

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Ogueke, dkk (2009) melakukan review sistem SWH. Salah satu sistem SWH yang dibahas adalah termosifon. Hasil review mengungkapkan bahwa termosifon dengan loop tertutup memiliki performa yang lebih baik daripada termosifon dengan loop terbuka. Termosifon dengan loop tertutup cocok digunakan untuk wilayah dengan suhu dingin. Selain itu, SHWS memiliki potensi yang sangat tinggi untuk berkontribusi secara signifikan terhadap pasar untuk memenuhi kebutuhan air panas karena efisiensi rata-rata kolektor yang dikategorikan baik.

Pengujian kapasitas tangki penyimpanan kalor dan efisiensi kolektor pada PATS dilakukan oleh Fachrizal dan Rivai (2005). Metode pengujian kapasitas penyimpan kalor yang digunakan adalah uji termosifon menggunakan kolektor surya dengan nilai temperatur maksimal dan minimal tangki sebagai rujukan kemampuan tangki menyimpan panas. Respon dari uji termosifon menghasilkan temperatur maksimal yang didapat pada tangki terjadi pada pertengahan hari dimana hasil persentase penurunan temperatur tangki sebesar 10,4%. Hal tersebut menandakan bahwa rugi-rugi termal pada tangki masih besar. Nilai efisiensi rata-rata kolektor yang didapat sebesar 44,02%. Hasil pengujian ini dapat dikategorikan baik. Energi panas yang tersimpan pada SWH memiliki tiga tipe, salah satunya SHS. Material yang digunakan sebagai SHS sangat bervariasi.

Senthusundaram, dkk (2016) melakukan penelitian tentang pemilihan bahan penyimpanan panas SHS murah untuk tangki SWH rumah tangga. Bahan yang digunakan untuk penelitian terbagi menjadi dua, yaitu bahan penyimpan panas sensibel konvensional dan garam anorganik. Bahan yang digunakan sebagai penyimpan panas sensibel konvensional adalah air, pasir, dan kerikil sedangkan untuk penyimpan panas sensibel garam anorganik adalah *potassium chloride*, *sodium chloride*, *iodized sodium chloride*, *zinc chloride*, dan *carbamide*. Hasil penelitian

mengemukakan bahwa kinerja bahan penyimpan panas sensibel konvensional lebih baik daripada garam anorganik. Sehingga performa sistem SHS konvensional dan SHS garam anorganik berbeda-beda.

Nandgaonkar dan Shrikant (2017) melakukan percobaan mengenai analisa performa sistem SHS. Salah satu parameter yang dibahas adalah *charging* dan *discharging*. Media penyimpan panas yang digunakan adalah air. Hasil penelitian mengungkapkan bahwa kenaikan atau penurunan suhu penyimpanan tergantung pada suhu HTF, laju aliran, dan suhu awal. Peningkatan laju aliran HTF meningkatkan koefisien perpindahan kalor keseluruhan, sehingga memungkinkan pertukaran kalor lebih cepat dan mengurangi waktu *charging*. Penelitian pada solar kolektor menggunakan air sudah banyak dilakukan, seperti penelitian yang dilakukan oleh Nurfadhilah (2019), Rouhillah (2018), dan Ocsirendi, dkk (2018).

Nurfadhilah (2019) melakukan penelitian tugas akhir tentang performa pemanas air kolektor tabung dengan penambahan selubung transparan. Salah satu fokus penelitian adalah pengaruh selubung transparan terhadap temperatur *outlet* air. Hasil penelitiannya mengemukakan bahwa pada proses *charging* temperatur *outlet* air lebih besar dari kolektor dengan *glass tube* atau selubung transparan karena panas yang diserap kolektor dengan *glass tube* lebih kecil dari kolektor tanpa *glass tube*, sedangkan pada saat *discharging* temperatur *outlet* lebih besar dari kolektor tanpa *glass tube*.

Selain itu, Rouhillah (2018) melakukan penelitian tugas akhir tentang analisis performa kolektor surya dengan *parabolic concentrator* pada SWH. Salah satu fokus penelitian adalah pengaruh laju aliran massa terhadap temperatur *outlet*. Hasil penelitian mengemukakan bahwa temperatur *outlet* dipengaruhi oleh laju aliran massa, sehingga semakin besar laju aliran massa maka semakin tinggi temperatur *outlet*.

