

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar belakang

Energi surya merupakan salah satu energi terbarukan yang cukup menjanjikan, karena energi surya tersedia dengan cuma-cuma dan sistem teknologi dalam pemanfaatannya cukup sederhana dibanding energi terbarukan yang lain, selain itu energi surya juga ramah lingkungan karena dalam pemanfaatan energinya tidak meninggalkan zat-zat yang berbahaya bagi lingkungan. Energi surya dapat dimanfaatkan dengan dua macam teknologi diantara energi surya fotovoltaik atau yang sering disebut dengan solar cell dan surya termal, biasanya energi surya termal digunakan sebagai pemanas air rumah tangga, khususnya rumah tangga di perkotaan. (Abubakar lubis, 2007).

Indonesia merupakan salah satu negara yang berada di jalur katulistiwa yang memiliki iklim tropis yang mana pada jalur tersebut memiliki sebaran panas matahari yang cukup baik, karena matahari dapat bersinar sepanjang tahun tanpa adanya musim dingin. *Standard Test Conditions (STC)* menyatakan bahwa pada saat siang hari matahari dapat memancarkan energi radiasi panas sebesar 1000 Watt/m². Dengan melihat pernyataan tersebut energi surya di indonesia cukup berpotensi untuk di manfaatkan, salah satu alat yang dapat digunakan dalam pemanfaatan energi surya yaitu *Solar Water Heater*. (Sidopekso, 2011).

Solar water heater (SWH) adalah alat yang digunakan untuk memanaskan air dengan memanfaatkan energi termal surya, dimana sebagian besar komponennya terdiri dari kolektor dan tangki TES (*Temal Energi Storage*). TES berfungsi sebagai penyimpan panas yang dapat di gunakan pada saat diperlukan secara otomatis. *Sensible Heat Storage (SHS)* adalah salah satu penyimpan panas pada TES yang medinya mengandalkan perubahan temperatur tanpa adanya perubahan fasa. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui evolusi temperatur di dalam TES dengan penyimpan panas SHS yang menggunakan media berupa air sebagai *Heat Transfer Fluid (HTF)*.

Penelitian eksperimen tidak dapat mengetahui evolusi temperatur di dalam TES dengan spesifik selain proses pemasangan termokopel dan sensor rumit juga

dapat menghambat aliran air didalam tangki yang menyebabkan penyebaran panas tidak merata, maka dari itu penelitian dilakukan dengan simulasi menggunakan (ANSYS Fluent) salah satu *software* CFD, dengan simulasi juga kita dapat mengetahui nilai pelepasan kalor kumulatif, laju pelepasan kalor dan laju penurunan suhu air (HTF).

Hasil simulasi nantinya akan dibandingkan dengan penelitian secara eksperimen untuk memvalidasi data yang dihasilkan, selain itu digunakan sebagai acuan dalam penelien TES dengan penyimpanan panas LHS berisikan PCM berupa *Paraffin wax* ataupun campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga. Studi simulasi yang menggunakan *Computational Fluid Dynamic (CFD)*, *software ANSYS Fluent* adalah salah satu *software* CFD yang dapat digunakan dalam pengujian TES secara studi simulasi. Dalam pengujian tersebut diharapkan mendapat penyelesaian yang sistematis serta dapat melihat hasil konturnya secara 3D. (Marsaah. 2012).

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini yaitu tangki sebagai tempat air panas (*sensibel*) yang di dalamnya terdapat termokopel, dimana simulasi di lakukan dengan variasi debit air 1,5 dan 2,5 pada proses *discharging*. Kemudian hasil pengamatan data simulasi akan dibandingkan dengan hasil pengujian eksperimen dengan variasi yang sama. Studi simulasi menggunakan *Computational Fluid Dinamic (CFD)* yaitu *ANSYS Fluent 18.0*.

1.3 Asumsi dan Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini meliputi :

1. Tangki TES berisikan air yang didalamnya terdapat termokopel.
2. penelitian dilakukan pada saat kondisi discharging secara bertahap.
3. Kerugian kalor melalui permukaan tangki yang diisolasi diabaikan.
4. Aliran dianggap laminar.

1.4 Tujuan penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Menentukan evolusi temperatur yang terjadi di dalam tangki TES.
2. Membandingkan dengan penelitian eksperimen mengenai laju pelepasan kalor kumulatif.
3. Membandingkan dengan penelitian eksperimen mengenai laju pelepasan kalor.
4. Membandingkan dengan penelitian eksperimen mengenai laju penurunan suhu air.

