

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1. Tinjauan Pustaka**

*Solar Water Heater* (SWH) adalah pemanas air yang energinya diperoleh dari panas matahari. SWH terdiri dari dua jenis sistem berdasarkan jenis aliran HTF yaitu aktif dan pasif yang telah diuji oleh Ogueke dkk (2009). SWH dengan sistem pasif memiliki prinsip kerja dalam mengalirkan HTF dengan memanfaatkan perbedaan densitas HTF. Sedangkan SWH dengan sistem aktif mengalirkan HTF dengan bantuan pompa. Sehingga pada penelitian tersebut diperoleh hasil bahwa efisiensi sistem aktif lebih tinggi 35%-80% daripada sistem pasif.

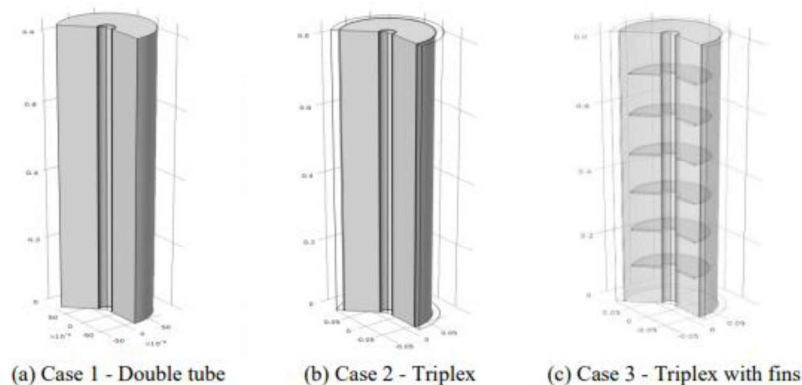
*Solar Water Heater* (SWH) memiliki suatu kelemahan yaitu memerlukan biaya operasional tinggi dalam menjaga temperatur air agar tetap panas. Oleh karena itu Jufrizal dkk (2014) melakukan pengujian SWH dengan penambahan TES yang menggunakan *paraffin wax* sebanyak 19,5 kg. Pada penelitian tersebut diperoleh hasil efisiensi termal tertinggi pada proses *charging* sebesar 44,28 % dan pada proses *discharging* sebesar 46,81 %.

Nadjib dkk (2015) melakukan penelitian tentang *paraffin wax* yang digunakan sebagai PCM. Pada pengujian tersebut *paraffin wax* dimasukkan pada pipa tembaga dan disusun secara horizontal. Lalu dipanaskan melalui kolektor yang dihadapkan secara langsung ke arah matahari selama 340 menit. Hasil dari penelitian tersebut yaitu *paraffin wax* dapat menyimpan kalor dengan baik, karena dapat mengurangi rugi-rugi termal yang terbuang.

Pengujian menggunakan CFD tentang simulasi pembekuan PCM telah banyak dilakukan oleh penguji untuk mengetahui laju perpindahan kalornya. Pengujian terdahulu pernah dilakukan oleh Afrianto (2018) tentang proses pembekuan *paraffin wax* di dalam tabung pipa ganda konsentrik pada arah aksial dan radial dengan variasi temperatur kondisi awal PCM 55°C, 60°C dan 65°C dengan menggunakan *software Ansys Fluent*. Proses pembekuan *paraffin wax* terjadi karena adanya proses *discharging*, perpindahan kalor dari PCM ke air yang mengalir secara kontinyu membuat PCM mengalami penurunan temperatur

sehingga PCM berubah fase menjadi padat. Hasil dari pengujian tersebut yaitu kecepatan waktu pembekuan pada arah radial lebih cepat dibandingkan dengan arah aksial.

Arena dkk (2015) pernah meneliti tentang simulasi CFD tentang pelelehan dan pembekuan PCM berjenis *D-Mannitol*. Dalam pengujian ini dilakukan simulasi yang berbeda geometrinya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. *Case 1* memiliki dua buah tabung yang dimana bagian luar tabung merupakan tempat PCM sedangkan bagian dalam tabung merupakan tempat mengalirnya HTF. *Case 2* memiliki tiga buah tabung yang dimana bagian luar dan dalam tabung merupakan tempat mengalirnya HTF sementara tabung berisi PCM diletakkan diantara tabung HTF. *Case 3* seperti halnya *Case 2* yang ditambahkan 6 *circular fins*. HTF yang digunakan pada pengujian tersebut yaitu *Syltherm 800*. Laju aliran massa yang digunakan pada HTF sebesar 0.052 kg/s dengan temperatur *inlet* pada proses *charging* sebesar 180 °C dan pada proses *discharging* sebesar 100 °C. Hasil dari penelitian ini diperoleh pada proses *charging* waktu yang dibutuhkan untuk pelelehan sempurna pada *Case 2* dan 3 yaitu 9-10 jam, sedangkan dalam durasi waktu yang sama *Case 1* nilai pelelehannya sekitar 0,8 – 0,84. Pada proses *discharging* waktu yang dibutuhkan untuk pembekuan sempurna ( nilai 0) pada *Case 2* dan 3 yaitu 4 jam sementara untuk *Case 1* pada durasi waktu yang sama, nilai pembekuannya 0,4.



Gambar 2.1. Tiga Konfigurasi Geometri pada TES (Arena dkk,2015)

Marsah (2014) melakukan pengujian menggunakan *software Ansys Fluent* tentang simulasi pelelehan dan pembekuan pada PCM di dalam pemanas air

tenaga matahari menggunakan metode perhitungan komputasi dinamik. Dalam penelitian ini model yang disimulasikan dalam 2D dengan dimensi 1025 x 160 mm. Penelitian tersebut menggunakan PCM berjenis *stearic acid*. Hasil dari simulasi yaitu membutuhkan waktu 25.500 detik ( $\pm 7$  jam) atau pada pukul 13:00 WIB untuk mengalami waktu pelelehan sedangkan pada jam pukul 19:00 terjadi proses pembekuan dikarenakan menurunnya intensitas matahari secara drastis.

Proses pelelehan *paraffin wax* juga pernah disimulasikan oleh Anggara (2017). *paraffin wax* yang digunakan berjenis *Rubitherm 52 (RT-52)*. Pada pengujian ini bertujuan untuk mempelajari karakteristik pelelehan pada PCM yang diterapkan pada *heat-exchanger* berbentuk silinder. Konfigurasi geometri ini terdiri dari dua tabung. Tabung dalam berisi PCM sementara tabung luar sebagai HTF. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan *software ANSYS Fluent* yang bervariasi temperatur ( $60^{\circ}\text{C}$ ,  $75^{\circ}\text{C}$ , dan  $90^{\circ}\text{C}$ ) dan debit HTF (4 LPM, 8 LPM, dan 12 LPM). Kesimpulan yang didapatkan dari pengujian tersebut yaitu pengaruh temperatur lebih besar dibandingkan pengaruh debit terhadap karakteristik pelelehan.

