

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Jufrizal, dkk (2014) melakukan penelitian tentang studi eksperimental performansi *solar water heater* jenis kolektor plat datar dengan penambahan *thermal energy storage*. Salah satu tujuan penelitian yaitu untuk mengetahui kemampuan TES pada kolektor plat datar saat *charging*. Hasil dari penelitian mengemukakan bahwa pada proses *charging*, massa *paraffin wax* mengalami peleburan terbanyak sebesar 18,81 kg dengan efisiensi termal 44,28%. Selain SWH jenis plat datar terdapat SWH jenis lainnya, salah satunya adalah SWH jenis *thermosyphon*.

Nadjib dan Suhanan (2014) melakukan penelitian tentang perpindahan kalor pada tangki PATS dengan sistem *thermosyphon* dengan kapsul PCM pipa-banyak susunan segaris. Pengujian menggunakan air sebagai HTF dan *paraffin wax* sebagai PCM dengan kapsul PCM disusun secara *inline*. Respon dari uji sistem *thermosyphon* selama proses *charging* menunjukkan nilai rata-rata kecepatan transfer kalor yang tidak cukup berbeda untuk HTF dan PCM, dimana nilai rata-rata kecepatan transfer kalornya masing-masing 0,109°C/menit dan 0,108°C/menit. Selain itu, hasil pengujian juga menunjukkan bahwa nilai rata-rata temperatur kapsul bagian bawah pada tangki lebih rendah daripada nilai temperatur rata-rata HTF dengan selisih 2,57°C. Hal ini menandakan bahwa penyimpanan kalor pada kapsul PCM dibagian bawah tangki kurang optimal dan dengan kecepatan pemanasan rata-rata yang tidak jauh berbeda antara HTF dan PCM menandakan bahwa proses kalor berlangsung baik.

Khot dan Khanwalkar (2016) melakukan penelitian tentang sistem energi *storage* dengan material pengganti panas. Salah satu fokus penelitian ini adalah metode pengujian mengenai analisa performa sistem SHS. Hasil penelitian mengungkapkan bahwa kenaikan dan penurunan suhu penyimpanan tergantung dari laju aliran, suhu awal dan suhu HTF. Aliran HTF sangat mempengaruhi

koefisien perpindahan kalor, yang membuat pertukaran kalor lebih cepat dan mengurangi waktu *charging*.

Nadjib, dkk (2015) melakukan penelitian tentang studi eksperimental penyimpanan energi termal pada tangki pemanas air tenaga surya yang berisi PCM. Fokus penelitian ini adalah mengkaji penyimpanan energi termal pada tangki PATS secara eksperimental. Hasil penelitian ini mengemukakan bahwa dengan waktu proses *charging* 340 menit, kapasitas total terbesar penyimpanan energi termal PATS adalah 4,8 MJ dengan energi kumulatif terbesar adalah 3,97 MJ. Hal ini menunjukkan bahwa PCM pada PATS telah berfungsi sebagai penyimpan energi termal.

Lin, dkk (2016) melakukan penelitian tentang *evaluation of copper nanoparticles – paraffin wax compositions for solar thermal energy storage*. Penelitian ini berfokus pada sifat termal Cu-PCM. Hasil pengujian mengemukakan bahwa nilai konduktivitas termal Cu-PCM meningkat ketika Cu berukuran nano dicampurkan ke dalam PCM dengan peningkatan sebesar 14,0%, 23,9%, 42,5%, dan 46,3% untuk berat Cu 0,5%, 1,0%, 1,5%, dan 2,0%. Hal ini menunjukkan bahwa saat proses peleburan dan *solidification* suhu, Cu telah bertindak sebagai nukleasi untuk mengurangi efek pendinginan selama proses perubahan fase. Efisiensi yang dihasilkan dari Cu-PCM mengalami peningkatan 1,7% saat Cu dicampurkan dengan *paraffin wax* sebesar 1,0%.

Sharif, dkk (2014) melakukan penelitian tentang pemanas air tenaga surya menggunakan bermacam-macam jenis PCM. Salah satu PCM yang digunakan adalah *paraffin wax* hasil dari penelitian menunjukkan 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.

Studi tentang nanofluid yang dilakukan oleh Stephen, dkk (1995) yaitu penambahan tembaga fasa-nano kedalam HTF konvesial. Hasil penelitian diharapkan adanya perbedaan konduktivitas termal sebelum dan sesudah penambahan tembaga fasa-nano. Hasil penelitian menunjukkan dengan penambahan

nanophase tembaga dapat meningkatkan nilai konduktivitas termal dan mengurangi daya pertukaran panas secara signifikan.