1.5 Manfaat Penelitian

Pada penelitian ini terdapat beberapa manfaat, diantaranya :

1. Menyediakan *data base* discharging pada SWH dengan penyimpan panas SHS dengan media air.
2. Menjadi rujukan untuk penelitian *charging* dan *discharging* SWH yang berisikan paraffin, dan campuran paraffin dengan sebuk tembaga

BAB II

DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Indonesia adalah salah satu negara yang berpotensi baik untuk pemanfaatan energi matahari oleh karena itu Sidopekso (2011). meneliti tentang pemanfaatan energi matahari sebagai pemanas air, dimana SWH dengan mengandalkan prinsip thermoshipon dan ruangan tertutup dalam benda hitam berlapis kristal dengan harapan panas yang diterima dari matahari dapat maksimal serta menyebar merata dalam ruang dengan harapan suhu air dapat mencapai di atas 60°C pada siang hari. Hasil dari penelitian menunjukkan agar kolektor dibuat dengan kemiringan tertentu dan ruang dalam kolektor dapat terisolasi lebih baik agar suhu air dapat mencapai diatas 60°C.

SWH merupakan salah satu alat yang digunakan untuk memanfaatkan energi surya dimana energinya tidak akan pernah habis dan ramah lingkungan, selain itu penggunaan air panas dalam jumlah besar sangat diperlukan baik dalam kebutuhan rumah tangga atau industri yang kebanyakan masih menggunakan pemanas air dengan energi tambahan yaitu energi fosil untuk itu Zulkifli (2004). Meneliti tentang perbandingan pemanas air konvensional dengan pemanas air surya komersil, dimana pemanas air komersil merek *Sun Heater* dan pemanas air konvensional (hasil rancangan sendiri) dengan dimensi yang sama namun bahan matrial yang dipakai berbeda serta sistem pemanas pada pemanas air komersil menggunakan panas bantuan *heater*. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa SWH cukup memadai dimanfaatkan sebagai pemanas air rumah tangga untuk keperluan sehari-hari.

Agorlif (2012). Meneliti tentang studi pemanfaatan pemanas air tenaga surya tipe kotak sederhana yang di lengkapi *thermal storage solar water heater*. SWH dengan plat datar yang di dalamnya terdapat *stead acid* yang digunakan digunakan sebagai penyimpan panas. Penelitian tersebut dilakukan untuk mengetahui jumlah kalor yang diterima air sebanyak 100 liter dan biaya penghematan air panas. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa energi yang

diterima dari *stearic acid* untuk 100 liter yaitu 4,8 MJ dan rata-rata setiap hotel dapat menghemat biaya pengeluaran untuk air panas sebesar Rp. 184.000 di setiap harinya.

Nadjib dkk (2014). meneliti tentang penyimpanan energi termal pada mesin pemanas air tenaga surya *thermosyphon*, dimana penyimpan energi termal berupa TES yang berisikan air sebagai penyimpan termal jenis sensibel dan PCM berupa *paraffin wax* yang dimasukan kedalam kapsul-kapsul sebagai penyimpan termal dengan jenis laten. Tangki diposisikan diposisikan horizontal sedangkan termokopel dipasang di bagian SHS dan LHS, Aliran air melalui sisi inlet dan sisi outlet yang terletak dibagian samping tangki TES, susunan pipa kapsul yang digunakan adalah *inline* dengan aliran searah dengan orientasi kapsul. Penelitian ini mengungkapkan bahwa alat penukar kalor pipa kapsul PCM yang di susun segaris dapat berfungsi dengan baik memindahkan HTF KE PCM, transfer kalor juga baik tidak berbeda jauh suhu antara HTF dan PCM namun suhu *paraffin wax* yang berada di bagian bawah lebih rendah dari pada suhu air sehingga fungsi *paraffin wax* di kapsul bagian bawah sebagai media penyimpan dengan kata lain energi surya tidak tercapai.

Jufrizal dkk (2014). meneliti tentang kemampuan *thermal energy storage* (TES) di dalam kolektor surya plat datar pada proses *charging* dan *discharging*. Dimana di dalam plat kolektor berisikan *paraffin wax* sebanyak 19,5 kg. Hasil pengujian pada proses *charging* disimpulkan bahwa massa *paraffin wax* yang melebur terbanyak adalah 18,81 kg dan efisiensi termal tertinggi adalah 44,28%. Sedangkan pada proses *discharging* volume air terbanyak diperoleh 40 liter untuk temperatur minimum 35 °C dan efisiensi termal tertinggi adalah 46,81%.

Ocsirendi dkk (2017) meneliti tentang rancang bangun solar water heater dengan kolektor plat datar berbentuk spiral berbasis mikro kontroler, pada penelitian tersebut bertujuan untuk Mengetahui efisiensi dan optimalisasi biaya dari alat tersebut dan juga mengetahui efektivitas metode *continue* dan *delay* dalam hal penyerapan kalor. Disimpulkan bahwa SWH dapat memanaskan air pada tandon hingga 48,92°C, serta dengan menggunakan metode *continue*

menghasilkan temperatur yang lebih tinggi dibanding menggunakan metode *delay* perbedaan tersebut mencapai 10,66 °C.