Penggunaan *paraffin wax* sebagai TES memiliki suatu kekurangan yaitu memiliki nilai konduktivitas termal yang rendah. Oleh karena itu dilakukan pencampuran dengan material yang memiliki nilai konduktivitas termal. Seperti yang dilakukan oleh Vanhas (2018) dengan melakukan pencampuran terhadap *paraffin wax* dengan minyak goreng. Tujuan penelitian tersebut yaitu mengetahui karakteristik dari campuran *paraffin wax* dengan minyak goreng variasi 30%, 40% dan 50% dari volume total serta *paraffin wax* tanpa campuran. Dari penelitian tersebut didapatkan hasil bahwa untuk proses *charging* campuran *paraffin wax* dengan minyak goreng variasi 50% memiliki peningkatan kecepatan temperatur paling tinggi. Sedangkan dalam proses *discharging paraffin wax* tanpa campuran dapat menahan panas lebih baik daripada *paraffin wax* yang dicampur dengan minyak goreng.

Selain dicampur dengan minyak goreng, Alomair dkk (2017) juga telah melakukan penelitian tentang campuran *paraffin wax* dengan nanopartikel *copper oxide* dan campuran *paraffin wax* dengan nanopartikel aluminium oksida.

*Paraffin wax* yang digunakan adalah *Rubitherm* (RT-18), sedangkan nanopartikel *copper oxide* dan alumunium oksida yang digunakan memiliki ukuran 50 nm. Perbandingan massa *paraffin wax* dengan *copper oxide* dan alumunium oksida sebesar 1%. Dari penelitian tersebut didapatkan hasil bahwa waktu pelelehan campuran *paraffin wax* dengan *copper oxide* lebih cepat daripada campuran *paraffin wax* dengan alumunium oksida.

Lin dkk (2016), melakukan penelitian tentang campuran *paraffin wax* dengan nanopartikel tembaga dengan variasi fraksi massa 0,5 %, 1 % , 1,5 % dan 2 %. Tujuan dari penelitian tersebut yaitu mengetahui sifat termal dan karakteristik pada campuran *paraffin wax* dengan nanopartikel tembaga. Pengujiannya terdiri dari *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) untuk mengetahui sifat termal, *Thermogravimetric Analysis* (TGA) untuk mengetahui *trend* degradasi termal, *Field Emission Scanning Electron Microscope* (FESEM) untuk mengetahui struktur *morphology* dan *microstructure*, *Fourier Transform Infrared Spectrometer* (FT-IR) untuk mengetahui ikatan kimia, struktur molekul dan efek dari degradasi, *Transient hot disk thermal constant analyzer* untuk mengukur nilai konduktivitas termal dan difusivitas termal, dan *Particles Size Analyzer* (PSA) untuk mengetahui rentang distribusi ukuran nanopartikel. Hasil dari penelitan tersebut yaitu nanopartikel tembaga memiliki bentuk *hexagon* dengan distribusi rentang ukuran sebesar 15 nm – 130 nm. Pada konduktivitas termal mengalami peningkatan 14 % untuk fraksi massa 0,5 %, 23,9 % untuk fraksi massa 1 %, 42,5 % untuk fraksi massa 1,5 %, dan 46,3 % untuk fraksi massa 2 %. Latent heat pada fase cair untuk *paraffin wax*, 0,5% Nano Cu-PCM, 1% Nano Cu-PCM, 1,5% Nano Cu-PCM, dan 2% Nano Cu-PCM secara berurutan 184,2 kJ/kg, 172,2 kJ/kg, 166,7 kJ/kg, 160,3 kJ/kg, 157,3 kJ/kg. Sedangkan *latent heat* pada fase padat secara berurutan 179,3 kJ/kg, 170,6 kJ/kg, 164,3 kJ/kg, 159,6 kJ/kg, 155,5 kJ/kg.

Tabel 2.1. Hasil Ringkasan dari Tinjauan Pustaka

Penulis	Judul	Tujuan	Hasil
Ogneke dkk. (2009)	<i>A Review of Solar Water Heating Systems</i>	Mengetahui performa dari sistem pasif dan aktif pada SWH	Efisiensi pada sistem aktif lebih tinggi 35% - 80% daripada sistem pasif
Jufrizal dkk. (2014)	Studi Eksperimental Performansi <i>Solar Water Heater</i> Jenis Kolektor Plat Datar dengan Penambahan <i>Thermal Energy Storage</i>	Mengetahui efisiensi termal <i>paraffin wax</i> pada proses <i>charging</i> dan <i>discharging</i>	Efisiensi termal tertinggi pada proses <i>charging</i> sebesar 44,28 % serta pada proses <i>discharging</i> sebesar 46,81 %
Nadjib dkk. (2015)	Studi Eksperimental Penyimpanan Energi Termal pada Tangki Pemanas Air Tenaga Surya yang Berisi PCM	Mengetahui kemampuan penyimpanan energi termal tangki PATS yang menggunakan air dan <i>paraffin wax</i> sebagai penyimpanan energi termal.	<i>Paraffin wax</i> dapat menyimpan kalor dengan baik, karena dapat mengurangi rugi-rugi termal yang terbuang.
Afrianto (2018)	Studi Proses Pembekuan <i>Paraffin Wax</i> di Dalam Pipa Ganda Konsentrik dengan Variasi Temperatur Kondisi Awal <i>Phase</i>	Mengetahui hasil proses pembekuan <i>paraffin wax</i> di dalam tabung pipa ganda	Kecepatan waktu pembekuan pada arah radial lebih cepat dibandingkan dengan arah aksial.

	<i>Change Material</i> Menggunakan Simulasi <i>Computational Fluid Dynamics</i>	konsentrik pada arah aksial dan radial.	
Arena dkk. (2015)	<i>CFD Simulation of Melting and Solidification of PCM in Thermal Energy Storage Systems of Different Geometry</i>	Mengetahui waktu pelelehan dan pembekuan pada PCM dengan variasi geometri yang berbeda.	Pada proses <i>charging</i> waktu yang dibutuhkan untuk pelelehan sempurna pada <i>Case 2</i> dan 3 yaitu 9-10 jam, sedangkan dalam durasi waktu yang sama <i>Case 1</i> nilai pelelehannya sekitar 0,8 – 0,84. Sementara pada proses <i>discharging</i> waktu yang dibutuhkan untuk pembekuan sempurna pada <i>Case 2</i> dan 3 yaitu 4 jam sedangkan untuk <i>Case 1</i> pada durasi waktu yang sama, nilai pembekuannya 0,4.
Marsah (2014)	Simulasi Pelelehan dan Pembekuan pada <i>Phase Change Material</i> di Dalam Pemanas Air Tenaga Surya dengan Menggunakan Metode Perhitungan Komputasi Dinamik	Mengerahui proses melelehnya membekunya PCM yang ada pada kolektor.	Pelelehan PCM membutuhkan waktu $\pm 7$ jam atau pada pukul 13:00 sedangkan untuk pembekuan PCM terjadi pada pukul 19:00
Anggara (2017)	Simulasi Pelelehan <i>Paraffin Wax</i> RT52 pada Tabung Silinder	Mengetahui parameter simulasi yang berpengaruh dalam hasil simulasi.	Pengaruh temperatur lebih besar dibandingkan pengaruh debit terhadap karakteristik pelelehan