Sementara itu, Ocsirendi, dkk (2018) melakukan penelitian tentang rancang bangun SWH dengan kolektor pelat datar berbentuk spiral berbasis mikrokontroler. Penelitian ini berfokus pada metode sirkulasi air secara kontinu dan bertahap. Hasil

penelitian mengemukakan bahwa dalam hal efektifitas pemanas air, metode kontinyu lebih baik daripada metode bertahap. Selain itu, dengan menggunakan metode kontinyu menyebabkan konsumsi daya listrik semakin besar karena pompa terus menyala. Efektifitas pemanas air menyebabkan perpindahan panas.

Suswanto, dkk (2015) melakukan penelitian tentang perpindahan panas pada *heat exchanger double* pipa dengan sirip berbentuk siku empat. Salah satu fokus yang dibahas dalam penelitian ini adalah penurunan suhu dengan jumlah sirip yang berbeda. Hasil dari penelitian tersebut adalah nilai penurunan suhu terhadap jumlah sirip mengalami peningkatan dengan bertambahnya jumlah sirip. Jadi jika tidak ada sirip, maka penurunan suhu akan kecil. Jika jumlah siripnya ditambah menjadi 4 maka penurunan suhunya akan lebih cepat dari penurunan suhu tanpa sirip. Penurunan suhu yang tercepat ketika jumlah sirip ditambah menjadi 8. Perpindahan panas memiliki tiga jenis, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi.

Yunianto (2008) melakukan pengujian tentang perpindahan panas konveksi pada *heat sink* jenis *extruded*. Salah satu fokus pengujian yang dilakukan adalah pengaruh kecepatan aliran fluida pendingin terhadap temperatur. Hasil penelitian ini mengemukakan bahwa semakin besar kecepatan fluida pendingin maka temperatur akan semakin rendah dan gradien suhu akan semakin besar. Hal tersebut dapat terjadi karena adanya intensitas turbulensi yang tinggi akibat kecepatan aliran fluida pendingin. Selain mempengaruhi penurunan suhu, kecepatan aliran fluida juga mempengaruhi laju perpindahan kalor.

Titahelu (2010) melakukan penelitian terhadap analisis pengaruh kecepatan fluida panas aliran searah terhadap karakteristik *heat exchanger shell and tube*. Salah satu fokus pada penelitian ini adalah laju perpindahan kalor. Hasil dari pengujian ini adalah dengan temperatur masuk yang konstan nilai laju perpindahan kalor besar karena kecepatan masuk fluida besar. Jadi, semakin besar kecepatan masuk fluida maka akan semakin besar laju perpindahan kalor dan semakin kecil kecepatan masuk fluida maka akan semakin kecil laju perpindahan kalor. Selain kecepatan aliran fluida, penurunan suhu juga dipengaruhi oleh debit air.

Mirmanto, dkk (2016) melakukan pengujian tentang pengaruh debit terhadap unjuk kerja alat penukar kalor dan penurunan suhu ruangan. Salah satu fokus yang dibahas mengenai pengaruh debit aliran terhadap penurunan suhu. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa suhu air keluar dipengaruhi oleh debit aliran dan tidak dipengaruhi oleh bentuk alat penukar kalor. Dimana saat debit air ditingkatkan maka penurunan suhu akan meningkat juga. Sehingga semakin besar debit air maka penurunan suhu semakin cepat dan semakin kecil debit air maka penurunan suhu akan semakin lambat.