Rusadi (2017) Pengaturan Laju Aliran untuk Meningkatkan Laju Perpindahan Panas pada Solar Water Heater di Kota Pontianak. Dimana penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efektifitas dan efesiensi dari pengaruh laju aliran fluida pada SWH. Disimpulkan bahwa Semakin rendah selisih temperatur pada sisi keluar *heat exchanger* maka semakin efektif pelepasan dan penyerapan yang dilakukan oleh *fluida* dalam *heat exchanger*. Sementara semakin besarnya nilai *Overall Cooficient Heat Transfer* (U) maka semakin besar juga jumlah panas yang diserap oleh *fluida* air sisi DWH Loop.

Susanto dkk (2017) Pengaruh Jarak Anatar Pipa pada Kolektor Terhadap Panas yang dihasilkan *Solar Water Heater* (SWH) penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perpindahan panas yang terjadi pada kolektor PATS serta efisiensi pada perubahan yang terjadi. Disimpulkan bahwa Semakin pendek jarak antara pipa tembaga maka semakin besar perpindahan panas konveksi dan efesiensinya.

Fertahi (2018) melakukan studi eksperimental dan nilai panas pada CFD dengan tangki posisi horizontal dilengkapi *Evacuated Tube Collectors* dan pipa pemanas. Penelitian tersebut bertujuan untuk mengetahui Mengetahui performa dari PATS tangki yang diletakkan secara horizontal dengan (ETC) *evacuated tube collector*. Hasil dari penelitian ini dapat didimpulkan bahwa Suhu rata-rata tangki horisontal meningkat dengan meningkatnya jumlah pipa panas, efisiensi pemakaian tangki penyimpanan horisontal terutama tergantung pada variasi suhu air sesaat.

Marsah (2014). meneliti tentang simulasi pelelehan dan pembekuan pada *phase change material* di dalam pemanas air tenaga surya menggunakan metode perhitungan komputasi dinamik. Dalam Marsah (2014) aplikasi yang digunakan *ANSYS Fluent* 12.0 dengan model gambar 2D dan jenis PCM yang digunakan adalah *stearic acid*. Penelitian ini disimulasikan dalam bentuk 2D dengan ukuran 1025 x 160 mm. Dari hasil simulasi ditunjukkan bahwa proses *discharging* sempurna berlangsung selama 6 Jam. Sedangkan penelitian ini menggunakan

aplikasi *ANSYS Fluent* yang lebih terbaru yakni *ANSYS Fluent* 18.0 serta berfokus pada model 3D pada geometri pipa ganda konsentrik.

Tabel 2.1. Ringkasan Tinjauan Pustaka

Penulisan	Judul	Tujuan	Hasil
Sidopekso (2011)	tentang pemanfaatan energi matahari sebagai pemanas air	Mengetahui performa dari PATS yang menggunakan prinsip <i>thermoshipon</i> dengan kolektor sistem tertutup	penelitian menunjukkan agar kolektor dibuat dengan kemiringan tertentu dan ruang dalam kolektor dapat terisolasi lebih baik agar suhu air dapat mencapai diatas 60°C
Zulkifi (2004)	perbandingan pemanas air konvensional dengan pemanas air surya komersil	Mengetahui intensitas radiasi surya dan efisiensi kolektor pemanas air surya	penelitian menunjukkan bahwa SWH cukup memadai dimanfaatkan sebagai pemanas air rumah tangga untuk keperluan sehari-hari.
Agorlif (2012)	studi pemanfaatan pemanas air tenaga surya tipe kotak sederhana yang di lengkapi <i>thermal storage solar water heater</i>	Mengetahui jumlah kalor yang di terima dari kolektor surya plat datar dengan <i>stead acid</i> untuk air 100 liter dan biaya penghematan untuk kebutuhan air panas	penelitian ini menunjukkan bahwa energi yang diterima dari <i>stearic acid</i> untuk 100 liter yaitu 4,8 MJ dan rata-rata setiap hotel dapat menghemat biaya pengeluaran untuk air panas sebesar Rp. 184.000 di setiap harinya.