Vanhas (2018)	Analisis Thermal Kolektor Pemanas Air Menggunakan Phase Change Material Parafin – Minyak Goreng	Mengetahui penyimpanan perubahan fasa PCM <i>paraffin wax</i> dengan paduan minyak goreng 30 %, 40 % dan 50 % dari volume total serta <i>paraffin wax</i> tanpa campuran.	Pada proses <i>charging</i> campuran <i>paraffin wax</i> dengan minyak goreng variasi 50 % memiliki peningkatan kecepatan temperatur paling tinggi. Sementara pada proses <i>discharging</i> , <i>paraffin wax</i> tanpa campuran dapat menahan panas lebih lama daripada <i>paraffin wax</i> yang dicampur dengan minyak goreng.
Alomair dkk. (2017)	<i>Nanoparticle Enhanced Phase Change Material in Latent Heat Thermal Energy Storage System : An Experimental Study</i>	Mengetahui waktu pelelehan campuran <i>paraffin wax</i> dengan <i>copper oxide</i> dan campuran <i>paraffin wax</i> dengan aluminium oksida.	Waktu pelelehan campuran <i>paraffin wax</i> dengan <i>copper oxide</i> lebih cepat daripada campuran <i>paraffin wax</i> dengan aluminium oksida.
Lin dkk. (2015)	<i>Evaluation of Copper Nanoparticles – Paraffin Wax Compositions for Solar Thermal Energy Storage</i>	Mengetahui sifat termal dan karakteristik pada campuran <i>paraffin wax</i> dengan nanopartikel tembaga.	Nilai konduktivitas termal pada campuran <i>paraffin wax</i> dengan nanopartikel tembaga mengalami kenaikan. Sementara nilai <i>latent heat</i> pada campuran <i>paraffin wax</i> mengalami penurunan.

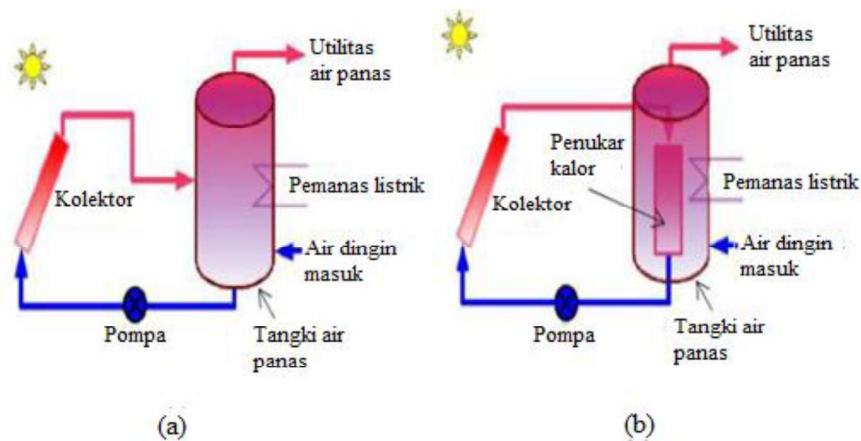
## 2.2. Dasar Teori

### 2.2.1. Solar Water Heater (SWH)

*Solar Water Heater* (SWH) merupakan salah satu aplikasi teknologi dari pemanfaatan energi matahari yang digunakan untuk memanaskan air yang dapat digunakan untuk keperluan rumah tangga ataupun industri. Umumnya komponen SWH terdiri dari kolektor panas dan tangki penyimpanan. Sistem SWH dibagi menjadi dua kelompok berdasarkan jenis alirannya yaitu sistem aktif dan sistem pasif (*Thermosyphon*). (Dwivedi, 2009).

#### 2.2.1.1. Sistem Aktif

*Solar Water Heater* dengan sistem aktif merupakan pemanas air yang menggunakan pompa untuk mendistribusikan air. Sistem ini secara umum digunakan pada SWH berkapasitas besar atau memiliki sistem perpipaan yang kompleks (Soeparman, 2015). SWH sistem aktif dikelompokkan menjadi dua sistem yaitu *direct/open loop* dan *indirect/close loop* yang ditunjukkan pada gambar 2.2. SWH dengan sistem aktif *direct/open loop* merupakan sistem pemanas air dimana kolektor bekerja untuk memindahkan panas secara langsung menuju tangki tanpa membutuhkan perantara lain. Sedangkan, SWH dengan sistem aktif *indirect/close loop* merupakan pemanas air yang dalam memindahkan kalor fluidanya tidak tercampur dengan fluida kerja yang berada di tangki.

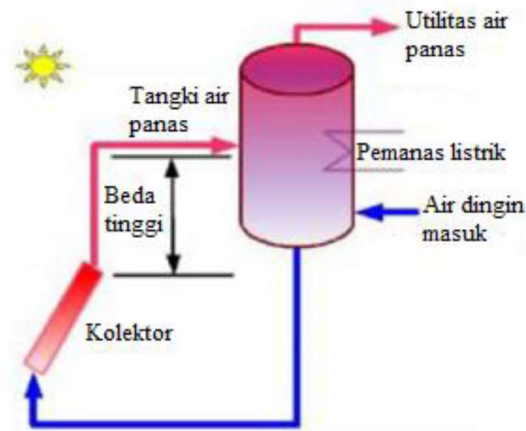


Gambar 2.2. SWH Sistem (a) *Aktif-direct/Open Loop* (b) *Aktif-indirect/Close Loop* (Dwivedi, 2009)



### 2.2.1.1. Sistem Pasif (*Thermosyphon*)

*Solar Water Heater* dengan sistem pasif atau *thermosyphon* adalah pemanas air yang memanfaatkan perbedaan massa jenisnya untuk mendistribusikan air, sehingga sistem pasif ini tidak membutuhkan energi listrik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Ketika temperatur air di bagian atas kolektor tinggi, massa jenis pada airnya rendah. Sedangkan massa jenis air pada bagian bawah kolektor dan di dalam tangki relatif lebih tinggi karena temperaturnya lebih rendah. Hal ini mengakibatkan air dari kolektor bergerak menuju tangki dan air dingin mengalir ke kolektor hingga temperatur air pada kolektor dan tangki sama.



Gambar 2.3. SWH Sistem Pasif (Dwivedi, 2009)

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

*Thermal Energy Storage* (TES) adalah media untuk menyimpan energi kalor. Energi kalor yang dipancarkan oleh matahari melalui radiasi dapat disimpan dalam bentuk kalor *latent*, kalor *sensible*, *thermo-chemical*. Menurut J. P. Holman (1993) material yang baik untuk penyimpanan energi kalor yaitu material yang memiliki kapasitas kalor yang tinggi. Lefebvre dan Tezel (2017) mengatakan bahwa energi termal dapat disimpan dan dilepas karena terdapat proses *melting*, *heating*, *cooling*, *solidifying*, *thermo-chemical* dan *vaporizing*. Menurut Akgun dkk (2007) menyatakan bentuk energi termal yang sering disimpan yaitu *Sensible Heat Storage*, *Latent Heat Storage*, dan *Thermo-chemical Storage*.