Xiang-Qi (2007) melakukan penelitian tentang penggunaan nanomaterial pada fluida untuk meningkatkan perpindahan panas secara konveksi. Pada penelitian ini perpindahan panas konveksi dapat ditingkatkan dengan cara mengubah laju geometri dan meningkatkan konveksi termal fluida tersebut. Pencampuran nanomaterial pada fluida dapat meningkatkan konduktivitas termal, salah satu contoh nanomaterial yang digunakan pada penelitian adalah Cu.

Nadjib (2016) melakukan penelitian tentang penggunaan TES pada PCM. PCM yang digunakan adalah *paraffin wax* yang ditaruh pada kapsul, kemudian dipasang termokopel disisi *heat transfer fluid* (HTF) dan PCM. Kapsul menggunakan bahan tembaga adar dapat menghantarkan panas dengan baik. Hasil pengujian menunjukkan 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.

Xuan dan li (1999) melakukan penelitian tentang 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 hot wire. Hasil pengukuran menunjukkan kenaikan konduktivitas termal dengan penambahan fraksi volume dari partikel nanomaterial.

Tabel 2.1 Tinjauan Pustaka

Referensi	Judul	Hasil
Jufrizal, dkk (2014)	studi eksperimental performansi <i>solar water heater</i> jenis kolektor plat datar dengan penambahan <i>thermal energy storage</i>	proses <i>charging</i> , massa <i>paraffin wax</i> mengalami peleburan terbanyak sebesar 18,81 kg dengan efisiensi termal 44,28%
Nadjib dan Suhanan (2014)	Perpindahan kalor pada tangki PATs dengan kapsul PCM pipa-banyak susunan segaris.	Proses <i>charging</i> menunjukkan nilai rata- rata kecepatan transfer kalor yang tidak cukup berbeda untuk HTF dan PCM, rata-rata kecepatan transfer kalor masing-masing 0,109°C / menit 0,108°C / menit.
Khot dan Khanwalkar (2016)	Sistem energi <i>storage</i> dengan material pengganti panas.	Kenaikan dan penurunan suhu penyimpanan tergantung dari laju aliran, suhu awal dan suhu HTF. Aliran HTF mempengaruhi koefisien perpindahan kalor yang membuat pertukaran kalor lebih cepat dan mengurangi waktu <i>charging</i>

Tabel 2.2 Tinjauan Pustaka (lanjutan)

Referensi	Judul	Hasil
Nadjib, dkk (2015)	studi eksperimental penyimpanan energi termal pada tangki pemanas air tenaga surya yang berisi PCM	waktu proses <i>charging</i> 340 menit, kapasitas total terbesar penyimpanan energi termal PATS adalah 4,8 MJ dengan energi kumulatif terbesar adalah 3,97 MJ. Hal ini menunjukkan bahwa PCM pada PATS telah berfungsi sebagai penyimpan energi termal.
Lin, dkk (2016)	<i>Evaluation of copper nanoparticles – paraffin wax compositions for solar thermal energy storage</i>	Nilai konduktivitas termal Cu-PCM meningkatkan ketika Cu berukuran nano. Dan Cu telah bertindak sebagai nukleasi untuk mengurangi efek pendinginan selama proses perubahan fase
Sharif, dkk (2014)	pemanas air tenaga surya menggunakan bermacam-macam jenis PCM	PATS memiliki rata-rata efisiensi yang lebih tinggi dari integrated collector storage

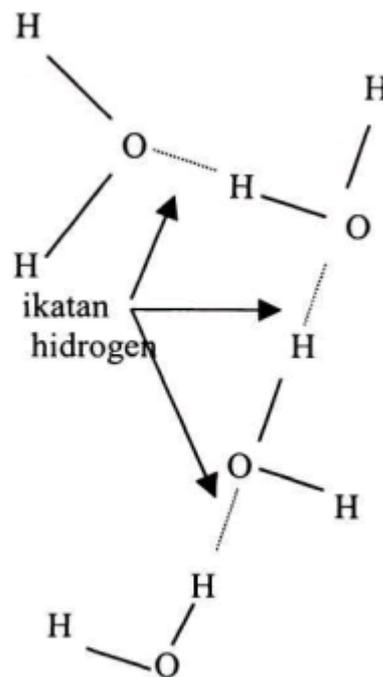
Tabel 2.3 Tinjauan Pustaka (lanjutan)

