

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### 2.1. Tinjauan Pustaka

##### 2.1.1. Penggunaan PCM pada PATS sistem *thermosyphon*

Penelitian eksperimental dilakukan oleh Canbazoglu dkk (2005) selama bulan November di Malatya, Turki, rata - rata radiasi matahari total yang dapat ditangkap kolektor *horizontal* adalah 8,469 MJ/m<sup>2</sup> setiap harinya. Energi tersebut kira-kira setara dengan sepertiga energi yang dapat ditangkap pada bulan Juli. Sistem PATS mengandalkan sirkulasi yang terjadi secara natural untuk mentransfer kalor. Berdasarkan hasil penelitian penggunaan PCM dapat mempertahankan temperatur  $\pm 45^{\circ}\text{C}$  selama 10 jam apabila air panas tidak digunakan.

Investigasi ekperimental peningkatan kerja PCM pada PATS sistem *termosyphon*, dilakukan dengan modifikasi menggunakan pelat *absorber* dengan memasang PCM pada permukaan untuk meningkatkan area perpindahan panas. *Paraffin wax* digunakan sebagai penyimpan panas siang hari sedangkan air digunakan sebagai media pemindah panas pada tangki 120 liter. Pengujian dilakukan menggunakan PCM dan tanpa PCM. Temperatur PCM  $38^{\circ}\text{C}$  dan temperatur air panas pada siang hari  $52 \pm 2,2\%$ . Hasil penelitian tersebut adalah PCM memberikan kinerja yang lebih tinggi dibanding tanpa menggunakan PCM. (Lin dkk, 2012)

Penelitian tentang PATS berisi PCM sebagai penyimpan panas pada kolektor telah dilakukan oleh Gultom (2013). Data akuisisi yang digunakan terdiri dua bagian utama, yaitu *hobo microstation* untuk mengukur radiasi, kecepatan angin, temperatur udara (lingkungan) dan *agilent* terdiri 20 buah termokopel untuk mengukur temperatur pemanas air yang dihubungkan ke komputer. Hasil penelitian adalah temperatur permukaan kolektor  $107^{\circ}\text{C}$ , jumlah energi kalor di dalam PCM 12,6 MJ dan efisiensi pemanas air 37,87 %. Sistem ini memiliki *heat loss* yang signifikan yaitu sebesar 8,36 MJ.

Nadjib dan Suhanan (2013) melakukan penelitian ekperimental tentang penggunaan PCM pada pats sistem *thermosyphon*. PATS menggunakan PCM sebagai *latent heat storage* dan air sebagai HTF (*heat transfer fluid*). Penelitian dilakukan selama proses *charging* dengan waktu 340 menit dan mampu menyimpan energi termal kumulatif sebesar 3,95 MJ. Temperatur rata-rata tertinggi yang dapat dihasilkan PCM adalah 67,58°C. Berdasarkan hal tersebut penggunaan PCM pada PATS sistem *thermosyphon* merupakan teknologi yang dapat digunakan.

### 2.1.2. *Paraffin wax* sebagai PCM

Kapsul - kapsul PCM berbentuk bola untuk mengetahui karakteristik perpindahan kalor selama proses *discharging* telah digunakan oleh Shuangmao dkk (2011). Kapsul - kapsul PCM ditempatkan pada sebuah *packed bed*. Peneliti menyimpulkan (1) Pada saat PCM dalam fase *liquid* tingkat pelepasan kalor sangat tinggi dan dengan waktu yang cepat. Kemudian temperatur akan stabil saat PCM mulai memasuki fase solidifikasi dan temperatur menurun sampai suhu lingkungan pada pendinginan padat. (2) Pada saat aliran *Heat Transfer Fluid* (HTF) meningkat, waktu untuk fase solidifikasi akan berkurang. Namun tidak terlalu berpengaruh saat aliran HTF lebih tinggi dari 13kg/menit. (3) Perbandingan antara suhu dan laju aliran inlet HTF, porositas *packed bed* tidak terlalu berpengaruh pada waktu fase solidifikasi.