### 2.2.2.1. *Sensible Heat Storage*

*Sensible Heat Storage* (SHS) disimpan dengan menaikkan temperatur suatu media dengan menggunakan kapasitas yang dimiliki media tersebut. Pada SHS terdapat dua macam media yaitu media cair dan padat. Kelebihan dari SHS yaitu biaya relatif lebih murah dan medianya mudah didapat. Sedangkan kekurangan dari SHS yaitu memiliki *heat loss* pada media penyimpanan termal, densitas energi yang rendah. Perbandingan energi yang tersimpan dapat ditunjukkan pada Gambar 2.4.

Total energi panas yang tersimpan dalam bentuk kalor *sensible* dapat dicari atau dihitung menggunakan persamaan 2.1 (Sharma, 2009).

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m c_p dT$$

$$Q = m c_{ap} (T_f - T_i) \dots\dots\dots(2.1)$$

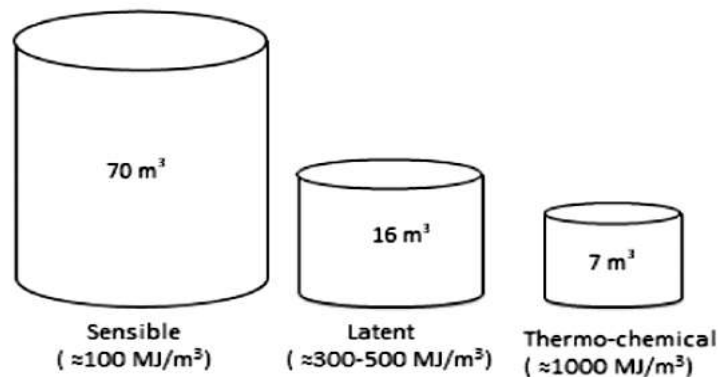
dengan :

$T_i$  = temperatur akhir (°C)

$T_f$  = temperatur awal (°C)

$m$  = massa material penyimpan (kg)

$C_{ap}$  = kalor jenis rata-rata material penyimpanan (J/kg.°C)



Gambar 2.4. Volume dari *Storage* untuk Penyimpanan (1800kWh)  
(Levevre dan Tezel, 2017)

### 2.2.2.2. Latent Heat Storage

*Latent Heat Storage* (LHS) adalah media penyimpanan yang menyimpan energi panas ke dalam bentuk energi laten. Panas laten adalah jumlah panas yang diserap atau dilepaskan selama perubahan fase terjadi. Material yang digunakan untuk menyimpan energi panas laten disebut *Phase Change Material*. Kelebihan LHS dari penyimpanan yang lainnya yaitu memiliki densitas energi yang tinggi sehingga dapat menyimpan energi panas yang besar dengan tempat yang tidak terlalu besar (Zhou dan Zhao, 2011).

Total energi dari material PCM dapat dicari atau dihitung dengan menggunakan persamaan 2.2.

$$Q = m \left[ \int_{T_A}^{T_D} C_{p,s}(T) dT + L + \int_{T_E}^{T_F} C_{p,l}(T) dT + L_g + \int_{T_G}^{T_H} C_{p,g}(T) dT \right] \dots (2.2)$$

dengan :

m = massa (kg)

L = kalor laten perubahan padat-cair (J/kg)

L<sub>g</sub> = kalor laten cair-gas (J/kg)

C<sub>p,g</sub> = kalor jenis material fase gas (J/kg°C)

C<sub>p,l</sub> = kalor jenis material fase cair (J/kg°C)

C<sub>p,s</sub> = kalor jenis material fase padat (J/kg°C)

### 2.2.2.3. Thermo-Chemical Storage

*Thermo-chemical storage* merupakan teknologi modern di bidang penyimpanan kalor. Sistem *thermo-chemical* bergantung pada reaksi kimia dalam penyerapan dan pelepasan energinya. Proses penyimpanan kalor pada *Thermo-chemical Storage* terjadi ketika adanya energi yang diserap dan dilepas dalam pemisahan dan pembentukan ikatan molekular akibat reaksi *reversible*. Kelebihan *Thermo-chemical Storage* yaitu mempunyai densitas energi yang tinggi. Sedangkan kekurangannya yaitu dibutuhkan katalisator untuk melepas energi dan mengatur reaksi kimianya.

Total energi pada material *Thermol-chemical Storage* dapat dicari atau dihitung dengan menggunakan persamaan (2.3).

$$Q = \alpha_r \cdot m \cdot \Delta h_r \dots \dots \dots (2.3)$$

dengan :

$m$  = massa material penyimpan (kg)

$\Delta h_r$  = kalor endotermik (kJ/mol)

$\alpha_r$  = fraksi yang bereaksi (mol)

### 2.2.3. *Phase Change Material*

*Phase Change Material* (PCM) adalah material dengan panas fusi yang tinggi, yang dapat mengalami perubahan fase pada suhu tertentu tanpa mengubah struktur atau susunan kimianya dan memiliki kemampuan menyimpan maupun melepaskan energi yang cukup besar dalam waktu yang cukup lama tanpa perubahan temperatur. Penyerapan atau pelepasan kalor pada PCM terjadi ketika PCM mengalami perubahan fase dari padat ke cair ataupun sebaliknya. Pada *Thermal Energy Storage* yang berbentuk *Latent Heat Storage*, PCM merupakan komponen terpenting, karena digunakan sebagai penyimpan energi termal.

### 2.2.4. *Charging dan Discharging*

Proses *charging* diawali dengan penyerapan energi termal oleh PCM di dalam TES. PCM yang terus menerus menyerap energi termal akan mengalami pelelehan yang menandakan PCM telah memasuki temperatur leleh. PCM akan terus menyerap energi termal sampai proses *charging* selesai yaitu saat PCM meleleh sempurna dimana temperatur PCM akan sama dengan temperatur HTF.

Sedangkan proses *discharging* yaitu awal mula temperatur tinggi dan sedikit demi sedikit akan melepaskan energi termal yang tersimpan di dalam PCM yang ditandai dengan perubahan fase dari *liquid-solid* atau lebih dikenal *solidification*. Proses *discharging* akan terus berlanjut hingga temperatur akhir dari PCM sama dengan temperatur HTF.