Nadjib (2014)	Kajian Perpindahan Kalor Pada Tangki Pemanas Air Tenaga Surya Menggunakan Kapsul PCM Pipa-banyak Susunan Segaris	Mengetahui proses pemanasan pada HTF berupa air dan PCM berupa <i>paraffin wax</i> .	Proses pemanasan tidak terjadi perbedaan yang signifikan baik pada HTF ataupun PCM. Rata-rata kecepatan pada HTF 0,109 °C/menit dan PCM 0,108 °C/menit. Terjadi selisih rata-rata pada kapsul bagian bawah 2,57°C.
Jufrizal dkk (2014)	Studi Ekperimental Performasi Solar Water Heater Jenis Kolektor Plat Datar dengan Penambahan Thermaal Energi Storage	Mengetahui efisiensi termal <i>paraffin wax</i> pada proses <i>charging</i> dan <i>discharging</i>	<i>paraffin wax</i> yang melebur terbanyak adalah 18,81 kg dan efisiensi termal tertinggi adalah 44,28%. Sedangkan pada proses <i>discharging</i> volume air terbanyak diperoleh 40 liter untuk temperatur minimum 35 derajat dan efisiensi termal tertinggi adalah 46,81%.
Ocsirendi (2018)	Rancang Bangun Solar Water Heater dengan Kolektor Pelat Datar Berbentuk Spiral Berbasis Mikrokontroler	Mengetahui efisiensi dan optimalisasi biaya dari alat tersebut dan juga mengetahui efektivitas metode <i>continue</i> dan <i>delay</i> dalam hal	SWH dapat memanaskan air pada tandon hingga 48,92°C, serta dengan menggunakan metode <i>continue</i> menghasilkan temperatur yang lebih tinggi dibanding menggunakan metode

		penyerapan kalor	<i>delay</i> perbedaan tersebut mencapai 10,66 °C
Rusadi (2017)	Pengaturan Laju Aliran untuk Meningkatkan Laju Perpindahan Panas pada Solar Water Heater di Kota Pontianak	Mengetahui efektivitas dan efisiensi dari pengaruh laju aliran fluida pada SWH	Semakin rendah selisih temperatur pada sisi keluar <i>heat exchanger</i> maka semakin efektif pelepasan dan penyerapan yang dilakukan oleh <i>fluida</i> dalam <i>heat exchanger</i> . Sementara semakin besarnya nilai <i>Overall Coefficient Heat Transfer (U)</i> maka semakin besar juga jumlah panas yang diserap oleh <i>fluida</i> air sisi DWH <i>Loop</i> .
Susanto dkk (2017)	Pengaruh Jarak Anatar Pipa pada Kolektor Terhadap Panas yang Dihasilkan Solar Water Heater (SWH)	Mengetahui perpindahan panas yang terjadi pada kolektor PATS serta efisiensi pada perubahan yang terjadi	Semakin pendek jarak anantara pipa tembaga maka semakin besar perpindahan panas konveksi dan efisiensinya
Marsah (2014)	Simulasi Pelelehan dan Pembekuan pada <i>Phase Change Material</i> di Dalam Pemanas Air Tenaga Surya	Mengetahui proses pelelehan dan pembekuan PCM yang ada pada kolektor.	Pelelehan PCM membutuhkan waktu ± 7 jam atau pada pukul 13:00 sedangkan untuk pembekuan PCM terjadi pada pukul 19:00

Fertahi (2018)	dengan Metode Komputasi Dinamik Menggunakan Perhitungan		
	Experimental study and CFD thermal assessment of horizontal hot water storage tank integrating Evacuated Tube Collectors with heat pipes	Mengetahui performa dari PATS tangki yang diletakkan secara horizontal dengan <i>evacuated tube collector</i>	Suhu rata-rata tangki horisontal meningkat dengan meningkatnya jumlah pipa panas, efisiensi pemakaian tangki penyimpanan horisontal terutama tergantung pada variasi suhu air sesaat

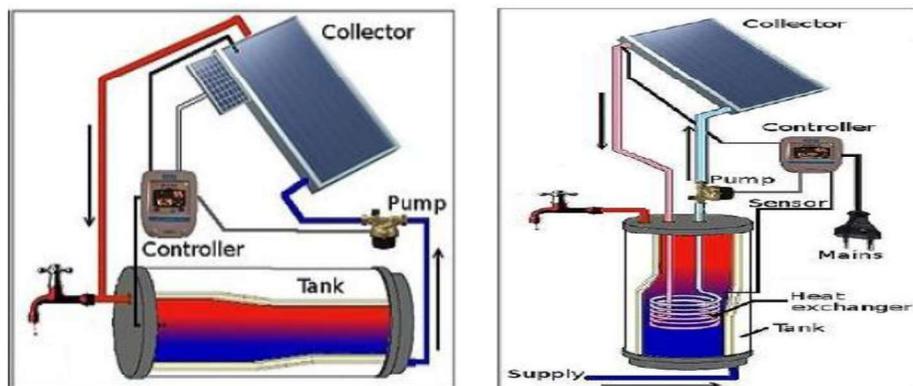
2.2. DASAR TEORI

2.2.1. Solar Water Heater (SWH)

SWH merupakan salah satu alat yang digunakan untuk memanfaatkan energi radiasi matahari untuk memanaskan air melalui plat kolektor yang bisa digunakan untuk memenuhi kebutuhan rumah tangga ataupun industri. Alat ini biasanya terdiri dari kolektor panas dan tangki penyimpanan Jacky dkk (2016). Berdasarkan jenis alirannya SWH dibedakan menjadi dua kelompok diantaranya sistem aktif dan sistem pasif (*thermoshipon*) M Nadjib dkk (2014).

