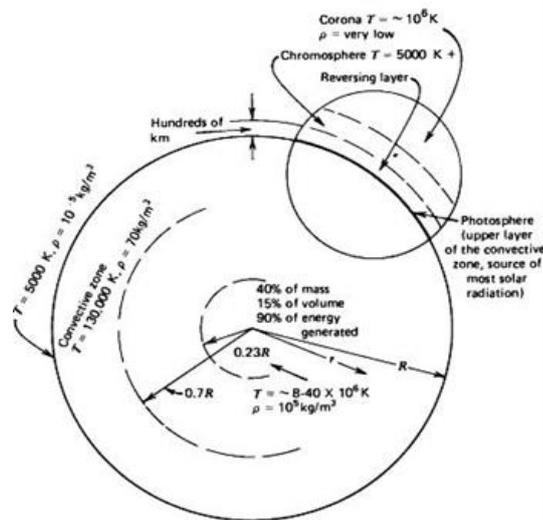
Berdasarkan tinjauan pustaka, dapat diperoleh kesimpulan bahwa PATS sistem aktif sudah banyak digunakan. Penggunaan PCM pada PATS juga sudah pernah dilakukan dengan beberapa desain, salah satunya penggunaan *paraffin wax*. Namun peneliti PATS-PCM yang memakai *solar simulator* belum ditemukan. Oleh karena itu penelitian ini penting dilakukan untuk menambah ilmu pengetahuan.

2.2. Landasan Teori

2.2.1. Energi Matahari

Matahari adalah bola materi gas yang sangat panas dengan diameter $1,39 \times 10^9$ m dan memiliki temperatur *blackbody* efektif 5777 K. Suhu di daerah pusat matahari diperkirakan 8×10^6 hingga 40×10^6 K dan kerapatan adalah 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 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 oleh matahari ditransfer ke permukaan bumi dan kemudian diradiasikan. Melalui proses radiasi dan konvektif terjadi dengan emisi berturut-turut (Duffie dan Beckman, 2013). Skema struktur dari matahari digambarkan pada Gambar 2.1



Gambar 2. 1. Skema struktur matahari (Duffie dan Beckman, 2013)

2.2.2. Solar Simulator

Solar simulator adalah sumber cahaya yang memberikan penerangan yang dekat dengan sinar matahari alami. Mereka digunakan untuk pengujian di dalam ruangan yang terkontrol dari berbagai bahan dan perangkat, tetapi lebih sering untuk penyelidikan sel surya, karakterisasi, kontrol kualitas, dan verifikasi kinerja dari modul yang selesai (Novičkovas dkk, 2014).

Menurut (IEC 60904-9 , 2007) (SI) tentang persyaratan kinerja *solar simulator* ada 3(tiga) kriteria dalam menentukan klasifikasi solar simulator, yaitu :

1. *Spectral distribution match*
2. *Spatial non-uniformity of irradiance* solar simulator, dan
3. *Temporal instability of irradiance*

Pengujian terhadap masing-masing kriteria digunakan untuk menentukan kelas *simulator*. Jika suatu *solar simulator* termasuk kelas AAA, hal itu berarti solar simulator tersebut memiliki kualifikasi kinerja kelas A untuk ketiga kriteria yang telah ditentukan oleh standar IEC 60904-9. Adapun persyaratan klasifikasi *solar simulator* berdasarkan IEC 60904-9 disajikan pada tabel 2.1.

Tabel 2. 1. Klasifikasi *Solar Simulator* Berdasarkan IEC 60904-9 (Anonim, 2015)

Klasifikasi	Spectral Match (untuk semua interval panjang gelombang sesuai syarat AM1,5G)	Irradiance Spatial Non-Uniformity	Temporal Instability	
			STI	LTI
Kelas A	0,75-1.25	2 %	0,5%	2 %
Kelas B	0,6-1,4	5%	2 %	5%
Kelas C	0.4-2.0	10%	10 %	10%

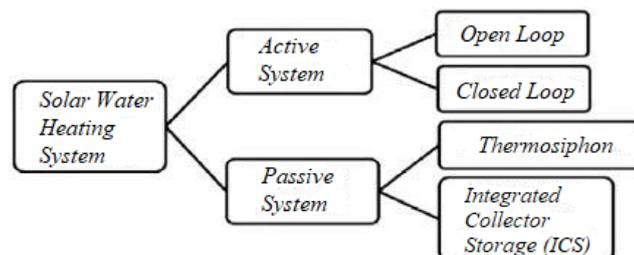
Distribusi radiasi cahaya solar simulator untuk kondisi standar AM1,5G ditentukan menurut IEC 60904-3 sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2. Distribusi Radiasi Cahaya Solar Simulator Untuk Kondisi Standar AM1,5G (Anonim, 2015)