Referensi	Judul	Hasil
Stephen, dkk (1995)	penambahan tembaga fasa-nano kedalam HTF konvesial	penambahan nanophase tembaga dapat meningkatkan nilai konduktivitas termal dan mengurangi daya pertukaran panas secara signifikan
Xiang-Qi (2007)	penggunaan nanomaterial pada fluida untuk meningkatkan perpindahan panas secara konveksi	Pencampuran nanomaterial pada fluida dapat meningkatkan konduktivitas termal
Nadjib (2016)	penggunaan TES pada PCM. PCM yang digunakan adalah <i>paraffin wax</i> yang ditaruh pada kapsul, kemudian dipasang termokopel disisi <i>heat transfer fluid</i> (HTF) dan PCM	PCM mampu menahan penurunan efisiensi energi pada saat cahaya menurun atau tidak adanya cahaya matahari
Xuan dan li (1999)	transfer panas dengan mencampurkan nanomaterial dan fluida	kenaikan konduktivitas termal dengan penambahan fraksi volume dari partikel nanomaterial

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Air

Air merupakan senyawa kimia berbentuk cairan yang tidak berwarna, tidak berasa dan tidak berbau. Pada tekanan 1 atm air memiliki titik beku 0°C dan titik didih 100°C , dengan kerapatan $1,0\text{ g/cm}^3$ pada suhu 4°C (Chennel 2003). Wujud air dapat berubah dari cairan menjadi padat (es) atau gas (uap air). Air yang berwujud cairan memiliki elektrolit lemah, karena di dalamnya terkandung komposisi ion-ion yang sederhana, namun air juga memiliki sifat kimia yang unik karena adanya ikatan hidrogen yang terjadi antar molekul-molekul air (Susana, 2003) seperti pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2.1 Ikatan hidrogen dalam molekul air (Susana, 2003)

Air memiliki kalor penguapan yang tinggi dibandingkan dengan cairan lainnya, ketika dipanaskan proses penguapannya akan berlangsung lebih lambat dari cairan lainnya (Chenel, 2003). Terjadinya kalor penguapan yang tinggi pada air disebabkan karena kekuatan ikatan hidrogen di antara molekul air yang harus diputuskan, sehingga menyebabkan tingginya titik didih air yaitu mencapai 100°C (Susana, 2003). Selain itu air juga memiliki karakteristik yang umum dapat dilihat pada **Tabel 2.4**

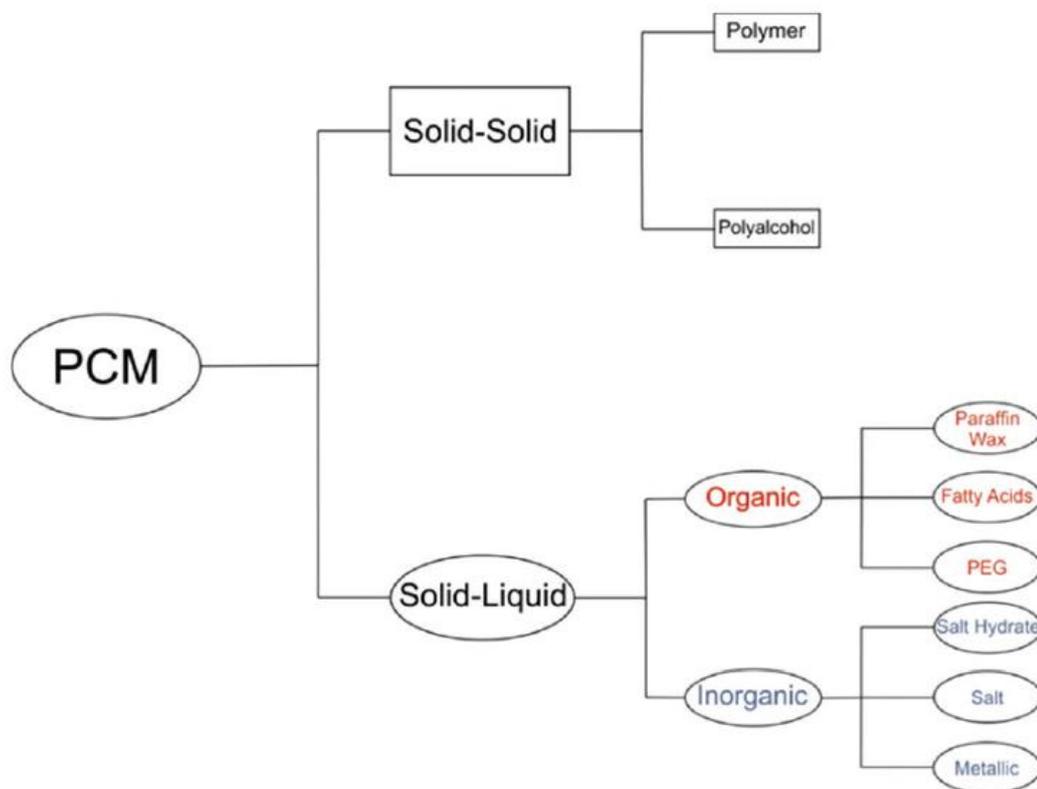
Tabel 2.4 *Properties air* (Cengel, 2003)