2.2.1.1. Sistem Aktif

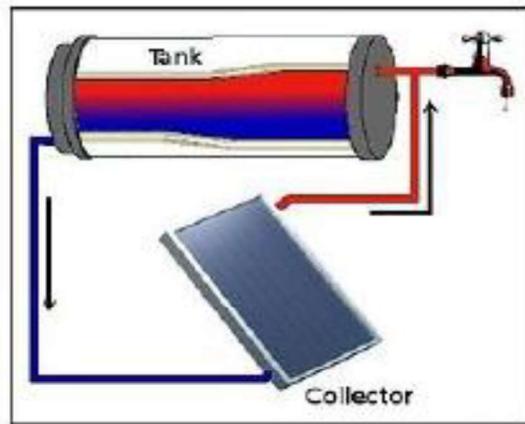
Sistem aktif adalah sistem yang memerlukan energi tambahan untuk mensirkulasikan air ke kolektor surya, seperti pompa sedangkan system aktif terbagi menjadi 2 sistem, yaitu *direc/open loop* dan *indirec/clese loop* seperti ditunjukkan pada gambar 2.1. SWH dengan sistem aktif *direc/open loop* adalah sistem pemanas air yang sirkulasi langsung dari kolektor surya, sederhananya air dari kolektor surya dapat langsung digunakan tanpa harus dipaaskan lagi dengan *heat excanger*. Sedangkan, *close loop* adalah sistem yang sirkulasi airnya tidak langsung. Sebelum digunakan air yang keluar dari *output* kolektor surya akan disimpan di dalam tangki untuk dipanaskan lagi dengan *heat excanger* sampai pada temperatur tertentu.



Gambar 2.1. (a) *direc/open loop* (b) *indirec/close loop*

2.2.1.2. Sistem pasif (*Thermoshyphon*)

Sistem pasif adalah sistem yang tidak memerlukan energi tambahan seperti pompa dalam menjalankannya seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2. Sistem ini mengandalkan pada konveksi natural sebagai penggerak. Hal ini dapat terjadi dapat terjadi dikarenakan pengurangan *fluid density* pada air yang dipanaskan sehingga air yang berada di kolektor dapat naik kedalam tangki. Sedangkan air yang berada di tangki akan turun ke kolektor yang disebabkan karena pengaruh gravitasi yang menjadikan massa jenis air dalam tangki lebih berat. Sirkulasi ini akan berulang hingga temperatur air seragam. Sistem pasif terbagi menjadi 2, yaitu :



Gambar 2.2. pasif (*Thermoshyphon*)

2.2.2. Thermal Energy Storage

Thermal Energy Storage (TES) adalah tangki di gunakan sebagai tempat penyimpanan energi termal yang di dapatkan dari kolektor surya atau dari *heat exchanger*, prinsip kerjanya hampir sama dengan baterai dimana *storage* berfungsi dengan otomatis apabila energi yang tersimpan akan digunakan. Dengan penambahan TES berpengaruh menambah penyimpanan panas dan memperkecil *heat loss* yang terjadi selain itu juga temperatur kerjanya dapat diatur sesuai yang dibutuhkan. Dengan demikian penyimpanan dengan TES akan menjadi lebih efisien. 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), energi disimpan dengan perubahan temperatur pada material penyimpan . Media yang digunakan pada SHS terdapat dua macam, yaitu media penyimpan cair berupa air, minyak dan molten salt, dan media penyimpan padat dapat berupa logam padat. Material-material tersebut mudah di dapat dan harganya relatif murah namun memiliki densitasnya rendah. Perbandingan energi yang tersimpan dapat ditunjukkan pada gambar 2.3.

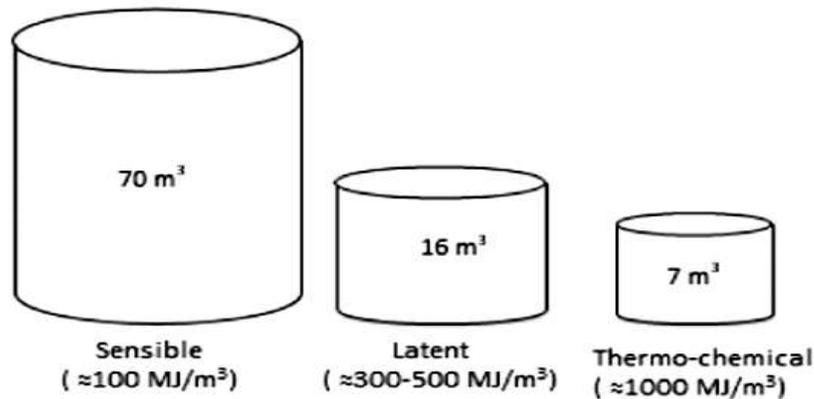
Total energi panas yang tersimpan dalam bentuk kalor *sensible* dapat dicari atau dihitung menggunakan persamaan 2.1 (Sharma, 2009).