Penelitian eksperimental yang telah dilakukan oleh Ambarita dkk (2012) tentang rancang bangun inkubator bayi menggunakan PCM sebagai pemanas. *Paraffin wax* digunakan sebagai PCM, dapat menyimpan panas karena titik lelehnya 53 °C. Pada proses *charging* temperatur mencapai 57 °C yang digunakan sebagai pemanas ruang inkubator dengan temperatur 35°C – 37 °C. Panas ini dapat bertahan selama 3 jam 20 menit. Efisiensi *solar box* 49,97 % dan efisiensi inkubator 63,04 %.

Khan dkk (2016) membandingkan 2 tipe *Latent Heat Storage* (LHS) sebagai PCM, material yang digunakan sebagai PCM adalah *paraffin wax* dan *salt hydrates*. *Properties* pada *paraffin wax* tidak berubah setelah berulang kali melakukan *thermal cycle* (*melting cooling*), sedangkan *salt hydrates* mengalami

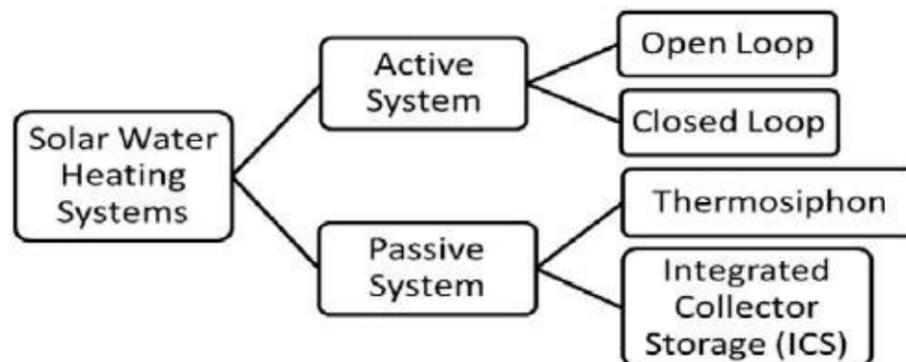
fase *segregation* dan *supercooling*. Oleh karena itu *paraffin wax* lebih cocok untuk digunakan pada PATS, karena memiliki termal dan *chemical stability* yang lebih baik daripada *salt hydrates*.

Berdasarkan referensi di atas, penelitian yang sudah dilakukan adalah berupa studi eksperimental. Penelitian – penelitian tersebut belum ada yang membahas tentang perancangan alat penukar kalor yang berisi PCM dan digunakan sebagai penyimpan energi termal pada PATS. Oleh karena penelitian ini fokus pada perancangan alat penukar kalor berisi PCM.

## 2.2. Landasan teori

### 2.2.1. Pemanas air tenaga surya

Pemanas air tenaga surya (PATS) adalah suatu alat yang memiliki fungsi sebagai pemanas air dengan memanfaatkan energi termal matahari. Listrik dan bahan bakar fosil merupakan sarana untuk memanaskan air tanpa menggunakan energi termal matahari. Kedua hal tersebut dapat digantikan dengan sistem PATS karena energi matahari yang tidak ada habisnya. PATS diklasifikasi menjadi dua sistem, yaitu sistem aktif dan sistem pasif. Sistem PATS dapat dilihat pada gambar 2.1.

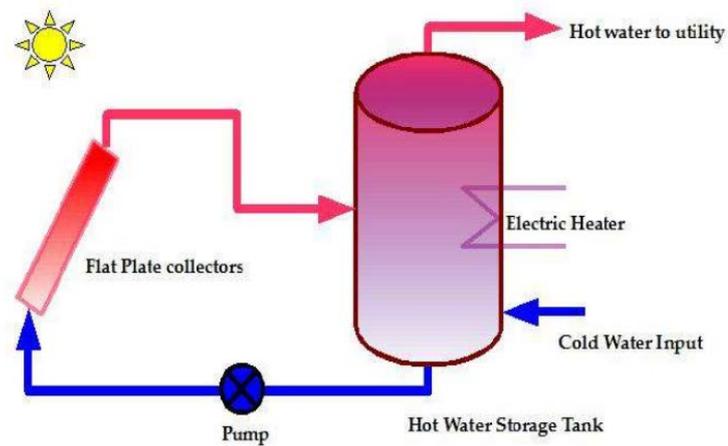


Gambar 2.1 Sistem PATS (Jamar, 2016)