### 2.2.5. *Computational Fluid Dynamics*

*Computational Fluid Dynamics* (CFD) merupakan solusi pendekatan numerik bermodel matematis yang dapat menyelesaikan dan menganalisa elemen-elemen perilaku fluida dinamis. Penelitian pada kasus ini, peranan komputer sangat diperlukan sebagai media proses dalam bentuk iterasi. Proses perhitungan

yang dilakukan oleh aplikasi CFD adalah dengan kontrol-kontrol perhitungan yang memanfaatkan persamaan-persamaan yang terlibat. Persamaan yang terlibat dalam aplikasi CFD terdiri dari tiga prinsip dasar fisika yaitu hukum kekekalan energi, hukum kekekalan momentum, dan hukum kekekalan energi. Berikut persamaan 2.4, 2.5 dan 2.7. merupakan persamaan umum yang sering digunakan pada CFD yang diatur dalam *theory guide ANSYS Fluent* untuk *basic fluid flow*:

1. Persamaan atur massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \dots \dots \dots (2.4)$$

2. Persamaan atur momentum

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \dots \dots \dots (2.5)$$

$$\bar{\tau} = \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} l \right] \dots \dots \dots (2.6)$$

3. Persamaan atur energi

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \dots \dots \dots (2.7)$$

$$H = h + \Delta H \dots \dots \dots (2.8)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \dots \dots \dots (2.9)$$

dengan :

$\rho$  = Densitas (kg/m<sup>3</sup>)

$p$  = Static pressure (Pa)

$\bar{\tau}$  = Stress tensor (Pa)

$t$  = Waktu (s)

$\vec{v}$  = Kecepatan (m/s)

$l$  = Unit tensor

$\vec{F}$  = Gaya eksternal (N)

$\vec{g}$  = Gaya gravitasi (N)

$\nabla$  = Nabla

$\mu$  = Viskositas (Pa.s)

$H$  = Enthalpy (J/kg)

$c_p$  = Specific heat (J/kg.K)

$\Delta H = \text{Latent heat (J/kg)}$

$k = \text{Konduktivitas termal (W/m.K)}$

$T = \text{Temperatur (K)}$

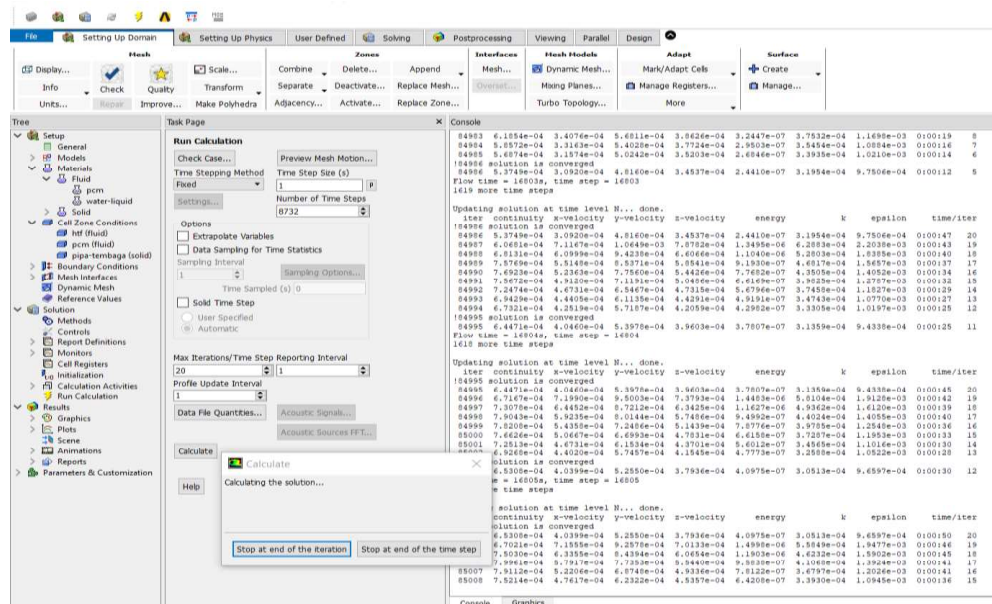
$S = \text{Source term (W/m}^3\text{)}$

$h_{ref} = \text{Reference enthalpy (J/kg)}$

$T_{ref} = \text{Reference temperatur (K)}$

Persamaan yang awalnya memiliki jumlah sel tak terhingga (kontinum) diubah menjadi jumlah sel terhingga (diskrit). Disamping tiga persamaan atur tersebut, dapat pula ditambahkan model tambahan sesuai dengan kasus yang disimulasikan.

Dalam dunia simulasi teknik dan sains memiliki berbagai macam *software* CFD yang dapat digunakan, diantara lain yaitu *ANSYS Fluent*<sup>®</sup>, *MATLAB*, *OpenFOAM*<sup>®</sup>, dan *XFlow*<sup>®</sup>. *ANSYS Fluent* merupakan salah satu pilihan yang sering digunakan karena memiliki fitur yang cukup lengkap dan mudah untuk dioperasikan. *Graphic User Interface (GUI) ANSYS Fluent* dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Tampilan GUI pada *ANSYS Fluent*

Berikut adalah langkah-langkah dasar penggunaan *ANSYS Fluent* untuk mensimulasikan sebuah kasus.

### 1. *Mesh Volume* dan *geometry check up*

*Mesh* sebaiknya tidak mempunyai nilai volumetris yang negatif karena dapat menyebabkan error selama iterasi berlangsung. Nilai negatif berasal dari *node/face mesh* yang mengalami kegagalan dalam pembentukan *mesh*. Oleh karena itu, sebelum melakukan simulasi diperlukan pengecekan *mesh volume* dan *geometry check up* terlebih dahulu.

### 2. Menetapkan formula atau model dari simulasi

Aliran fluida memiliki beragam jenis sehingga pemilihan formulasi aliran fluida mengikuti sesuai dengan kasus yang diteliti. Ketetapan formulasi ini digunakan agar dapat memberikan hasil yang akurat.

### 3. Penentuan jenis material untuk *Cell Zone*

Pada *library ANSYS Fluent* memiliki beragam jenis material, baik berupa material *solid* maupun fluida yang dapat digunakan pada simulasi.

### 4. Penentuan jenis *Solver Settings*

Pada simulasi memiliki dua jenis *solver* yang dapat digunakan yaitu *pressure based* dan *density based*.

### 5. Mengatur *Boundary Condition*

Proses *boundary condition* adalah proses memasukan data berdasarkan jenis yang telah ditetapkan.

### 6. Mengatur nilai dari *Under Relaxation Factor*

*Under Relaxation Factor* (URF) berupa angka yang berfungsi untuk mengatur besar atau kecilnya toleransi untuk variabel seperti energi, kecepatan, viskositas, momentum, dan lain-lain.

### 7. Menetapkan metode inisialisasi

Inisialisasi merupakan proses memasukkan nilai awal sebelum simulasi dijalankan. Pada *ANSYS Fluent* mempunyai dua jenis metode inisialisasi yaitu *standart initialization* dan *hybrid initialization*.

### 8. Memasukkan jumlah iterasi

Semakin rumit atau kompleks sebuah model maka jumlah iterasi yang diperlukan semakin besar agar hasilnya konvergen

## 9. Kalkulasi

Memberikan perintah untuk melaksanakan iterasi sesuai dengan data yang telah dimasukkan.

### 2.2.6. Proses Simulasi CFD

Pada simulasi CFD terdapat tiga tahapan yang perlu dilakukan yaitu *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*. Tahapan-tahapan tersebut dapat diproses langsung dengan beragam *software* CFD salah satunya *ANSYS Fluent*.