2.2. Landasan Teori

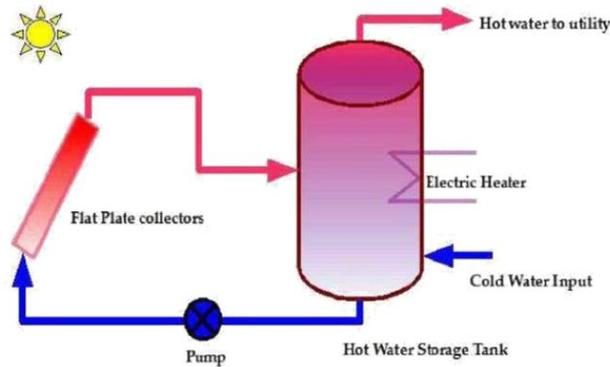
2.2.1. Solar Water Heater

Solar water heater (SWH) merupakan sistem yang menggunakan energi matahari untuk menghasilkan air panas. Saat ini, teknologi SWH yang digunakan telah berkembang dan dapat dengan mudah diimplementasikan dengan biaya murah (Ogueke dkk, 2009). SWH digunakan untuk mengurangi jumlah air yang harus dipanaskan oleh sistem pemanas air konvensional dan menggantikan bahan bakar fosil atau listrik menjadi energi terbarukan. Sistem SWH memiliki dua bagian utama, yaitu kolektor surya dan tangki penyimpanan (Jafar dan B. Sivaraman, 2017). Selain itu, SWH memiliki pipa-pipa penghubung yang berfungsi sebagai penghubung kolektor surya dan tangki penyimpanan (Muhammad, skripsi, 2018). Sistem SWH dibagi menjadi dua jenis yaitu sistem aktif dan sistem pasif.

2.2.1.1. Sistem Aktif SWH

Sistem aktif SWH memiliki kolektor, perangkat penyimpanan, dan transfer fluida dari energi matahari menjadi energi panas dimana input energi matahari digunakan untuk transfer energi termal. Sistem ini menggunakan pompa listrik, katup, dan pengontrol untuk mengalirkan air atau transfer cairan panas lainnya

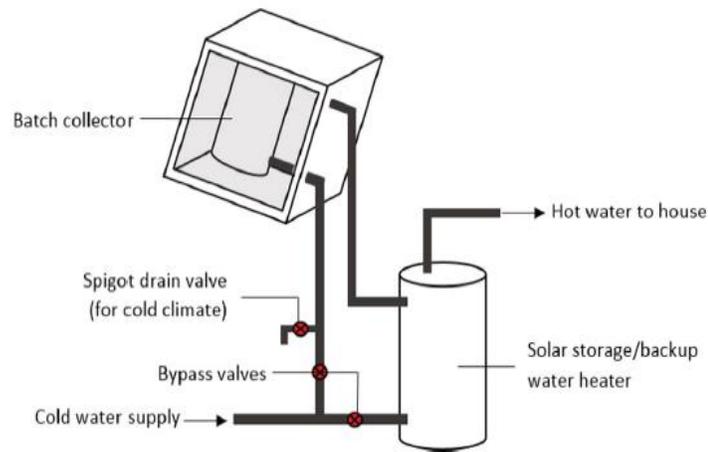
melalui kolektor seperti pada Gambar 2.1, sehingga sistem ini menjadi lebih mahal namun lebih efisien (Ogueke dkk, 2009).



Gambar 2.1 Sistem Aktif SWH (Rouhillah, skripsi, 2018)

2.2.1.2. Sistem Pasif SWH

Sistem pasif SWH merupakan pemanas air tenaga matahari yang paling umum digunakan untuk aplikasi pada rumah tangga dan telah dirancang serta diteliti oleh peneliti yang berbeda-beda. Umumnya, sistem SWH ini mentransfer kalor melalui sirkulasi alami sebagai akibat gaya apung karena perbedaan suhu antara dua zat sehingga tidak membutuhkan pompa saat proses berlangsung seperti pada Gambar 2.2. Saat proses berlangsung, sistem ini bisa menjadi loop terbuka (langsung) atau loop tertutup (tidak langsung). Sistem loop terbuka mensirkulasikan air melalui kolektor sedangkan sistem loop tertutup menggunakan fluida transfer kalor untuk mengambil energi surya dari kolektor surya dan kemudian mentransfernya ke tangki penyimpanan yang berisi air. Sistem ini terbagi menjadi dua, yaitu sistem *thermosyphon* dan sistem *integrated collector storage* (ICS). Namun, tipe loop terbuka dan tertutup hanya dapat diterapkan pada sistem *thermosyphon* (Ogueke dkk, 2009).