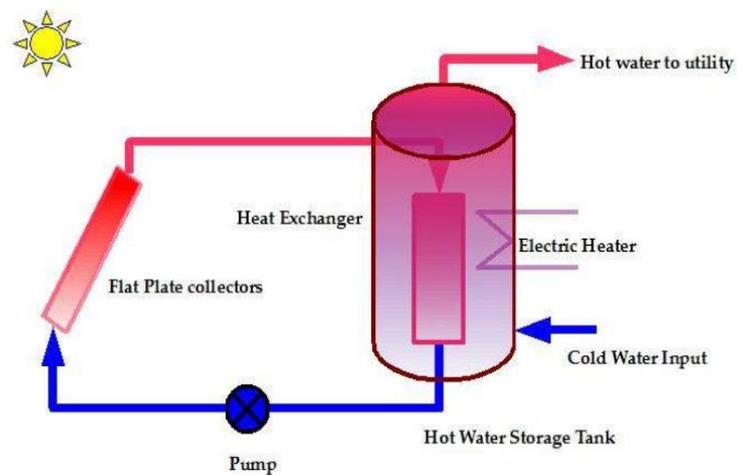
#### a. Sistem Aktif

PATS sistem aktif adalah pemanas air yang memanfaatkan termal matahari dengan aliran air menggunakan bantuan energi listrik dan pompa air. Sistem ini juga biasa disebut sistem sirkulasi paksa. PATS sistem aktif dibagi menjadi dua

bagian yaitu sistem aktif - langsung (*direct/open loop*) dan aktif - tak langsung (*indirect/close loop*). PATS sistem aktif - langsung didefinisikan sebagai sistem pemanas air dengan kolektor secara langsung memindahkan panas ke tangki pemanas air tanpa perantara alat penukar kalor. PATS sistem aktif-tak langsung didefinisikan sebagai sistem pemanas air dimana perpindahan panas fluida tidak bercampur dengan fluida kerja yang di dalam tangki. PATS sistem aktif dapat dilihat pada gambar 2.2.



(a)



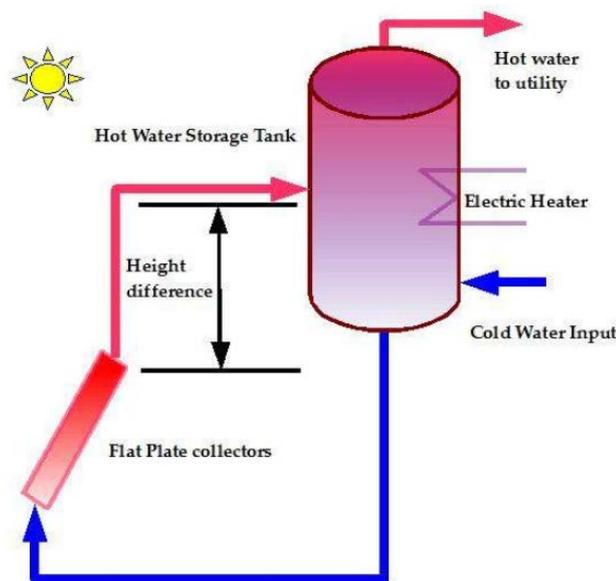
(b)

Gambar 2.2. PATS sistem aktif (Dwivedi, 2009)

(a) Sistem terbuka, (b) Sistem tertutup

## b. Sistem Pasif

PATS sistem pasif adalah pemanas air yang memanfaatkan termal matahari dengan aliran air tidak menggunakan bantuan energi listrik dan pompa air. Aliran air PATS yang mengalir secara alamiah dari tangki pemanas ke kolektor atau sebaliknya disebut sistem *thermosyphon*. Ketika air di bawah kolektor dan didalam tangki densitasnya relatif tinggi sehingga mengakibatkan air dari kolektor bergerak menuju tangki dan air dingin pada tangki mengalir ke kolektor. Sedangkan temperatur air di bagian atas kolektor tinggi, densitas pada air rendah. Hal ini akan terus berulang sampai suhu air didalam tangki dan kolektor sama. Sistem *thermosyphon* dengan pemanas tambahan dapat dilihat pada gambar 2.3.