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

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

dengan :

- T_i = temperatur akhir (°C)
- T_f = temperature awal (°C)
- M = massa material penyimpan (kg)
- C_{ap} = kalor jenis rata-rata material penyimpanan (J/kg. °C)



Gambar.2.3. Volume beberapa storage untuk penyimpanan (1800kWh) (lebevre dan Tezel,2017)

2.2.2.2. Laten Heat Storage

Laten Heat Storage (LHS) adalah media penyimpan energi panas dalam bentuk laten. Dimana panas laten adalah jumlah energi yang diserap atau selama perubahan fasa terjadi. Materiala yang digunakan untuk penyimpanan laten biasanya disebut Phase Change Material. Kelebihan dari LHS di banding penyimpanan panas lainnya yaitu dengan tempat yang minim namun dapat menyimpan energi panas yang besar karena medianya memiliki densitas yang tinggi (Zhou dan Zhao, 2011).

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

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

dengan :

- m = massa (kg)
- L = kalor laten perubahan padat-cair (J/kg)
- Lg = kalor laten cair-gas (J/kg)
- C_{p,g} = kalor jenis material fase gas (J/kg°C)
- C_{p,l} = kalor jenis material fase cair (J/kg°C)
- C_{p,s} = kalor jenis material fase padat (J/kg°C)

2.2.2.3. Thermo-Chamical 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)

Δh_r = kalor endotermik (kJ/mol)

α_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 (Meng, 2008). 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

Pada proses *charging* diawali dengan penyerapan energi termal yang ditandai dengan perubahan fase dari PCM dari *solid* ke *liquid* sampai temperatur tertentu hingga PCM mengalami perubahan fase yang sempurna.

Sedangkan proses *discharging* yaitu dengan awalan suhu yang tinggi kemudian PCM akan melepaskan energi termalnya sedikit-sedikit yang ditandai dengan adanya perubahan fase dari PCM mulai dari *liquid* ke *solid*, proses ini berlangsung sampai suhu pada PCM dan HTF nya sama. Ilustrasi dari proses charging dan discharging dapat kita lihat pada Gambar 2.11 (Marsah, 2014)

2.2.5. Computational fluid dynamics (CFD)

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 :

ρ = Densitas (kg/m³)

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

μ = Viskositas (Pa.s)

H = Enthalpy (J/kg)

c_p = Specific heat (J/kg.K)

ΔH = Latent heat (J/kg)

k = Konduktivitas termal (W/m.K)

T = Temperatur (K)

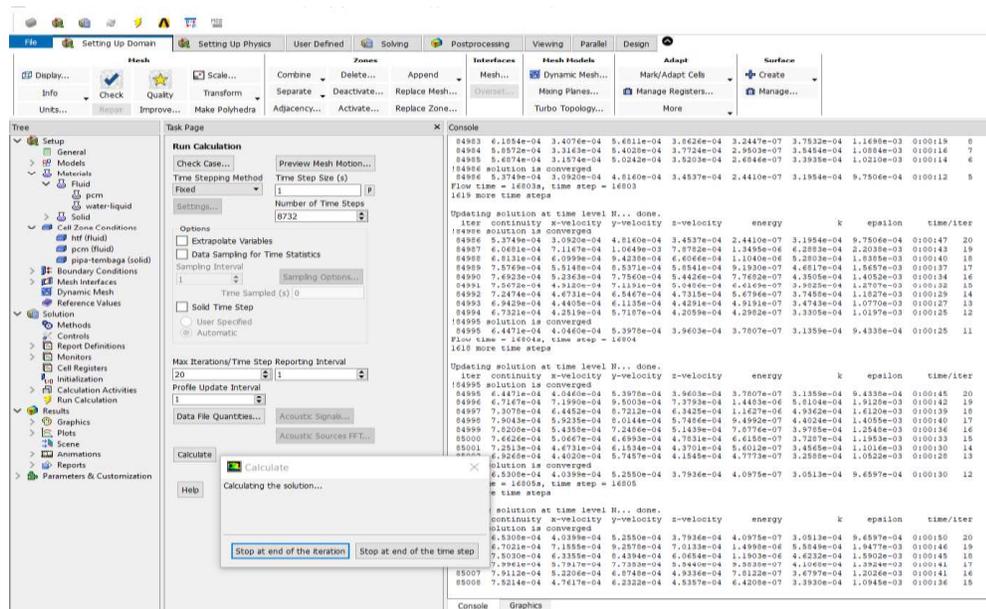
S = Source term

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

T_{ref} = Reference temperature (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*[®], *MATLAB*, *OpenFOAM*[®], dan *XFlow*[®]. *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 2.4.