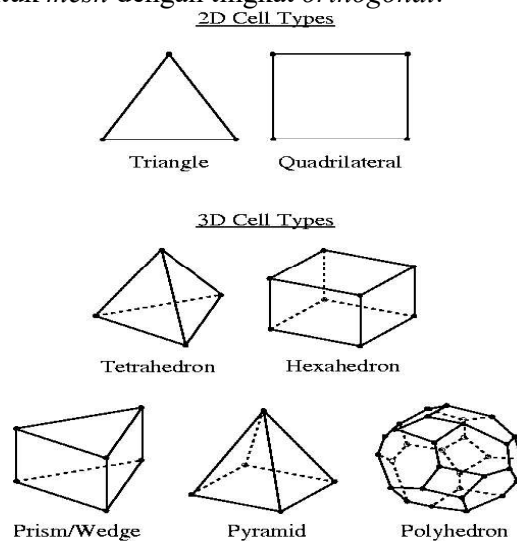
#### 2.2.6.1. *Pre-processing*

*Pre-processing* merupakan tahapan awal yang dilakukan dalam pengujian simulasi CFD. Berikut ini merupakan tahapan-tahapan yang dilakukan pada *pre-processing* :

1. Pembuatan bentuk geometri atau domain komputasi, dimana domain merupakan gambar dengan bentuk dua dimensi ataupun tiga dimensi. Pembuatan geometri dapat menggunakan *software ANSYS Fluent* atau menggunakan *software* lain seperti *Inventor* dan *Solidworks*. Penggunaan *Inventor* dan *Solidworks* dianjurkan untuk pembuatan geometri yang rumit.
2. Pembuatan *Mesh, meshing* yaitu proses pembagian domain komputasi menjadi bagian kecil dalam satu kesatuan domain. Ukuran serta bentuk mesh akan menentukan proses dan hasil akhir dari sebuah simulasi CFD. Semakin kecil ukuran *mesh* terhadap ukuran domain, maka akumulasi mesh semakin banyak sehingga proses simulasi membutuhkan waktu yang lebih lama dan membutuhkan perangkat komputer dengan spesifikasi tinggi. Semakin banyak jumlah mesh yang dihasilkan maka akumulasi simulasi pun semakin akurat. Pembentukan *meshing* dengan tipe *triangle* ataupun *quadrilateral* dapat dihasilkan dari domain komputasi dua dimensi sedangkan untuk domain komputasi tiga dimensi berbentuk tipe *tetra, prisma, pyramid* atau heksa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Untuk mengetahui kualitas *mesh* dapat dilihat dengan menggunakan *software ANSYS Fluent* dengan parameter *skewness* dan *orthogonal quality*. *Skewness* merupakan parameter kualitas *mesh* yang mengarah pada sudut kemiringan *mesh*, sedangkan *orthogonal quality* merupakan parameter kualitas *mesh* yang tegak lurus pada bentuk *mesh* dengan tingkat *orthogonal*.



Gambar 2.6. Macam-macam Bentuk *Mesh*

#### 2.2.6.2. *Processing*

*Processing* merupakan tahap kedua pada CFD. Pada tahapan ini dilakukan proses perhitungan data-data *input* dengan persamaan yang terlibat secara iteratif. Proses ini akan selesai ketika hasil perhitungan telah mencapai konvergen yang berarti tingkat ketelitiannya telah mencapai nilai yang ditentukan ataupun perhitungannya telah mencapai batas jumlah iterasi yang telah ditentukan. Berikut ini adalah tahapan-tahapan pada *processing* :

##### 1. *General*

###### a. *Pressure-Based*

*Pressure-Based* adalah proses simulasi yang menggunakan persamaan momentum dan kontinuitas sebagai formula utama. *Pressure based solver* digunakan dalam regim aliran yang luas dari

aliran dengan kecepatan rendah sampai tinggi, termasuk aliran fluida *incompressible* maupun *compressible*.

b. *Density-Based*

*Density-Based* adalah proses simulasi yang menggunakan persamaan momentum, kontinuitas, energi, dan spesies dalam proses perhitungan. *Density based* digunakan jika terdapat keterkaitan antara densitas, energi, momentum dan spesies seperti contohnya dalam kasus *combustion* pada aliran *compressible* kecepatan tinggi, aliran *hypersonic*, interaksi *shockwave* dan lainnya.

c. *Steady*

Menentukan bahwa kasus tidak berubah terhadap waktu

d. *Transient*

Menentukan bahwa kasus dapat berubah terhadap waktu

2. *Models Energy*

*Models Energy* berfungsi untuk mengaktifkan energi pada sebuah kasus simulasi.

3. *Models Solidfication & Melting*

*Models Solidfication & Melting* merupakan model yang digunakan untuk mensimulasikan perubahan fase pada material.

4. *Models Viscous*

*Models Viscous* yaitu menentukan jenis alirannya yang akan disimulasikan. Pada *ANSYS Fluent* terdapat tiga jenis aliran yaitu *inviscid*, laminar dan turbulen. Akan tetapi aliran turbulen memiliki beragam jenis, berikut ini jenis-jenis aliran turbulen :

a. *Spalart-Allmaras*

Aliran turbulen yang berguna untuk menyelesaikan model persamaan *transport* untuk viskositas kinematik turbulen.

b. *K-epsilon*

*K-epsilon* merupakan model aliran turbulen yang memiliki dua persamaan sehingga kecepatan turbulen dan skala panjang dapat

ditentukan secara bersamaan. Selain itu *K-epsilon* cocok digunakan dalam beragam jenis aliran turbulen.

c. *K-omega*

*K-omega* merupakan model yang memasukan beberapa modifikasi untuk menghitung aliran pada bilangan *Reynolds* rendah. Kompresibilitas dan penyebaran aliran geser.

d. Model *Reynolds stress*

*Reynolds stress* (RSM) adalah model turbulensi yang memiliki ketelitian yang paling tinggi, akan tetapi membutuhkan waktu komputasi yang lama.

e. Model *Large Eddy Simulation* (LES)

*Large Eddy Simulation* (LES) adalah model yang membutuhkan daya komputasi besar selain itu ukuran mesh yang digunakan harus kecil. Oleh karena itu model ini tidak disarankan untuk digunakan pada kasus kasus teknik secara umum.

f. Model *Near Wall Treatment*

Model *Near-Wall Treatment* merupakan pemodelan yang khusus untuk digunakan pada aliran yang dekat dengan *wall*.