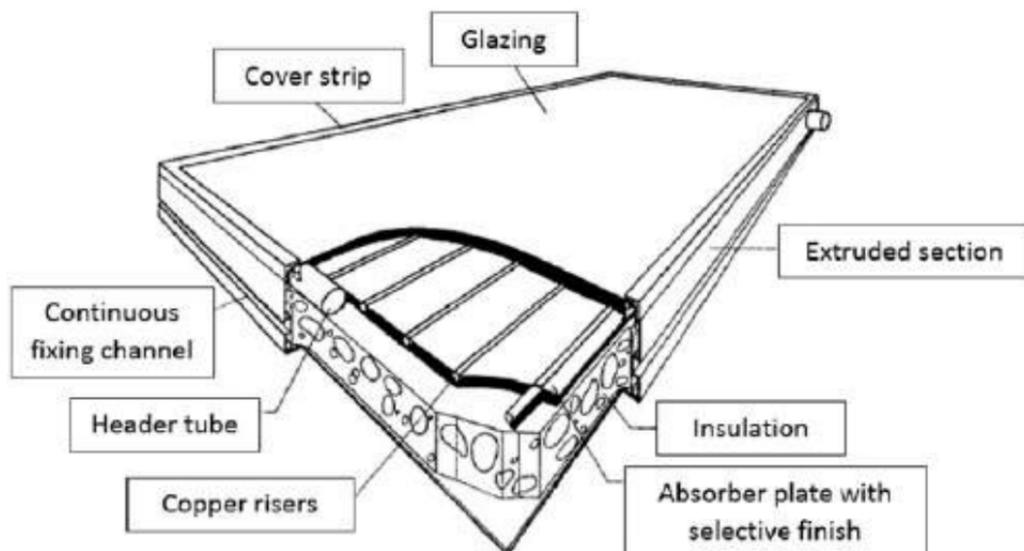
Gambar 2.3. Sistem *thermosyphon* dengan pemanas tambahan (Dwivedi,2009)

Kualitas PATS bergantung pada kemampuan fisik dan termal sistem seperti kemampuan menyerap panas, menyimpan panas, komponen kolektor termal surya, komponen tangki air, rendahnya rugi – rugi panas kedua komponen tersebut dan kemampuan responsif pemanas tambahan (Manurung, 2015). Komponen utama yang menunjang kinerja sistem PATS adalah sebagai berikut.

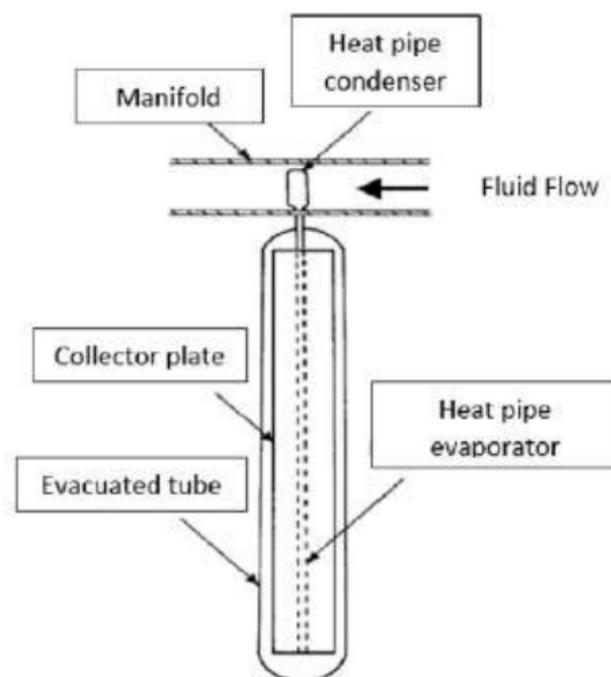
### 1. Kolektor matahari

Merupakan komponen utama dari pemanas air tenaga surya. Kolektor matahari menyerap radiasi dan mengubahnya menjadi panas. Kemudian

panas yang dihasilkan ditransfer ke air yang ada di kolektor. Terdapat beberapa jenis kolektor penyerap panas yaitu *Flat Plate Solar Collector System* (kolektor flat) dan *Evacuated Tube Solar Collector System* (kolektor tabung vacuum) (Gambar 2.4).