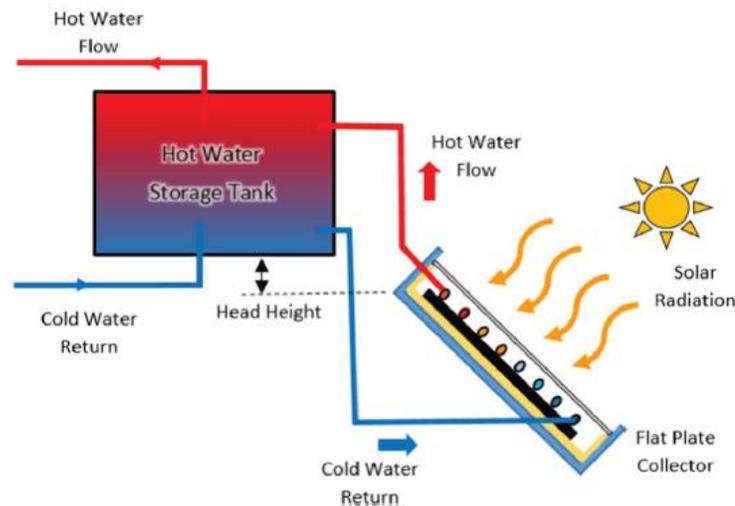
Gambar 2.2 Sistem Pasif SWH (Jamar dkk, 2016)

a. *Thermosyphon*

Sistem jenis ini menggunakan metode pemisahan komponen SWH agar energi surya yang dihasilkan dan disimpan maksimal, biasanya tangki ditempatkan lebih tinggi dari kolektor surya seperti pada Gambar 2.3. *Thermosyphon* dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu *thermosyphon* dengan *phase change materials* (sistem dua fase) dan *thermosyphon* tanpa *phase change materials* (sistem fase tunggal).

Thermosyphon dengan *phase change materials* merupakan tipe *loop* tidak langsung yang menggunakan bahan perubah fase untuk menyimpan kalor antara kolektor surya dan air yang dipanaskan. Pemanasan dilakukan dengan memanfaatkan penguapan cairan kondensasi kalor laten. Di kolektor, perpindahan kalor fluida atau zat pendingin pada beberapa kasus mengambil kalor lalu menguap. Kemudian mengalir ke tangki dengan efek gaya apung dan kehilangan kalor laten karena menguap ke air dan selanjutnya berubah menjadi cair dan kembali ke kolektor dengan efek gravitasi. *Thermosyphon* tanpa *phase change materials* merupakan tipe *loop* langsung. Air yang dipanaskan bersikulasi antara kolektor surya dan tangki yang letak tangkinya lebih tinggi dari kolektor surya. Transfer energi antara kolektor dan

tangki terjadi secara konveksi alami karena gaya apung yang diinduksi aliran molekul air (Ogueke dkk, 2009).



Gambar 2.3 Sistem *Thermosyphon* (Jamar dkk. 2016)

b. *Integrated Collector Storage*

Sistem ini termasuk kategori pemanas air tenaga surya pasif dengan ciri-ciri memiliki kolektor dan tangki penyimpanan dalam satu komponen (Ogueke dkk, 2009). Desainnya bervariasi, terdiri dari beberapa tangki logam yang berfungsi untuk menyerap energi panas pada permukaan yang terbuka serta memiliki desain yang tertutup dalam kotak yang terisolasi dengan penutup transparan di atas untuk menerima radiasi matahari (Jamar dkk, 2016). ICS digunakan pada kebutuhan domestik, pertanian, dan industri karena lebih ekonomis. Tetapi *heat loss* pada komponen ICS lebih cepat terjadi, maka insulasi tidak dapat dipasang diseluruh komponen ICS (Muhammad, skripsi, 2018).

2.2.2. Thermal Energy Storage

Thermal energy storage (TES) merupakan penyimpanan sementara energi panas dalam bentuk zat panas atau dingin untuk pemanfaatan selanjutnya. TES juga merupakan teknologi signifikan dalam sistem yang melibatkan energi terbarukan serta sumber daya energi lainnya karena sistem operasinya lebih efisien. TES bermanfaat untuk menyeimbangkan antara pasokan dan permintaan energi, sehingga TES berperan penting dalam meningkatkan kontribusi berbagai jenis energi terbarukan dalam lingkup energi daerah dan negara (Socaciu, 2011). TES mencakup banyak teknologi dimana energi panas yang tersimpan memiliki tiga tipe, yaitu *sensible heat storage* (SHS), *latent heat storage* (LHS), dan *thermochemical heat storage* (Stoppato dan Alberto, 2017).