5. *Boundary Conditions*

a. *Axis dan Symmetry*

*Boundary condition* ini digunakan untuk menentukan model *symmetry* dan *axisymmetry*.

b. *Inlet Vent dan Outlet Vent*

*Boundary condition* ini digunakan untuk model *inlet* dan *outlet* yang dimana dapat menimbulkan kerugian tekanan pada aliran.

c. *Velocity Inlet*

*Boundary condition* ini digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran besaran skalar sisi *inlet*.

d. *Pressure Inlet*

Pada *boundary condition* ini berfungsi untuk mengatur sisi *inlet* dengan menggunakan data tekanan.

e. *Pressure Outlet*

*Boundary condition* ini digunakan untuk menentukan nilai tekanan statik pada sisi *outlet*.

f. *Mass Flow Inlet*

*Boundary condition* ini berfungsi untuk mendefinisikan kecepatan laju aliran massa.

g. *Wall*

*Boundary conditions* ini digunakan sebagai pembatas antara daerah fluida dengan padatan

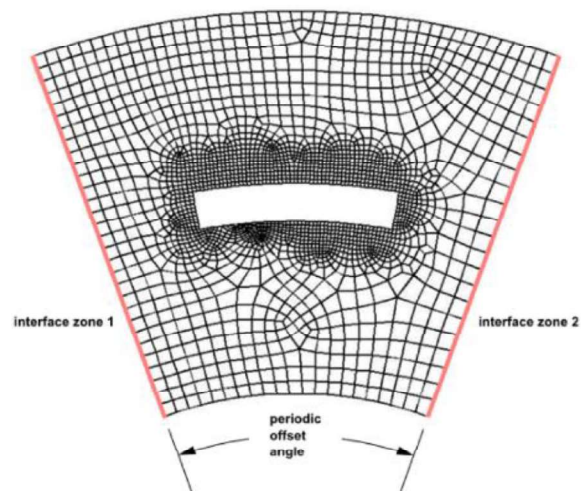
h. *Outflow*

*Outflow* berfungsi ketika data keluar pada *outlet* tidak diketahui sama sekali.

6. *Mesh Interfaces*

a. *Periodic Boundary Condition*

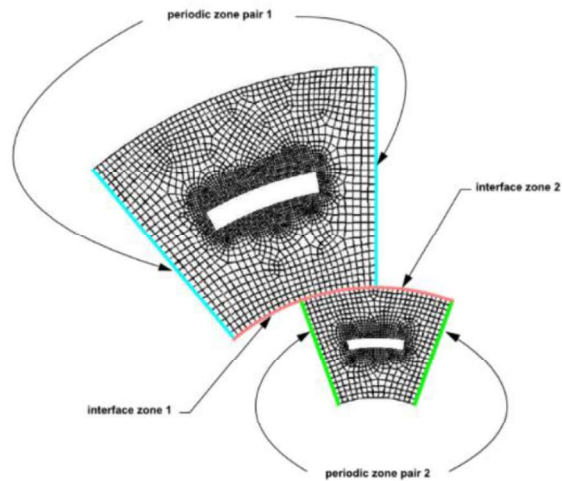
*Periodic boundary condition* digunakan ketika geometri mengalami sifat berulang secara berkala. *Mesh interface periodic boundary condition* dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. *Periodic Boundary Condition*

b. *Periodic Repeats*

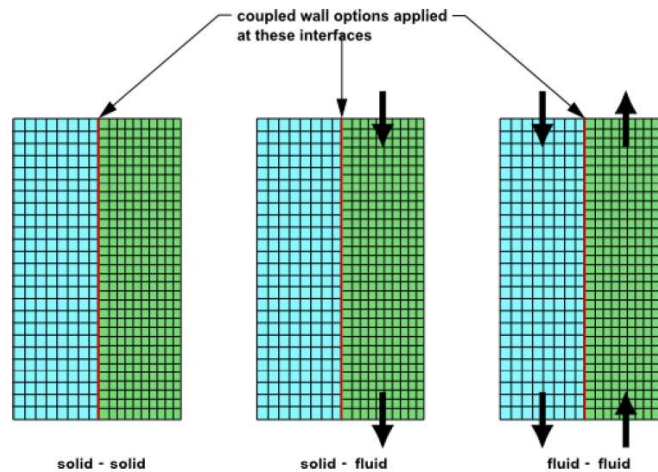
*Periodic Repeats* digunakan ketika geometri memiliki dua atau lebih *cell zones* yang terhubung dan mengalami sifat berulang secara berkala. Gambar 2.8 menunjukkan gambar *periodic repeats*.



Gambar 2.8. *Periodic Repeats*

c. *Coupled Wall*

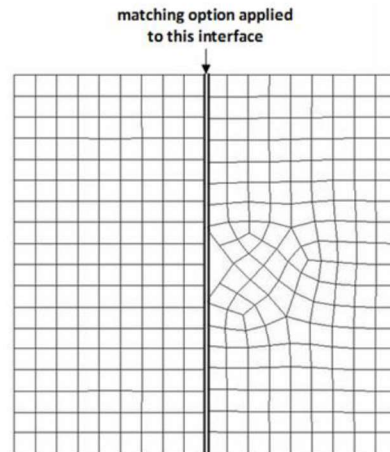
*Coupled wall* digunakan untuk menghubungkan antar *interface* yang berbeda *wall condition*. *Coupled wall* ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. *Coupled Wall*

d. *Matching*

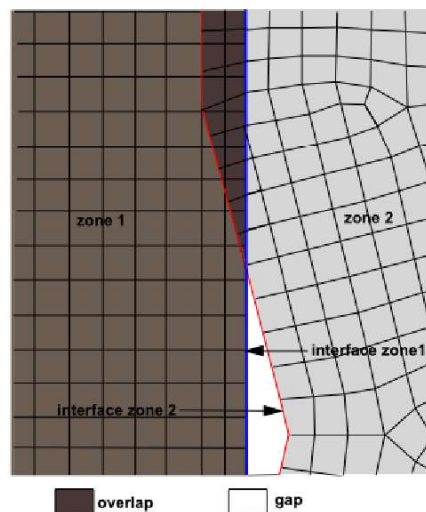
*Matching* digunakan ketika dua *interface zone* tidak terhubung dengan baik seperti bentuk *mesh* yang berbeda, geometri yang tidak terhubung atau memiliki gap. Contoh kasus penggunaan *interface matching* dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. *Matching*

e. *Mapped*

Penggunaan *mapped* tidak jauh berbeda dengan penggunaan *coupled*. *Mapped* dipilih ketika dua *wall condition* yang terhubung memiliki gap atau *overlap*. Gambar 2.11 menunjukkan contoh kasus penggunaan *mapped*



Gambar 2.12. *Mapped*

f. *Static*

*Static* digunakan ketika geometri tidak mengalami sifat bergerak.

7. *Dynamic Mesh*

*Dynamic mesh* berfungsi untuk menentukan parameter model *mesh* yang bergerak. Ada tiga jenis parameter yang terdapat pada *dynamic mesh* yaitu *smoothing*, *layering*, dan *remeshing*.