(a)



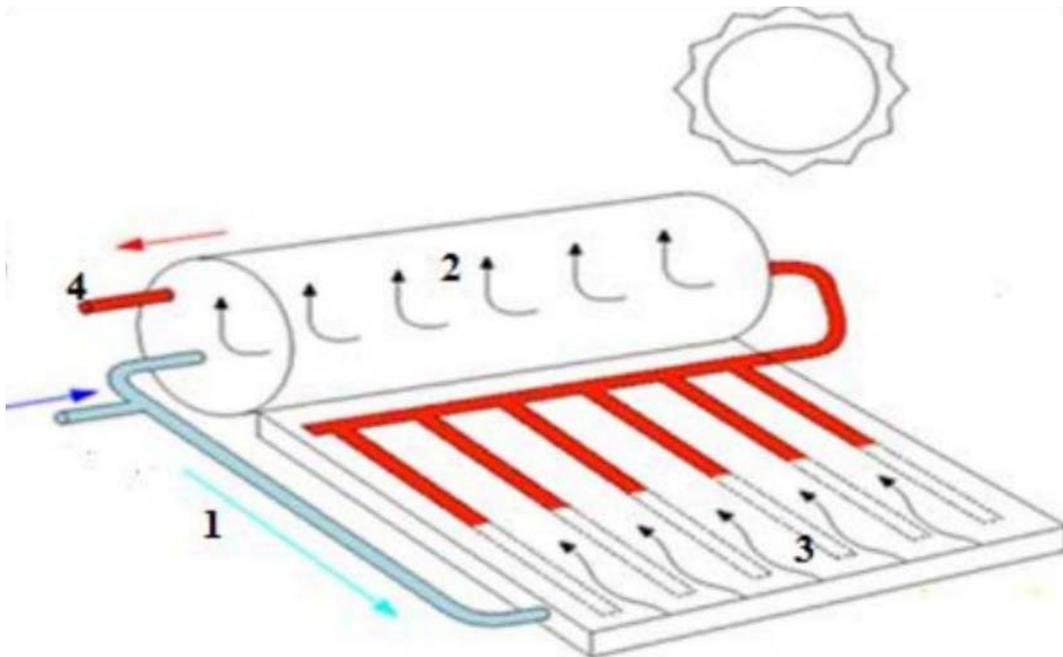
(b)

Gambar 2.4 (a) *Flat plate collector* (FPC), (b) *Evacuated tube solar collector* (ETC) (Jamar, 2016)

## 2. Tangki penyimpanan

Merupakan tempat untuk menyimpan air yang telah dipanaskan dari kolektor penyerap panas. Supaya efisien dan efektif, tempat penyimpanan air panas ini dilapisi dengan lapisan insulasi yang mencegah agar panas tidak banyak yang terbuang (*heat loss*).

Komponen-komponen pendukung PATS adalah sistem perpipaan, pemanas listrik dan katup pengaman (Gambar 2.5).



Gambar 2.5 Skema aliran air PATS sistem *thermosyphon* (Manurung, 2015)

Keterangan :

1. Pipa Saluran Air Dingin
2. Tangki Penampungan Air
3. Kolektor
4. Pipa Saluran Air Panas

Kalor yang diterima kolektor dari energi matahari dapat diketahui menggunakan persamaan (2.1) sebagai berikut (Talmatsky, 2008).

$$Q_{kol} = \eta_c I_c A_c \quad (2.1)$$

dimana

- $\eta_c$  : efisiensi kolektor (%)
- $I_c$  : radiasi matahari ( $W/m^2$ )
- $A_c$  : luas kolektor ( $m^2$ )
- $Q_{kol}$  : kalor yang diterima kolektor (W)

### 2.2.2. *Thermal Energy Storage* (TES)

*Thermal energy storage* (TES) tidak dapat lepas dari sumber energi terbarukan yang efektif, terutama energi matahari yang merupakan sumber energi paling prospektif. *Thermal energy storage* berperan penting dalam menstabilkan energi. *Thermal energy storage* dapat diklasifikasikan sebagai SHS, dan *latent heat storage* (LHS). Untuk kebutuhan khusus energi panas, SHS membutuhkan tempat yang lebih besar dibandingkan dengan LHS. Di antara dua metode penyimpanan energi termal, LHS adalah material penyimpan energi termal dalam jumlah besar dan mampu menyimpan energi pada temperatur yang hampir konstan sesuai dengan temperatur transisi fasa material. Bahan yang digunakan dalam penyimpanan energi panas laten disebut PCM. Ragam PCM ada dan termasuk organik, anorganik, dan eutektik, semuanya tersedia dalam berbagai titik leleh / titik beku.