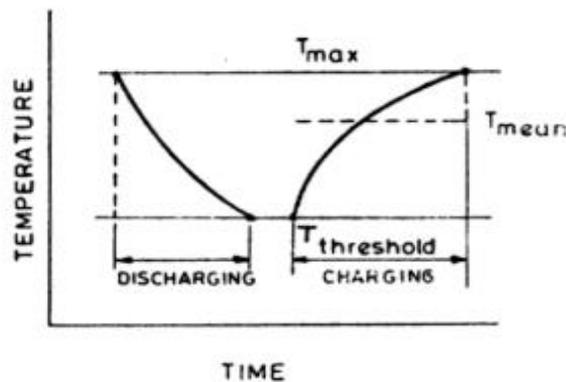
2.2.2.1. Sensible Heat Storage

Sensible heat storage (SHS) menyimpan energi dengan mengubah suhu menjadi media penyimpanan yang biasanya berupa air, batu, tanah, dan lain-lain (Socaciu, 2011). Dalam hal ini, jumlah energi yang tersimpan sebanding dengan perbedaan suhu (Stoppato dan Alberto, 2017). Sistem ini umumnya lebih sederhana dari sistem penyimpanan panas lainnya, tetapi memiliki kekurangan yaitu memiliki ukuran yang lebih besar dan tidak dapat menghantarkan energi panas pada suhu konstan (Socaciu, 2011). SHS memiliki dua keunggulan utama yaitu murah dan tidak memiliki resiko terkait dengan penggunaan bahan beracun. Sistem SHS memanfaatkan kapasitas panas dan perubahan suhu sebagai media penyimpan panas selama proses *charging* dan *discharging*. Jumlah panas yang disimpan tergantung pada kalor jenis, perubahan suhu, dan jumlah bahan penyimpan, yang dapat dihitung dengan persamaan 2.1.

$$Q_s = \int_{t_i}^{t_f} mc_p dt = mc_p(t_f - t_i) \quad (2.1)$$

dimana Q_s jumlah panas yang disimpan dalam *Joule*, massa media penyimpan panas (m) dalam kg, kalor jenis (c_p) dalam $J/(kg.K)$, temperatur awal (t_i) dan temperatur akhir (t_f) dalam $^{\circ}C$ (Sarbu dan Calin, 2018).

Charging time merupakan waktu yang diperlukan untuk menyimpan energi pada volume rata-rata tangki hingga kenaikan suhu mencapai ΔT yang ditentukan (Nandgaonkar dan Shrikant, 2017). Selama proses *charging*, suhu pada material SHS akan terus meningkat (Garg dkk, 2012). *Discharging time* merupakan waktu yang diperlukan oleh material SHS untuk mencapai suhu T_{inlet} (Nandgaonkar dan Shrikant, 2017). Pada proses *discharging*, suhu pada material SHS turun hingga mencapai suhu T_{inlet} (Garg dkk, 2012). Tetapi pada waktu tertentu, penurunan suhu pada material SHS tidak signifikan terutama ketika suhunya mendekati suhu T_{inlet} . Dengan demikian, waktu efektif untuk *discharging time* yaitu ketika awal terjadinya *discharging* sampai penurunan suhu signifikan (Nandgaonkar dan Shrikant, 2017). Proses diatas dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Ilustrasi *Charging* dan *Discharging Time* (Garg dkk, 2012)

2.2.2.2. *Latent Heat Storage*

Latent heat storage (LHS) menyimpan energi melalui perubahan fase seperti air atau es sebagai penyimpan dingin dan panas untuk melelehkan paraffin wax (Socaciu, 2011). Dalam hal ini, suhu tetap konstan dan energi yang disimpan tergantung pada panas laten fusi material (Stoppato dan Alberto, 2017). Perubahan fase pada LHS melibatkan kepadatan penyimpanan yang lebih tinggi daripada SHS. Meski begitu, LHS memiliki beberapa hambatan seperti konduktivitas termal bahan rendah dan stabilitas masih perlu diatasi (Molina dkk, 2019). Keuntungan menggunakan LHS dibandingkan SHS adalah kapasitas untuk menyimpan kalornya hampir sama dengan *range* suhu. Awalnya, bahan-bahan penyimpan kalor bertindak seperti SHS karena suhu naik secara linear. Kemudian, kalor diserap atau dilepaskan pada suhu yang hampir konstan dengan perubahan kondisi fisik bahan penyimpan kalor. Pada dasarnya LHS menyerap atau melepas kalor ketika bahan penyimpan kalor berubah fasa dari padat ke cair atau cair ke gas atau sebaliknya (Sarbu dan Calin, 2018).