Air	
<i>Boiling point</i> (°C)	100
<i>Laten Heat of Vaporization</i> (kJ/kg)	2257
<i>Freezing Point</i> (°C)	0
<i>Laten Heat of Fusion</i> (kJ/kg)	333,7
Massa Jenis (kg/m ³)	1000
Kalor Jenis Spesifik pada suhu 25°C (J/kg.K)	4180
Konduktivitas Termal pada suhu 25°C (W/m.K)	0,607

2.2.2 Phase Change Materials

Perbedaan paling menonjol antara PCM dan media penyimpan panas konvensional adalah titik lelehnya, dimana titik leleh PCM berada pada rentang suhu kerja (Hasenohrl, 2009). Menurut Shchukina, dkk, *Phase change materials* atau PCM memiliki beberapa aplikasi yang dikelompokkan menjadi dua kategori yaitu pengaturan termal dan penyimpanan energi termal. Regulasi termal sangat penting, PCM dengan temperatur *melting* atau T_M dalam rentang yang

diizinkan pada aplikasinya dapat mencegah fluktuasi suhu tanpa input energi. Energi penyimpanan termal dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi tenaga surya terkonsentrasi dengan cara menggunakan PCM bersuhu tinggi dengan transisi suhu diatas 300°C yaitu memakai logam atau garam. Berdasarkan fase transisi spesifik yang dialami, PCM dapat dikalsifikasikan menjadi sublimasi dan penguapan yang memberikan kalor laten fusi tertinggi tetapi tidak praktis karena perubahan volume yang besar dan memerlukan penahan khusus untuk mencegah kerugian material. Kategori dari PCM dapat dilihat pada Gambar 2.2, dimana PCM padat-padat memiliki kalor laten fusi rendah dan dianggap tidak dapat diaplikasikan pada penggunaan yang praktis, sedangkan PCM padat-cair mampu memberikan keseimbangan yang baik antara kalor laten fusi dan perubahan volume. Kalor laten fusi pada PCM padat-cair nilainya lebih tinggi daripada PCM padat-padat dan perubahan volume pada PCM padat-cair dapat dikelola sesuai dengan kebutuhan.



Gambar 2.2 Kategori PCM (Shchukina, dkk, 2018)

Bahan PCM padat-padat mengubah struktur kristalnya pada suhu tertentu dan PCM jenis ini sangat mudah ditangani dan hemat biaya karena tidak ada cairan yang akan keluar dari kapsul, sedangkan PCM padat-cair dapat digunakan secara luas dalam aplikasi penyimpanan kalor laten karena tidak ada kesulitan ekspansi termal dan ekonomi dimana ekspansi tersebut kurang dari 10% dari volume aslinya. Kekurangan menggunakan PCM padat-cair adalah kompleksitas wadah, fase *segregasi* dan *subcooling*, serta konduktivitas termal yang rendah. Dengan demikian, hal tersebut membatasi ekstraksi dan penyimpanan energi dalam waktu terbatas dan juga mengalami pemborosan bahan PCM (Khot dan Khanwalkar, 2016). PCM padat-cair dibagi menjadi dua bagian yaitu bahan organik dan anorganik. PCM organik berupa *paraffin wax*, asam lemak, dan polietilen glikol (PEG), sedangkan PCM anorganik berupa garam hidrat, garam, dan logam. *Paraffin wax* merupakan alkana linear yang mengandung 8-40 atom karbon. *Paraffin* biasanya menampilkan LHS tambahan pada transisi bentuk padat-padat yang terkait dengan kristal yang berbeda fase. Kerugian menggunakan *paraffin wax* adalah konduktivitas termal rendah, bau tidak enak, mudah terbakar, dan biaya tinggi. *Paraffin wax* bukan energi terbarukan, karena *paraffin wax* merupakan hasil sulingan dari minyak bumi dengan bahan pemutih (Shchukina, dkk, 2018).