#### a. *Sensible Heat Storage* (SHS)

Energi tersimpan di dalam SHS ditandai dengan berubahnya temperatur pada material penyimpan energi. Berdasarkan penggunaannya, SHS diklasifikasi menjadi dua macam yaitu media cair dan media padat. Media cair adalah SHS yang menggunakan zat cair untuk penyimpan energi seperti air, minyak, dan *molten salts*. Media padat adalah SHS yang menggunakan material padat untuk penyimpan energinya seperti logam. Keunggulan dari SHS adalah harganya yang lebih murah. SHS memiliki *density energy* paling rendah diantara kedua tipe SHS memerlukan tempat penyimpanan yang lebih besar.

*Heat loss* yang terjadi akan sangat merugikan sebagai material penyimpan energi pada SHS (Sharma, 2009).

b. *Latent heat storage (LHS)*

Perubahan fase dari material penyimpan energi merupakan tanda penyerapan atau pelepasan energi terjadi pada LHS. perubahan fase *liquid-vapor* lebih banyak digunakan sebagai *energy storage* dibandingkan dengan fase *liquid-solid* karena volume yang dibutuhkan dalam perubahan fase *liquid-vapor* lebih banyak. *phase change material*, *heat exchanging surface*, dan tempat untuk menutup material adalah 3 bagian yang dibutuhkan dalam membuat LHS (Regin dkk, 2008).

2.2.3. *Phase Change Material (PCM)*

PCM memiliki keunggulan yaitu tidak tingginya fluktuasi temperatur saat *charging* dan *discharging*, memiliki temperatur yang fleksibel dalam penggunaannya dan densitas penyimpanannya tinggi. Salah satu jenis LHS yang digunakan pada PATS adalah *paraffin wax*. Rendahnya konduktivitas termal LHS sehingga mengakibatkan unjuk kerja termalnya juga rendah, maka perlu ada metode untuk meningkatkan unjuk kerja sistem LHS. Metode yang dapat diaplikasikan untuk meningkatkan unjuk kerja sistem LHS antara lain perluasan permukaan (*extended surfaces*), pemakaian beberapa PCM (*multiple PCM*), peningkatan konduktivitas termal PCM dengan menambahkan material berkonduktivitas termal tinggi, dan pengkapsulan PCM (*PCM encapsulation*) (Nadjib dan Suhanan, 2014)

2.2.4. Peningkatan Laju Transfer Kalor pada *Latent Heat Storage (LHS)*

PCM non logam memiliki konduktivitas termal yang rendah. Rendahnya konduktivitas termal akan mengakibatkan pertukaran kalor yang lambat antara PCM dan *heat transfer fluid (HTF)*, pada saat *charging* maupun *discharging*. Oleh karena itu peningkatan laju transfer kalor pada PCM perlu ditingkatkan. Ada beberapa cara untuk meningkatkan laju transfer kalor pada PCM, seperti perluasan

permukaan, *multitube* pcm, peningkatan konduktifitas termal, dan pengkapsulan PCM.

Perpindahan kalor konveksi didalam tangki pada proses *charging* dapat diketahui menggunakan persamaan (2.2) berikut.

$$Q_{konv} = hA(T_{\infty} - T_k) \quad (2.2)$$

dengan

- A : luas perpindahan kalor konveksi =  $\pi \cdot D_k \cdot N_k \cdot L_{PCM}$
- $D_k$  : diameter luar kapsul (m)
- $N_k$  : jumlah kapsul (buah)
- $L_{PCM}$  : panjang kapsul PCM (m)
- $T_{\infty}$  : temperatur air panas di dalam tangki ( $^{\circ}C$ )
- $T_k$  : temperatur permukaan kapsul ( $^{\circ}C$ )