2.2.2.3. *Thermochemical Heat Storage*

Penyimpanan panas berdasarkan reaksi kimia ini memiliki kapasitas termal lebih tinggi dari SHS. Tetapi, sistem penyimpanan panas ini belum layak dari sudut pandang komersial, penelitian, dan pengembangan karena perlu dilakukan pemahaman lebih dan rancangan teknologi lebih untuk menyelesaikan aspek praktis lainnya sebelum implementasi komersial dapat terjadi (Socaciu, 2011). Jika panas disimpan sebagai senyawa kimia yang dibuat oleh reaksi endotermik dan dipulihkan kembali dengan menggabungkan kembali senyawa dalam reaksi eksotermik, maka energi yang disimpan setara dengan panasnya reaksi (Stoppato dan Alberto, 2017). Penyimpanan panas sistem ini melibatkan berbagai proses seperti proses penyerapan, yang terdiri dari fiksasi atau penangkapan gas reaktif dengan zat terkondensasi, baik padat ataupun cairan (Molina dkk, 2019).

2.2.3. Air

Air merupakan sumber daya alam yang menutupi permukaan bumi sebanyak 70% (Effendi, 2003). Air adalah senyawa kimia dengan bentuk berupa cairan tidak berwarna, tidak memiliki bau, dan tidak memiliki rasa (Susana, 2003). Air termasuk senyawa kimia yang sangat dibutuhkan untuk kelangsungan hidup yang tidak bisa digantikan oleh senyawa kimia lainnya (Fajarini, 2014). Air memiliki karakteristik yang khas, yaitu :

- a. Perubahan suhu cenderung lama, hal ini mengakibatkan air berfungsi sebagai penyimpan panas yang baik.
- b. Air memerlukan energi panas yang besar untuk melakukan proses penguapan atau evaporasi. Untuk proses kondensasi, energi panas yang dilepaskan sangat besar.
- c. Sebagai pelarut yang baik.
- d. Tegangan permukaan tinggi, hal ini menyebabkan air mampu bergerak di pipa kapiler.
- e. Dapat merenggang ketika membeku.

Selain itu air memiliki karakteristik umum seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 *Properties* Air (Cengel, 2003)

Air	
Boiling Point (°C)	100
Laten Heat of Vaporization (kJ/kg)	2257
Freezing Point (°C)	0
Laten Heat of Fusion (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

2.2.4. Kalor

Kalor merupakan cara berpindahnya energi yang mampu menyebabkan perubahan suhu (Alamsah, skripsi, 2016). Kalor bisa berpindah dari benda panas ke benda dingin. Satuan kalor yaitu kalori (kal) yang dapat didefinisikan sebagai banyaknya kalor yang dibutuhkan untuk menaikkan 1 gram air selama 1°C. Banyaknya kalor yang dibutuhkan untuk mengalami perubahan suhu sebanding dengan massa dan perubahan suhunya (Kholifudin, 2017), seperti pada persamaan berikut :

$$Q = m.c.\Delta T \quad (2.2)$$

dimana Q merupakan kalor yang diperlukan atau dibuang dalam *Joule*, m adalah massa benda dalam kg, c merupakan kalor jenis benda dalam J/kg.°C, dan ΔT adalah perubahan suhu benda dalam °C (Alamsah, skripsi, 2016). Kenaikan suhu benda biasanya digunakan dalam menentukan banyaknya kalor yang diserap, seperti pada persamaan berikut :

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (2.3)$$

dimana ΔQ adalah jumlah kalor, ΔT adalah perubahan suhu dan C adalah kapasitas kalor (Kholifudin, 2017).