2.2.3 CU-PCM

Penerapan *phase change materials* (PCM) pada penyimpanan energi termal (TES) telah banyak dilakukan penelitian dengan kelebihan dan kekurangan yang dapat diaplikasikan pada SWH. Kekurangan dari PCM dapat ditanggulangi dengan nanopartikel logam dan non-logam dengan cara mencampurkan nanopartikel tersebut dengan PCM sehingga dapat meningkatkan sifat termal. Nanofiller yang dapat digunakan untuk meningkatkan sifat termal konduktivitas campuran adalah *carbon nanotubes* (CNT), *single wall carbon nanotubes* (SWCNT), *multiwalled carbon nanotubes* (MWCNT), dan *graphite nanofibers* (GNF).

2.2.4 Kalor

Kalor adalah salah satu bentuk energi yang dapat dipindahkan dari suatu tempat ketempat lainnya. Kalor dapat menyebabkan terjadinya perubahan tekanan, reaksi kimia, dan kenaikan suhu suatu zat. Kalor berpindah dari suatu permukaan yang bertemperatur tinggi ke yang temperaturnya rendah sehingga energi kalor suatu benda diindikasikan dengan temperatur benda tersebut (Alamsah, skripsi, 2016). Laju energi kalor dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$Q=m.c.\Delta T \quad (2.1)$$

$$Q = m.c.(T_2-T_1) \quad (2.2)$$

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 \quad (2.3)$$

dimana Q merupakan laju energi kalor (W), m merupakan masa benda (kg), c merupakan kalor jenis benda (J/kg.°C), ΔT merupakan perubahan suhu pada benda (°C), T_2 merupakan suhu akhir benda dan T_1 merupakan suhu awal benda (°C)(Alamsah, skripsi, 2016). Kapasitas kalor suatu zat adalah banyaknya kalor yang diserap atau dilepaskan untuk menaikkan atau menurunkan suhu 1°C. Maka kapasitas kalor dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (2.4)$$

$$\dot{Q} = \frac{\Delta Q}{t} \quad (2.5)$$

$$\text{Laju kenaikan suhu} = \frac{\Delta T}{t}.3600 \quad (2.6)$$

dimana C merupakan kapasitas kalor (kal/°C), ΔQ merupakan kalor yang diperlukan atau dilepas (J atau kal) dan ΔT merupakan perubahan suhu benda (°C), t merupakan waktu total (jam) (Rizkianawati, 2015). Energi yang di *transfer* ini disebut perpindahan panas (Cengel, 2003). Perpindahan panas umumnya terjadi secara konduksi, konveksi, dan radiasi.

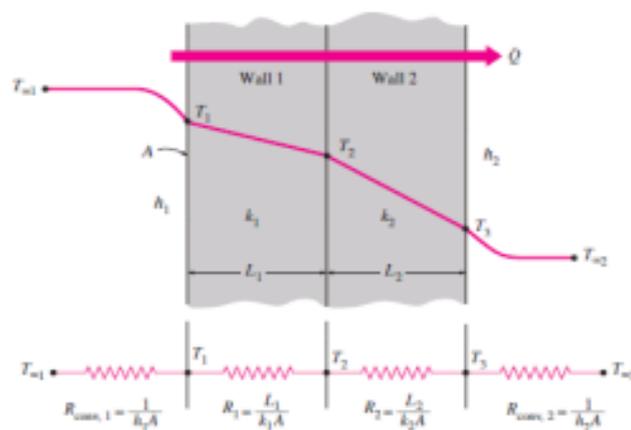
1. Perpindahan Panas konduksi

Perpindahan panas konduksi adalah perpindahan energi dari partikel yang memiliki energi lebih besar ke energi yang lebih rendah dan terjadi interaksi antar partikel yang membuat bagian zat itu tidak berpindah (Cengel, 2003). Laju perpindahan panas konduksi dapat dinyatakan dengan Hukum Fourier :

$$Q = -k.A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.7)$$

dimana Q merupakan laju perpindahan panas (Watt), k merupakan konduktivitas termal (W/m.K), A merupakan luas penampang yang terletak pada aliran panas (m^2) dan $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ merupakan perubahan atau perbedaan temperatur ($^{\circ}C$) (Ginting, 2018).