8. *Solution Methods*

a. *Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation (SIMPLE)*

SIMPLE digunakan pada kasus yang sederhana

b. *SIMPLE Consistent (SIMPLEC)*

SIMPLEC dapat digunakan pada bentuk geometri yang tidak terlalu kompleks. Menggunakan SIMPLEC dapat mempercepat konvergen.

c. *Pressure Implicit with Splitting of Operators (PISO)*

PISO digunakan pada kasus yang memiliki *mesh* yang mengandung *skewness* yang tinggi. Metode ini didasarkan pada tingkatan yang lebih tinggi dari hubungan pendekatan antara faktor koreksi tekanan dan kecepatan.

d. *Coupled*

Metode ini berdasarkan gabungan tekanan *solver*. Penggunaan metode ini sangat efisien digunakan pada aliran *steady*.

e. *Least Squared Cell Based*

*Least Squared Cell Based* digunakan pada persamaan konversi massa, momentum, energi, serta besaran skalar lainnya seperti turbulen dan reaksi kimia.

f. *PRESTO!*

Metode ini digunakan pada kasus aliran dengan pusaran yang tinggi, aliran yang melibatkan media berpori, dan aliran dalam saluran tertutup.

g. *Body Force Weighted*

Metode ini digunakan ketika sebuah kasus meliki *body force* yang tinggi.

h. *First Order Upwind*

*First Order Upwind* adalah metode yang paling ringan dan cepat mencapai konvergen akan tetapi memiliki kekurangan yaitu ketelitiannya hanya mencapai orde satu.

i. *Second Order Upwind*

*Second Order Upwind* menggunakan persamaan yang lebih teliti hingga orde dua dan sangat baik digunakan pada bentuk *mesh* tri/tetra yang dimana arah alirannya tidak sejajar dengan *mesh*. Pada metode ini memiliki kekurangan yaitu konvergennya yang lama.

j. *Quadratic Upwind Interpolation (QUICK)*

QUICK digunakan ketika memiliki bentuk *mesh quad/hex* dan *hybrid*. Ketelitian pada QUICK mencapai orde tiga pada ukuran *mesh* yang seragam.

9. *Solution Initialization*

a. *Standard Initialization*

*Standard initialization* pada umumnya digunakan oleh pengguna untuk dapat memilih berdasarkan *boundary conditions* “*compute from*” agar secara otomatis mengisi nilai inisialisasi dengan nilai-nilai yang ditentukan pada batas *inlet* dan *outlet*.

b. *Hybrid Initialization*

*Hybrid Initialization* adalah metode inisialisasi bawan yang dapat memberikan perhitungan yang cepat dari suatu aliran dengan metode yang ada.

2.2.6.3. *Post-processing*

*Post-processing* adalah tahap akhir dari simulasi CFD yang menampilkan hasil dari perhitungan yang telah didapatkan dalam bentuk data, *contour*, vektor, dan kurva.



### 2.2.7. Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor adalah ilmu untuk mengetahui perpindahan energi di antara benda yang memiliki temperatur yang berbeda. Selain mengetahui bagaimana energi kalor itu berpindah, ilmu ini juga dapat mengetahui laju perpindahan kalor pada kondisi-kondisi tertentu.

#### 2.2.7.1. Konduksi

Konduksi merupakan perpindahan kalor suatu zat melalui media pengantar tanpa disertai perpindahan bagian-bagian zat tersebut. Pada umumnya perpindahan kalor secara konduksi terjadi pada zat padat. Dalam perpindahan kalor tersebut terdapat media penghantar disebut sebagai konduktor. Konduktor adalah suatu benda yang dapat menghantarkan kalor dari satu sisi ke sisi yang lain. Persamaan laju perpindahan kalor konduksi dapat dihitung menggunakan persamaan 2.10.

$$q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \dots\dots\dots (2.10)$$

dengan :

q = Laju perpindahan kalor (Watt)

A = Luas penampang (m<sup>2</sup>)

k = Konduktivitas termal (W/m.K)

$\Delta T$  = Perubahan temperatur (K)

$\Delta x$  = Tebal (m)

#### 2.2.7.2. Konveksi Alami

Konveksi yaitu proses perpindahan energi dengan kerja gabungan dari konduksi panas, penyimpanan energi dan gerakan mencampur (Kreith, 1997). Contoh dari konveksi yaitu pada fase awal pelelehan PCM, perpindahan kalor di dalam tabung PCM berupa konduksi, namun ketika PCM mulai mencair konveksi menjadi faktor yang mendominasi terjadinya perpindahan kalor di dalam tabung PCM (Regin dkk, 2006), (Rosler dkk, 2011), (Longeon dkk, 2013). Dampak yang diakibatkan oleh konveksi yaitu timbulnya *driving force* yang memaksa fluida untuk bersirkulasi akibat perbedaan massa jenis. Persamaan laju perpindahan kalor konveksi dapat dihitung menggunakan persamaan 2.11.

$$q = hA(T_w - T) \dots\dots\dots (2.11)$$

dengan :

q = Laju perpindahan kalor (W)

A = Luas penampang (m<sup>2</sup>)

T<sub>w</sub> = Temperatur dinding (K)

T = Temperatur fluida (K)

h = Koefisien konveksi (W/m<sup>2</sup>.K)

### 2.2.7.3. Radiasi

Radiasi merupakan perpindahan panas yang tidak memerlukan media perantara. Perpindahan panas radiasi biasa terjadi pada bentuk gelombang elektromagnetik yang berasal dari sinar matahari karena adanya tumpukan energi termal pada semua benda. Apabila energi radiasi mengenai suatu benda, maka energinya ada yang dipantulkan, diserap dan diteruskan. Persamaan laju perpindahan panas radiasi dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan 2.12.

$$Q = \sigma eAT^4 \dots\dots\dots(2.12)$$

dengan :

q = Laju perpindahan kalor (W)

$\sigma$  = Konstanta Stefan-Boltzmann ( 5,669x10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>)

e = Emisivitas permukaan benda

A = Luas penampang (m<sup>2</sup>)

T = Temperatur (K)

### 2.2.8. Asumsi *Boussinesq*

Penentuan asumsi dalam metode numerik tidak pernah lepas dari pengaplikasiannya. Kasus pelelehan di *ANSYS Fluent* asumsi untuk sifat termal PCM bisa didekati dengan tiga asumsi yaitu *boussinesq*, *temperature-dependent* dan *phase-dependent*. Asumsi *Boussinesq* yakni asumsi permodelan pada PCM memiliki nilai *density* yang konstan, akan tetapi *density* yang masuk pada persamaan aritmatik yaitu dalam kondisi *density liquid* dan *density solid*. Asumsi *temperature-dependent* biasanya digunakan untuk mendefinisikan sifat termal PCM yang tergantung dengan temperatur.

Penelitian yang dilakukan Rosler dkk (2011) membuat permodelan *weigh function* untuk mengakomodasi asumsi *phase-dependent*. Permodelan densitas PCM dimodelkan ke dalam bentuk persamaan 2.12.

$$\rho = \gamma\rho_l + (1 - \gamma)\rho_s \dots\dots\dots (2.12)$$

dengan :

$\rho$  = Densitas (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_l$  = Densitas *liquid* (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_s$  = Densitas *solid* (kg/m<sup>3</sup>)

$\gamma$  = *Liquid fraction*

#### 2.2.9. User Define Function

*User Define Function* (UDF) digunakan apabila ada asumsi yang tidak disediakan oleh *ANSYS Fluent* secara *default*. Pendefinisian UDF terdiri atas tiga bagian. Definisi pertama adalah nama UDF yang berguna saat proses pemanggilan. Definisi ke dua adalah pendefinisian variabel dan definisi ke tiga adalah pendefinisian program yang merupakan penjabaran algoritma dari UDF. Setelah pembuatan *file* program UDF selesai, file tersebut harus di *compile* dalam format C.