2.2.5. Hukum Kekekalan Energi atau Asas *Black*

Asas *Black* merupakan sebutan lain untuk hukum kekekalan energi. Asas *Black* menyebutkan bahwa “Jika dua zat yang memiliki suhu berbeda kemudian dicampur, maka zat dengan suhu tinggi akan melepaskan kalor dan zat dengan suhu rendah akan menyerap kalor yang jumlahnya sama dengan jumlah kalor yang dilepaskan.” (Rizkianawati, skripsi, 2015), dengan demikian diperoleh persamaan berikut (Kholifudin, 2017) :

$$Q_{\text{lepas}} = Q_{\text{serap}} \text{ atau } \Delta Q_1 = \Delta Q_2 \quad (2.4)$$

$$m_2 c_2 \Delta T_2 = m_1 c_1 \Delta T_1 \quad (2.5)$$

$$m_2 c_2 (T_2 - T_f) = m_1 c_1 (T_f - T_1) \quad (2.6)$$

2.2.6. Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor adalah perpindahan suatu energi akibat adanya perbedaan temperatur. Perpindahan kalor terbagi menjadi tiga jenis, yaitu perpindahan kalor secara konduksi, konveksi, dan radiasi.

2.2.6.1. Konduksi

Konduksi merupakan perpindahan kalor yang terjadi pada satu medium dimana medium tersebut tidak bergerak atau diam. Medium yang mampu mengalami perpindahan kalor konduksi adalah padat, cair, dan gas dengan syarat medium tersebut tidak bergerak. Perpindahan kalor konduksi dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$Q = \int_0^{\Delta t} \dot{Q} dt \quad (2.7)$$

$$Q = \dot{Q} \Delta t \quad (2.8)$$

dimana Q adalah kalor total yang dipindahkan dalam J, \dot{Q} adalah kecepatan pemindahan kalor dalam J/s atau Watt, dan t adalah waktu dalam detik (s). Jika \dot{Q} konstan terhadap waktu maka perpindahan kalor per satuan waktu atau laju perpindahan kalor dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$\dot{Q} = \frac{Q}{\Delta t} \quad (2.9)$$

dimana \dot{Q} adalah laju perpindahan kalor dalam J/s atau Watt, Q adalah perpindahan kalor dalam J, dan t adalah waktu dalam detik (s). Fluks kalor konduksi dapat diperoleh dengan persamaan berikut :

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (2.10)$$

dengan \dot{q} merupakan fluks kalor dalam W/m^2 , \dot{Q} merupakan laju perpindahan kalor dalam J/s atau Watt, dan A merupakan luas dalam m^2 .

Laju perpindahan kalor konduksi untuk satu dimensi yang berlaku pada keadaan *steady* dan tidak ada pembangkitan energi dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\dot{Q}_{\text{konduksi}} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.11)$$

dimana $\dot{Q}_{\text{konduksi}}$ adalah laju perpindahan kalor konduksi dalam Watt, k adalah konduktivitas benda dalam $W/m \cdot ^\circ C$, A adalah luas penampang dalam m^2 , T_1 adalah suhu awal dalam $^\circ C$, T_2 adalah suhu akhir dalam $^\circ C$, dan Δx adalah ketebalan dalam m. Jika pada sebuah kasus nilai $\Delta x = 0$, maka akan berlaku hukum Fourier yaitu :

$$\dot{Q}_{\text{konduksi}} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.12)$$

dengan tanda negatif menunjukkan bahwa kalor berpindah ke arah temperatur yang lebih rendah, $\dot{Q}_{\text{konduksi}}$ sebagai laju perpindahan kalor konduksi dalam Watt, k merupakan konduktivitas benda dalam $W/m \cdot ^\circ C$, A merupakan luasan yang tegak lurus terhadap luas perpindahan kalor dalam m^2 , dT/dx adalah gradien temperatur dalam $^\circ C/m$.