Dalam perhitungan perpindahan kalor konveksi didalam tangki pada proses *charging* memerlukan perhitungan lain agar mendapatkan hasil yang sesuai. Perhitungan selanjutnya menggunakan bilangan Reynolds (2.4) (Esen, 1998) dan bilangan Nusselt (2.5) (Esen, 1998). Bilangan Reynolds adalah rasio antara gaya inersia terhadap gaya viskositas yang mengkuantifikasikan hubungan kedua gaya tersebut dengan suatu kondisi aliran tertentu. Bilangan ini digunakan untuk mengidentifikasikan jenis aliran yang berbeda, merupakan salah satu bilangan tak berdimensi yang paling penting dalam mekanika fluida. Bilangan Nusselt adalah rasio perpindahan termal konveksi dan konduksi normal terhadap batas dalam kasus perpindahan panas pada permukaan fluida, bilangan Nusselt adalah satuan tak berdimensi. Sebelum menghitung bilangan Reynold dan bilangan Nusselt ada satu pertitungan yang harus dipertitungkan terlebih dahulu, yaitu diameter hidrolik (2.3). Diameter hidrolik adalah pertitungan yang dilakukan untuk menghitung aliran dalam tabung non-lingkar atau tabung lingkaran yang di dalamnya terdapat benda lain.

$$D_h = \frac{2V_{TES}}{\pi r_k N_k L_{PCM}} - 2r_k \left( \frac{L_{s,i}}{L_{PCM}} \right) \quad (2.3)$$

dengan

- $V_{TES}$  : volume tangki ( $m^3$ )  
 $N_k$  : jumlah kapsul (buah)  
 $r_k$  : jari-jari kapsul (m)  
 $L_{s,i}$  : panjang selongsong sisi dalam (m)  
 $L_{PCM}$  : panjang kapsul (m)

Bilangan Reynolds (Esen, 1998)

$$Re = \frac{2\dot{m}_c (L_{s,i}/L_{PCM})}{\mu \pi r_k N_k} \quad (2.4)$$

$\mu$  : viskositas dinamik air ( $Ns/m^2$ )

Bilangan Nusselt untuk kasus aliran alamiah melalui pipa (Esen, 1998)

$$Nu = 3.66 + 4.12 \left[ \left( \frac{D_h}{r_k} \right) - 0.205 \right]^{0.569} \quad (2.5)$$

Persamaan koefisien perpindahan kalor konveksi sebagai berikut (Incropera, 2007).

$$h = \frac{Nu k}{D_h} \quad (2.6)$$

$k$  : konduktifitas termal air ( $W/m.C$ )

a. Perluasan Permukaan

Tabel 2.2 *Properties of common fin materials*

Perbandingan sifat bahan perluasan permukaan (Ibrahim dkk, 2017)

	Graphite foil	Aluminium	Stainless steel	Carbon steel	Copper
Thermal conductivity (W/m-K)	150	200	20	30	350
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1000	2700	7800	7800	8800
Estimated volume specific cost (\$/m <sup>3</sup> )	10,000	7000	20,000	15,000	40,000

Peningkatan laju transfer kalor pada *latent heat storage* (LHS) dengan perluasan permukaan dapat dilakukan pemasangan sirip pada permukaan PCM. Sirip berfungsi sebagai meningkatkan laju transfer kalor pada PCM dan HTF. Pemilihan material juga berpengaruh terhadap konduktifitas termal, sehingga dibutuhkan material yang konduktifitasnya tinggi. Material yang memiliki konduktifitas tinggi antara lain *Graphite foil*, *Aluminium*, *Stainless steel*, *Carbon steel* dan *Copper*. Diantara material tersebut ada satu material yang nilai konduktifitasnya tinggi yaitu *copper*.

Alat penukar kalor pada penelitian ini adalah sebuah tangki yang di dalamnya berisi sekumpulan kapsul berbentuk silinder. Kapsul inilah yang berfungsi sebagai wadah *paraffin wax*. Aliran HTF hanya terjadi diluar kapsul, di dalam kapsul (*paraffin wax*) tetap (tidak mengalir). Besarnya perpindahan kalor yang terjadi akan berdampak pada perolehan energi termal yang disimpan oleh PCM. Salah satu parameter yang berpengaruh pada laju perpindahan kalor adalah kebutuhan luas permukaan. Luas permukaan perpindahan kalor berhubungan dengan jumlah kapsul yang harus disediakan di dalam tangki TES.