Skema perpindahan panas secara konduksi dapat dilihat pada **Gambar 2.3**.



Gambar 2.3 Skema perpindahan panas secara konduksi (Cengel,2002)

2. Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan panas konveksi adalah transfer energi antara permukaan padat dan fluida yang bergerak yang mengakibatkan efek kombinasi konduksi dan fluida bergerak (Saferi, 2018). Fluida dapat berupa fasa cair atau fasa gas, syarat utama pada perpindahan panas secara konveksi adalah adanya aliran fluida (Wirawan, dkk, 2015). Perpindahan panas konveksi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.8)$$

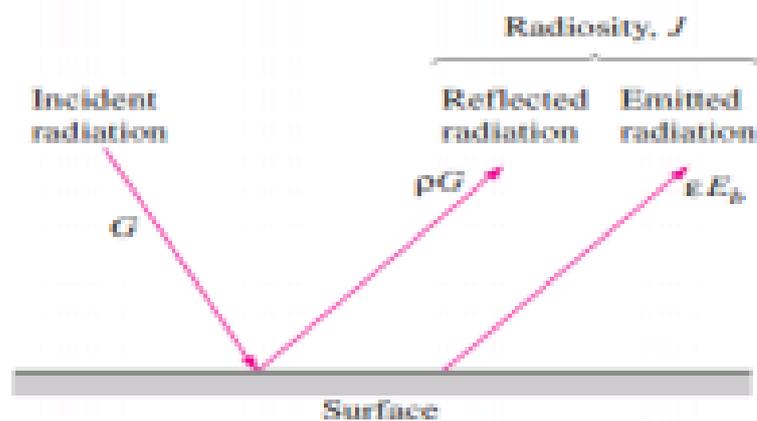
dimana Q merupakan laju perpindahan panas konveksi (W), h merupakan koefisien perpindahan panas konveksi ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), A merupakan luas penampang (m^2), dan ΔT merupakan perubahan atau perbedaan temperatur ($^{\circ}\text{C}$).

3. Perpindahan Panas Radiasi

Perpindahan panas radiasi adalah perpindahan panas dari benda yang bertemperatur tinggi ke benda yang bertemperatur rendah tanpa bantuan perantara. Hal ini sangat jauh berbeda dengan mekanisme konduksi dan konveksi, radiasi tidak perlu medium perpindahan panas (Wirawan, dkk, 2015). Perpindahan panas radiasi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$Q = \sigma \cdot A (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.9)$$

dimana Q merupakan laju perpindahan panas radiasi (W), σ merupakan konstanta Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$), A merupakan luas permukaan (m^2), T_1 dan T_2 merupakan temperatur permukaan 1 dan 2 (K) (Ginting, 2018). Skema perpindahan panas radiasi dapat dilihat pada **Gambar 2.4**.



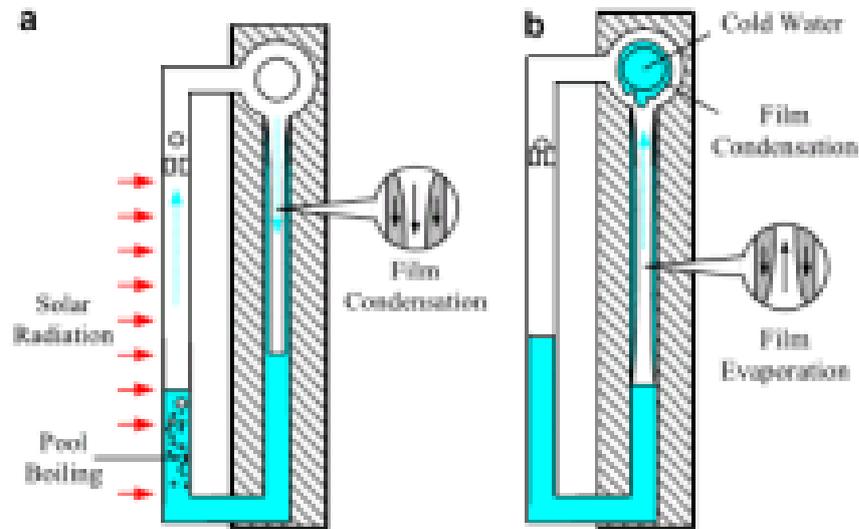
Gambar 2.4 Skema perpindahan panas radiasi (Cengel, 2002)