2.2.6.2. Konveksi

Konveksi merupakan perpindahan kalor yang terjadi antara permukaan dengan aliran fluida yang terdapat perbedaan suhu dengan syarat medium perpindahan kalor tersebut bergerak. Konveksi terbagi menjadi tiga jenis yaitu konveksi paksa, konveksi bebas, dan konveksi dengan perubahan fase. Konveksi paksa merupakan konveksi yang terjadi ketika aliran fluidanya digerakkan dengan mekanisme eksternal atau mekanisme paksa. Konveksi bebas merupakan konveksi yang terjadi ketika aliran fluidanya bergerak sendiri atau akibat pengaruh gaya apung yang bekerja pada fluida karena adanya gradien densitas. Konveksi dengan perubahan fase merupakan konveksi yang terjadi dengan adanya perubahan fase fluida dari cair ke uap (*boiling*) atau dari uap ke cair (kondensasi). Laju perpindahan kalor konveksi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\dot{Q}_{\text{konveksi}} = hA_s(T_s - T_{\infty}) \text{ atau } \dot{Q}_{\text{konveksi}} = hA_s(T_{\infty} - T_s) \quad (2.13)$$

dimana $\dot{Q}_{\text{konveksi}}$ adalah laju perpindahan kalor konveksi dalam Watt, h adalah koefisien konveksi dalam $W/m^2 \cdot ^\circ C$, A_s adalah luas area perpindahan kalor dalam m^2 , T_s adalah temperatur permukaan dalam $^\circ C$, dan T_{∞} adalah temperatur fluida atau temperaur bebas dalam $^\circ C$.

2.2.6.3. Radiasi

Radiasi merupakan perpindahan kalor yang terjadi secara langsung antar permukaan tanpa memerlukan perantara. Radiasi dapat dihitung dengan menggunakan dua persamaan yaitu persamaan emisi dan persamaan absorpsi. Persamaan emisi merupakan radiasi termal yang dipantulkan atau dipancarkan dari permukaan. Persamaan emisi dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$\dot{Q}_{\text{emisi,max}} = \sigma A_s T_s^4 \quad (2.14)$$

dimana $\dot{Q}_{\text{emisi,max}}$ adalah laju perpindahan kalor radiasi emisi maksimal dalam Watt, σ adalah konstanta Stefan Boltzmann dengan nilai $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$, A_s adalah luas area perpindahan kalor dalam m^2 , dan T_s adalah temperatur permukaan dalam K. Rumus ini digunakan jika nilai emisi (ε) = 1 dan $\alpha = 1$ atau benda yang memancarkan radiasi adalah benda hitam yang berarti benda tersebut dapat memancarkan dan menyerap radiasi termal secara maksimal atau sempurna. Jika nilai emisi benda $\neq 1$ maka menggunakan persamaan emisi berikut :

$$\dot{Q}_{\text{emisi}} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (2.15)$$

dimana \dot{Q}_{emisi} merupakan laju perpindahan kalor radiasi emisi dan ε adalah emisivitas atau kemampuan suatu permukaan untuk memancarkan radiasi dalam rentang $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Persamaan absorpsi merupakan radiasi termal yang diserap oleh suatu permukaan. Radiasi absorpsi terbagi menjadi dua jenis yaitu radiasi insiden dan radiasi refleksi. Radiasi insiden adalah radiasi yang menyentuh permukaan dan radiasi refleksi adalah radiasi yang dipantulkan. Radiasi absorpsi dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut :

$$\dot{Q}_{\text{absorbed}} = \alpha \dot{Q}_{\text{incident}} \quad (2.16)$$

dengan $\dot{Q}_{\text{absorbed}}$ adalah laju perpindahan kalor radiasi absorpsi dalam Watt, α adalah absorptivitas atau kemampuan menyerap radiasi termal dalam rentang $0 \leq \alpha \leq 1$, $\dot{Q}_{\text{incident}}$ adalah laju perpindahan kalor radiasi insiden dalam Watt. Radiasi dalam kondisi khusus atau radiasi yang terjadi dalam satu permukaan yang diselimuti dengan satu permukaan lain secara utuh dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\dot{Q}_{\text{radiasi}} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{surr}}^4) \quad (2.17)$$

dengan \dot{Q}_{radiasi} adalah laju perpindahan kalor radiasi dalam Watt, ε adalah emisivitas dalam rentang $0 \leq \varepsilon \leq 1$, σ adalah konstanta Stefan Boltzmann dengan nilai $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$, A_s adalah luas area perpindahan kalor dalam m^2 , T_s adalah temperatur permukaan dalam K dan T_{surr} adalah temperatur *surrounding* dalam K.