Gambar 2.4. 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 inisialisai 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.

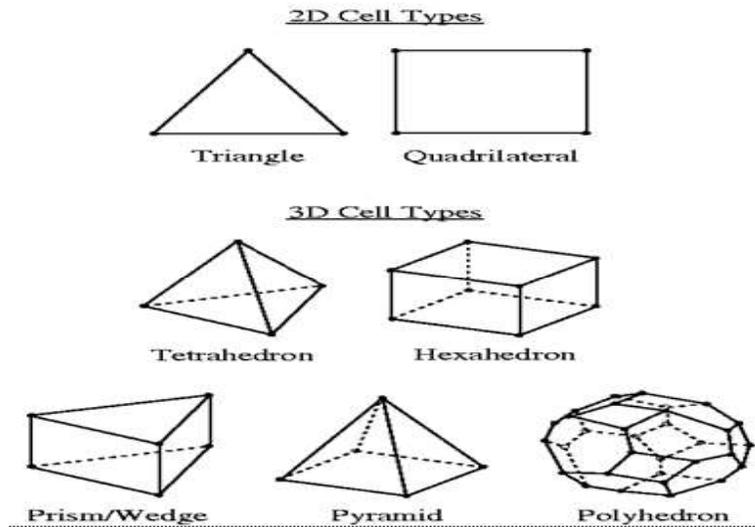
2.2.6. Proses Simulasi CFD

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*

Tahap ini merupakan tahap awal dari proses CFD, pada tahap ini ada beberapa proses diantaranya sebagai berikut :

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 2.5.



Gambar 2 5. Macam-Macam Bentuk *Mesh*

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 *ortogonal quality* merupakan parameter kualitas *mesh* yang tegak lurus pada bentuk *mesh* dengan tingkat *orthogonal*.

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 *Reynold stress*

Reynold 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

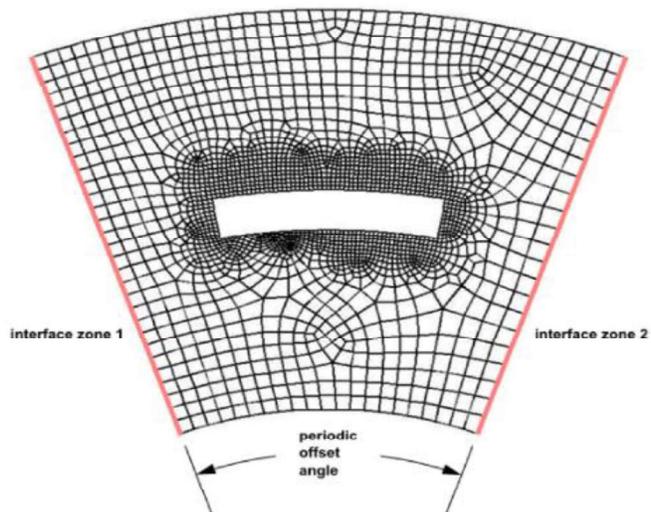
h. *Outflow*

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

6. *Mesh Interfaces*

a. *Periodic Boundary Condition*

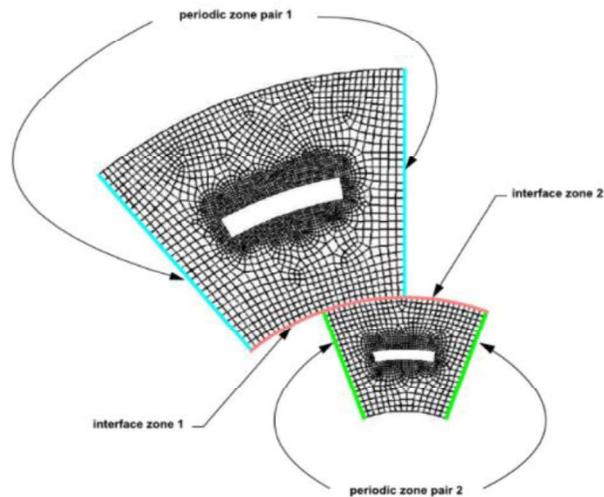
Periodic boundary condition digunakan ketika geometri mengalami sifat berulang secara berkala. *Mesh interface periodic boundary condition* dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2 6. *Periodic Boundary Condition*