2.2.5 Solar Water Heater (SWH)

SWH merupakan alat yang menghasilkan air panas termurah dan efektif untuk kebutuhan rumah tangga dan komersial dibandingkan dengan pemanas air dengan sumber energi lainnya (Jufrizal, dkk, 2014). SWH menggunakan energi surya sebagai sumber energi untuk memanaskan air, SWH memiliki tangki berfungsi untuk menyimpan energi termal yang disimpan di air sebagai energi termal sensibel (Sidopekso, 2011). SWH memanfaatkan kolektor plat datar dan terdapat pipa-pipa aliran fluida, yang berfungsi mengalirkan fluida yang akan dipanaskan serta isolasi untuk mengurangi kerugian konduksi ke lingkungan (Sudrajat dan Irfan, 2014).

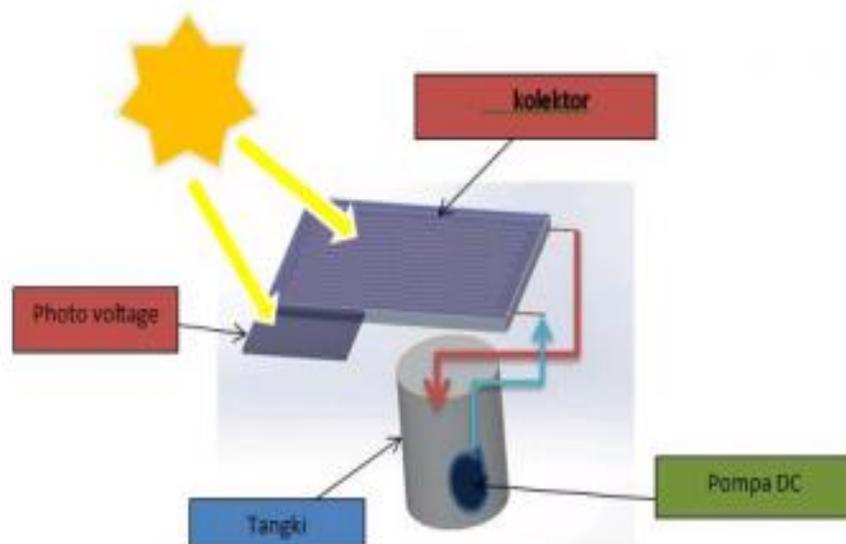
Sistem alat SWH terbagi menjadi sistem natural dan sistem paksa (pompa) menurut cara fluida bersirkulasi. Sistem paksa SWH merupakan transfer zat dari energi surya menjadi energi panas. Menurut Anyanwu, dkk (2009) sistem paksa lebih mahal dari sistem natural karena menggunakan tambahan katup dan pompa listrik yang bertujuan untuk mengalirkan air panas melalui kolektor. Sedangkan sistem SWH natural lebih umum digunakan untuk aplikasi domestik, sistem SWH natural mentransfer kalor melalui peredaran alami suhu antara dua zat yang memiliki perbedaan kalor sehingga tidak membutuhkan alat bantu. Berdasarkan cara fluida menyerap panas dapat dibedakan menjadi alat pemanas surya sistem langsung dan tidak langsung (Ceylan, I, 2011).

Berdasarkan cara kerja, SWH terbagi menjadi beberapa jenis yaitu SWH termosifon (pasif) dan SWH aktif. Menurut Jansen (1995) SWH paling sederhana tetapi paling efektif adalah SWH termosifon (pasif), karena hanya terdiri dari tangki penyimpanan yang ditempatkan pada bagian atas kolektor. Cara kerja dari SWH pasif ini adalah fluida pada kolektor akan dipanaskan oleh radiasi matahari, karena perbedaan massa jenis maka fluida panas akan bergerak ke arah tangki dan fluida dingin dari tangki akan turun. **Gambar 2.5** menunjukkan SWH termosifon (pasif).



Gambar 2.5 SWH termosifon (pasif) [chen, B,2009].

SWH aktif didefinisikan sebagai sistem pemanas air yang memerlukan energi tambahan (pompa) untuk memindahkan air menuju kolektor hingga air menjadi hangat (Saferi dan Ginting, 2018). Pompa dapat bergerak dari energi listrik maupun dari energi matahari. **Gambar 2.6** menunjukkan SWH aktif.