Kebutuhan luas permukaan kapsul dicari dengan menyamakan persamaan energi kalor yang terkandung didalam air panas (2.7) (Mettawee, 2006) dan perpindahan konduksi kalor pada proses *charging* (2.8) (Castell, 2008).

$$Q_w = m_w c_{pw} (T_f - T_i) \quad (2.7)$$

$$Q_{kond} = k_{PCM} \left\{ \frac{2\pi N_k L_{PCM}}{\ln \frac{D_k}{2 \times 0.002}} \right\} (T_k - T_{PCM,1/2}) \quad (2.8)$$

( $Q_w = Q_{konv}$ ).  $t$  adalah lama waktu pemanasan. Diperoleh persamaan luas kapsul :

$$A = \frac{m_w c_{pw} (T_f - T_i)}{h(T_\infty - T_k)t} \quad (2.9)$$

dimana

$m_w$  : massa air di dalam tangki (kg)

$C_{pw}$  : panas jenis air pada temperatur rata-rata (J/kg.C)

$T_f$  : temperatur air akhir di tangka ( $^{\circ}$ C)

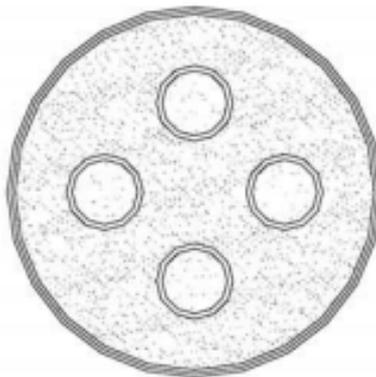
$T_i$  : temperatur air awal di tangka ( $^{\circ}$ C)

Untuk mengetahui temperatur air akhir di tangki dapat diketahui menggunakan persamaan (2.10) dengan asumsi  $Q_w = Q_{kol}$  berikut.

$$T_f = \frac{Q_{kol} t}{m_w c_{pw}} + T_i \quad (2.10)$$

b. *Multitubes* PCM

Penggunaan *multitube* PCM berfungsi meningkatkan laju transfer kalor. Tujuan penggunaan *multitube* PCM adalah mempertahankan perbedaan temperatur konstan secara menyeluruh di dalam tangki TES antara PCM dan HTF selama fase *charging* dan *discharging*, sehingga meningkatkan kinerja termal sistem LHS (Ibrahim dkk, 2017). *Multitubes* dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6. *Multitubes*, (Agiyenim, 2010)

c. Pengkapsulan PCM

Enkapsulasi PCM juga dapat diklasifikasikan dengan berbagai ukuran seperti enkapsulasi *microencapsulation* dan *macroencapsulation*. Kapsul PCM juga bermacam – macam bentuk seperti bola, silinder, tubular atau persegi panjang. *Macroencapsulation* adalah ukuran kapsul yang lebih besar dengan *paraffin wax* didalamnya, *paraffin wax* yang telah dienkapsulasi menunjukkan stabilitas termal dan struktural yang baik dan *thermal capacity storage* yang stabil. Sedangkan *microencapsulation* memiliki ukuran kapsul yang lebih kecil dan kekuatan mekanis *phase change material* (PCM) yang dienkapsulasi dapat diidentifikasi dengan rasio inti terhadap pelapisan. Peningkatan rasio inti terhadap rasio pelapisan dalam menurunkan kekuatan lapisan dan meningkatkan kemungkinan kebocoran *phase change material* (PCM) dari

enkapsulasi, sedangkan penurunan inti menjadi rasio lapisan dapat mengurangi jumlah *phase change material* (PCM) dalam enkapsulasi (Khan dkk, 2016)

Nadjib dkk ( 2015) meneliti sistem PATS yang di dalamnya berisi PCM diletakkan di dalam tangki air panas dengan volume 31,37 liter. PCM berupa *paraffin wax* yang dimasukkan dalam sekumpulan kapsul tembaga berbentuk silinder. PCM berjumlah 16 buah disusun segaris dengan massa total 8,95 kg. Hasil penelitian ini adalah *paraffin wax* dapat diintegrasikan dengan air sebagai material penyimpan energi termal dalam tangki PATS.