Interval panjang gelombang (nm)	Persentase total radiasi dalam range panjang gelombang 400 nm - 1100 nm
400 – 500	18,4 %
500 – 600	19,9 %
600-700	18.4%
700-800	14.9 %
800-900	12.5 %
900-1100	15,9%

2.2.3. Sistem Pemanas Air Tenaga Surya

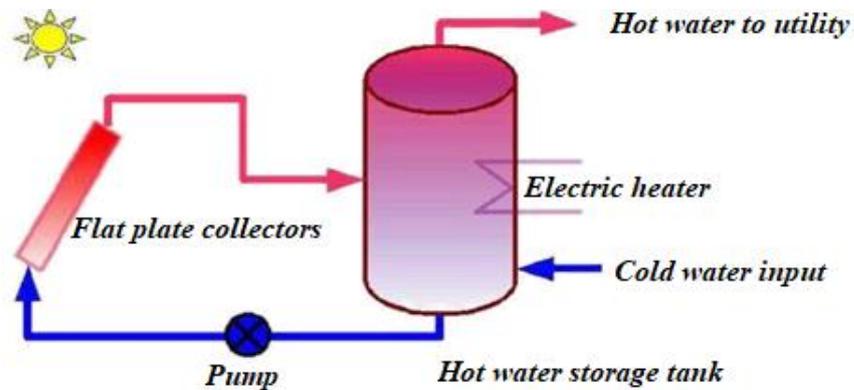
Sistem pemanas air tenaga surya (PATS) merupakan salah satu aplikasi dari pemanfaatan energi matahari dengan menggunakan kolektor untuk menyerap energi yang dipancarkan matahari. Untuk menunjang prinsip kerja sistem PATS terdiri atas 4 komponen utama, yaitu kolektor, tangki, aksesoris dan pemanas tambahan. Pemanas tambahan digunakan karena energi matahari yang diserap kolektor tidak dapat memanaskan air sesuai kebutuhan. PATS terbagi menjadi 2 sistem seperti pada Gambar 2.2.



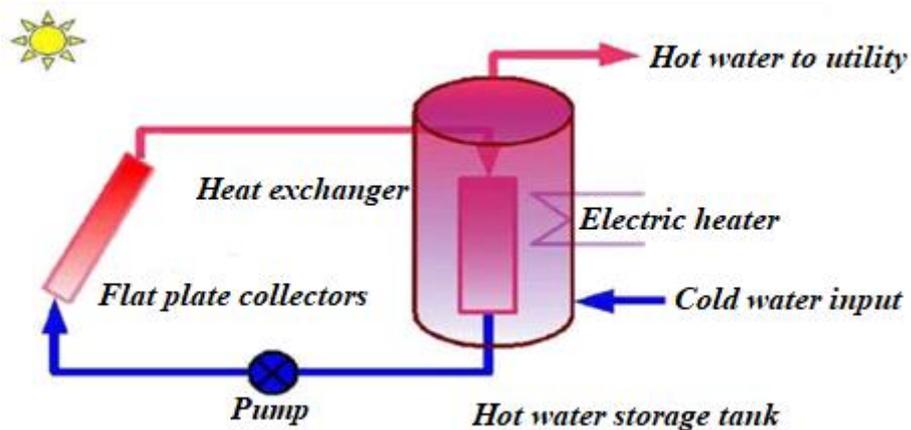
Gambar 2. 2. Sistem PATS (Jamar, 2016)

2.2.3.1. Sistem Aktif

Menurut Jamar dkk (2016) 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. Perbedaan dari keduanya hanya pada saat pendistribusiannya. Sistem terbuka tidak memerlukan *heat exchanger*, sedangkan sistem tertutup masih memerlukan *heat exchanger*. Gambar sistem aktif dan pasif dapat dilihat pada Gambar 2.3.