Gambar 2.6 SWH aktif (Saferi, Ginting, 2018)

2.2.6 Thermal Energi Storage (TES)

TES merupakan salah satu teknologi yang digunakan sebagai penyimpan energi termal yang berasal dari panas. TES harus memiliki beberapa unsur penting seperti efisiensi, aman, harga yang relatif murah, serta kapasitas penyimpanan energinya tinggi (Dincer, dkk, 2011). Menurut Cabeza, dkk (2011) pengaplikasian TES sendiri terdiri dari tiga siklus yaitu *charging*, *discharging* dan *storage*. TES mampu menyimpan energi termal ke dalam tiga bentuk yaitu *sensible heat storage*, *latent heat storage*, dan *thermochemical* (Benanto dan Stoppato 2017).

2.2.7 Sensibel Heat Storage (SHS)

SHS merupakan energi termal yang tersimpan didalam sistem yang ditandai dengan perubahan temperatur pada material penyimpan energi. SHS memiliki keunggulan yaitu harganya yang murah. SHS memiliki *density energy* paling rendah diantara ketiga *storage* dikarenakan SHS memerlukan *volume storage* yang besar dan terjadi *heat loss* yang sangat merugikan sebagai material penyimpan energi (Sharma, 2009). SHS menggunakan media cair sebagai penyimpan energi seperti air dan minyak, sedangkan media padat SHS menggunakan material seperti logam. Besarnya energi SHS dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \cdot c_p \cdot \Delta T = m \cdot c_{ap} \cdot (T_f - T_i) = \rho \cdot V \cdot c_{ap} \cdot (T_f - T_i) \quad (2.10)$$

dimana T_i merupakan temperatur awal dan T_f merupakan temperatur akhir ($^{\circ}\text{C}$), m merupakan massa material penyimpan (kg), c_{ap} merupakan kalor jenis rata-rata material penyimpan saat proses ($\text{J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$), ρ merupakan massa jenis (kg/m^3) dan V merupakan volume material (m^3) (Sharma, 2019).

2.2.8 Laten Heat Storage (LHS)

LHS memanfaatkan perubahan fase suatu material dari padat ke cair atau cair ke padat merupakan tanda penyerapan atau pelepasan energi terjadi pada sistem ini. Penyerapan atau pelepasan energi yang dilakukan selama *charging* atau

discharging pada LHS mampu memindahkan energi dalam jumlah yang cukup besar, hal ini dapat dimanfaatkan untuk melakukan penyimpanan energi pada waktu tertentu pada saat sumber utama berkurang (Putra, dkk, 2015). Perubahan fase *liquid-solid* lebih banyak digunakan sebagai *energy storage* dibandingkan fase *liquid-vapor*, dikarenakan volume pada *liquid-solid* lebih kecil untuk menghasilkan energi yang besar (Iqbal, dkk, 2014). Besarnya energi yang dihasilkan LHS dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$Q = m \left[\int_{T_A}^{T_D} c_{p,a}(T) \Delta T + L_p + L + \int_{T_E}^{T_F} c_{p,l}(T) \Delta T + L_g + \int_{T_G}^{T_H} c_{p,g}(T) \Delta T \right] \quad (2.11)$$

dimana m merupakan massa material (kg), $c_{p,s}$ merupakan kalor jenis material fase padat (kJ/kg. °C), $c_{p,l}$ merupakan kalor jenis material fase cair (kJ/kg. °C), $c_{p,g}$ merupakan kalor jenis material fase gas (kJ/kg. °C), L_p merupakan kalor laten perubahan padat-padat (kJ/kg), L merupakan perubahan fase padat-cair (kJ/kg), dan L_g merupakan perubahan fase cair-gas (kJ/kg) (Regin, dkk, 2008)

2.2.9 Thermochemical

Thermochemical merupakan penyimpanan dan pelepasan energi yang memanfaatkan reaksi kimia, dan bagian pengembangan teknologi baru dalam bidang penyimpanan energi termal. *Thermochemical* menggunakan reaksi termokimia untuk *charging* dan *discharging*, *reversible reaction* adalah bagian yang paling berperan penting untuk penyimpanan energi dan pelepasan energi terjadi ketika reaksi tersebut berbalik (Iqbal, dkk, 2014). *Thermochemical* memiliki *energy density* yang tinggi, tetapi sistem ini memerlukan *catalyst* untuk melepas energi dan mengontrol reaksi termokimia hal ini tidak diinginkan dalam penyerapan atau pelepasan energi.