b. *Periodic Repeats*

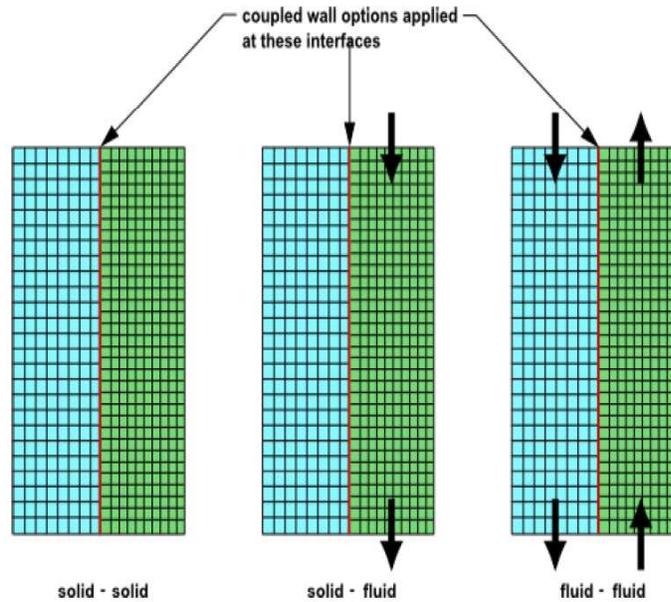
Periodic Repeats digunakan ketika geometri memiliki dua atau lebih *cell zones* yang terhubung dan mengalami sifat berulang secara berkala. Gambar 2.7. menunjukkan gambar *periodic repeats*.



Gambar 2 7. *Periodic Repeats*

c. *Coupled Wall*

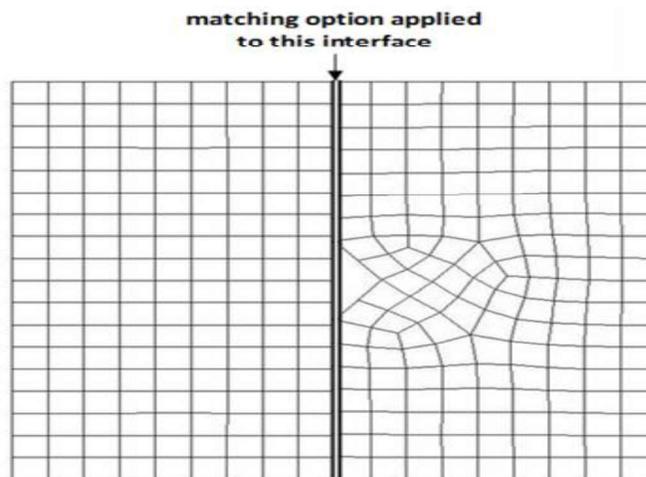
Coupled wall digunakan untuk menghubungkan antar *interface* yang berbeda *wall condition*. *Coupled wall* ditunjukkan pada Gambar 2.8



Gambar 2.8 *Coupled Wall*

d. *Matching*

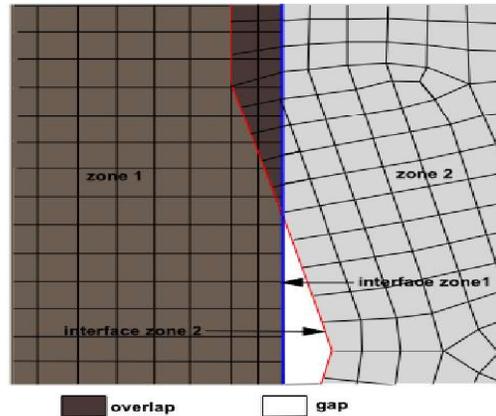
Matching digunakan ketika dua *interface zone* tidak terhubung dengan baik seperti bentuk *mesh* yang berbeda, geometri yang tidak terhubung atau memiliki gap. Contoh kasus penggunaan *interface matching* dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 *Matching*

e. *Mapped*

Penggunaan *mapped* tidak jauh berbeda dengan penggunaan *coupled*. *Mapped* dipilih ketika dua *wall condition* yang terhubung memiliki *gap* atau *overlap*. Gambar 2.10. menunjukkan contoh kasus penggunaan *mapped*.



Gambar 2.10 *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 memiliki *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 temperature yang berbeda. Selain mengetahui bagaimana energi kalor itu berpindah, ilmu ini juga dapat mengetahui laju perpindahan kalor pad 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 (m²)
- K = Konduktivitas termal (W/m.K)
- ΔT = Perubahan temperature (K)
- Δx = 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 (Watt)
- A = Luas penampang (m²)
- Tw = Temperatur dinding (K)
- T = Temperatur fluida (K)
- h = Koefisien konveksi (W/m².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)
- σ = Konstanta Stefan-Boltzmann ($5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)
- e = Emisivitas permukaan benda
- A = Luas penampang (m^2)
- T = Temperatur (K)