(a)

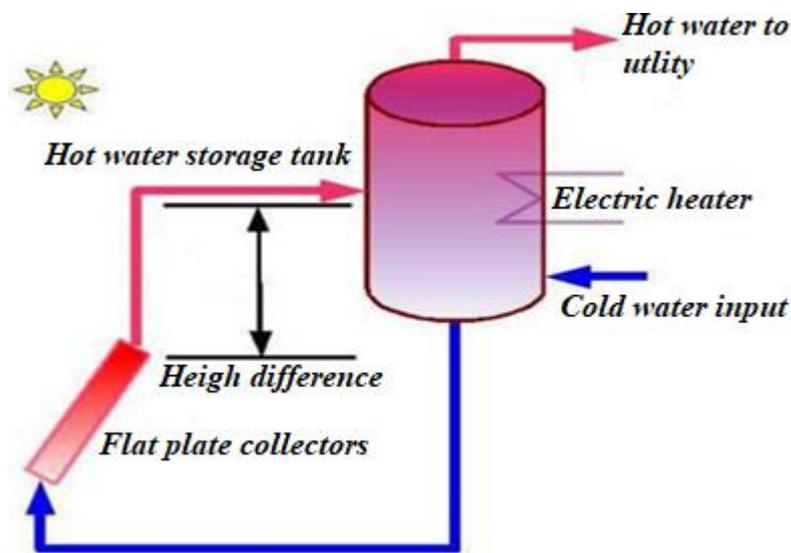


(b)

Gambar 2. 3. PATS sistem aktif (a) Sistem terbuka, (b) Sistem tertutup (Dwivedi,2009)

2.2.3.2. Sistem Pasif / *Thermoshypon*

Sistem pasif / *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. (Dwivedi, 2009)



Gambar 2. 4. Sistem *thermosyphon* dengan pemanas tambahan (Dwivedi, 2009)

2.2.4. *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 bertahan lama dan 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 yang hanya memancarkan energinya pada siang hari sehingga membuat sistem TES menjadi sangat penting. Faktor penting yang diperhitungkan dalam penggunaan TES, antara lain:

- | | |
|----------------------------|------------------------|
| 1. Durasi penyimpanan | 4. <i>Heat loss</i> |
| 2. Temperatur kerja sistem | 5. Ketersediaan tempat |
| 3. Kapasitas penyimpanan | 6. Ekonomis |

2.2.5. Phase Change Material

Penelitian dilakukan oleh (Nadjib & Suhanan, 2014) secara simulasi modeling dengan menggunakan *Ansys Fluent*. Penelitian dilakukan untuk mengetahui perilaku termal saat proses pelelehan *paraffin wax* pada tangki 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. Karakteristik PCM ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3. Karakteristik PCM yang diinginkan pada PATS (Regin dkk, 2008)

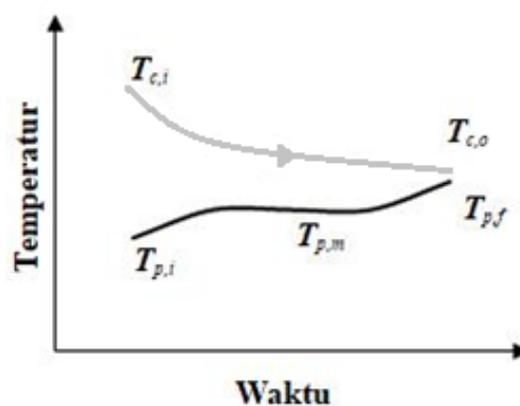
Sifat termal	Sifat fisis	Sifat kimia	Faktor ekonomi
Temperatur perubahan fase dari material sesuai dengan temperatur kerja.	Kerapatan material tinggi.	Memiliki sifat kimia yang stabil.	Tersedia banyak.
Memiliki nilai <i>latent heat</i> dan <i>specific heat</i> yang tinggi.	Perubahan kerapatan yang rendah 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.	

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 penyimpanan panas laten.

Penyimpanan energi panas laten (TES) menggunakan bahan-bahan perubahan fasa (PCM) adalah cara yang efektif untuk menyimpan energi termal karena kepadatan penyimpanan energi yang tinggi dan proses peleburan dan solidifikasi yang hampir isothermal pada suhu transisi perubahan fase PCM (Gasia dkk, 2017).

2.2.6. Proses *Charging*

Charging merupakan proses penyerapan kalor dari sumber panas yang dimiliki oleh HTF ke PCM yang berada di dalam TES. Proses ini berlangsung dari temperatur rendah ke temperatur 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. Grafik perubahan temperatur pada proses *charging* dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5. Skema temperatur pada sistem LHS proses *charging*