

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

SWH adalah sistem pemanas air yang mendapatkan energi kalor dari matahari untuk memanaskan air. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Ogueke, dkk (2009) berdasarkan jenis aliran HTF, SWH memiliki dua kategori sistem yaitu sistem aktif (*active system*) dan sistem pasif (*passive system*). Sistem aktif menggunakan pompa listrik, katup, dan alat pengontrol untuk menyalurkan air dari tangki menuju kolektor. Karena menggunakan, pompa dari sistem aktif adalah dapat ditempatkan dimana saja. Sistem pasif memiliki instalasi yang menggabungkan kolektor dan penyimpanan menjadi satu. Sistem pasif tidak menggunakan bantuan alat dan hanya mengandalkan penyaluran panas secara alami untuk mengalirkan air. Sistem aktif memiliki nilai efisiensi sekitar 35%-80% lebih tinggi dibandingkan dengan sistem pasif.

Ocsirendi, dkk (2018) merancang SWH dengan kolektor plat datar tetapi berbentuk spiral dan berbasis mikrokontroler. Tujuan dilakukannya perancangan tersebut adalah untuk mengetahui efisiensi dan optimalisasi biaya dari penggunaan SWH dengan metode debit *continue* dan *discontinue*. Penelitian tersebut menghasilkan kesimpulan bahwa dan metode debit secara *continue* terbukti lebih baik dalam hal efektifitas pemanasan air dibanding dengan metode debit *discontinue* perbedaan suhu maksimal 10,66 °C. Tetapi dalam konsumsi

daya listrik pompa lebih besar dibanding dengan metode *discontinue*, karena penggunaan pompa yang terus menerus menyala.

Penelitian tentang solusi penyimpanan panas *sensible* telah banyak dilakukan oleh para peneliti terdahulu. Salah satunya penelitian yang dilakukan Gabriela (2011). Dalam penelitian tersebut telah ditemukan bahwa cara kerja penyimpanan panas *sensible* adalah dengan mengubah suhu media penyimpanan seperti air, batu, tanah untuk menyimpan panas. Pada SHS terdapat suatu kendala yang wajar terjadi yaitu ketika air panas dikeluarkan dari tempat penyimpanan maka akan terjadi perbedaan suhu antara air yang keluar dengan air yang masih di dalam tempat penyimpanan. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa sistem penyimpanan panas *sensible* memiliki kelebihan pada desain yang simpel daripada sistem penyimpanan lainnya tetapi memiliki kekurangan tidak dapat menyimpan atau menyalurkan temperature yang konstan.

Beemkumar, dkk (2017) melakukan penelitian tentang sistem SHS dan LHS menggunakan beberapa jenis HTF. Penelitian ini membandingkan tentang air dan *therminol-66* sebagai HTF dan menggunakan *paraffin wax* sebagai PCM karena memiliki *low melting point* (50°C-60°C). Proses pengujian pertama dilakukan menggunakan air sebagai HTF dengan proses *charging* kemudian dilanjutkan proses *discharging*. Pengujian serupa juga dilakukan dengan menggunakan *therminol-66* sebagai HTF. Dari pengujian tersebut didapatkan bahwa *therminol-66* dapat meningkatkan kapasitas LHS karena titik lelehnya sekitar (350°C - 400°C), tetapi air memiliki kapasitas SHS yang lebih besar sehingga cocok digunakan sebagai HTF pada PCM yang memiliki *low melting point*.

Faninger (1993) melakukan penelitian tentang *Thermal Energy storage* (TES). Terdapat tiga media cara penyimpanan panas pada TES, yaitu panas *sensible*, *Phase Change Materials* (PCM), dan *thermos chemical reaction*. Meskipun penyimpanan panas menggunakan reaksi kimia mampu mendapatkan kapasitas panas lebih tinggi dibandingkan penyimpanan panas *sensible*, tetapi penyimpanan panas *sensible* lebih murah dan telah banyak digunakan. Penggunaan media panas *sensible* yang paling banyak digunakan adalah air. Air paling mudah didapatkan dan murah, selain itu air juga memiliki konduktivitas

termal tinggi. Hal ini dibuktikan melalui penelitian Cengel (2004), dalam penelitian tersebut telah ditemukan bahwa air memiliki sifat-sifat diantaranya adalah nilai konduktivitas termal air @25°C mencapai 0,607 W/m.K, *specific heat* @25°C sebesar 4,18 kJ/kg.K, *boiling point* sebesar 100°C.

Wirawan, dkk (2015) melakukan penelitian tentang pengaruh jumlah pipa terhadap laju pelepasan kalor di kolektor surya absorber batu granit. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui berapa lama batu granit melepas panas yang dihasilkan dari kolektor surya. Dari penelitian didapatkan hasil yaitu, jumlah pipa dapat mempengaruhi besar kecil laju perpindahan dari kerugian kalor terhadap lingkungan. Jumlah debit juga berpengaruh pada besarnya kalor yang diserap oleh air, debit yang lebih besar akan mempengaruhi penyerapan kalor yang besar.

Studi numerik tentang TES menggunakan *paraffin wax* FNP 0090 pada proses *discharging* pernah dilakukan oleh Wei, dkk (2005). Dalam studi ini dilakukan pengamatan terhadap pengaruh konfigurasi geometris serta pengaruh temperatur kondisi awal tangki dan laju aliran massa pada proses pelepasan kalor. PCM berada pada kapsul dengan bentuk 4 geometri yaitu bentuk bola, plat datar, silinder dan pipa dengan diameter dan ketebalan yang berbeda. Air digunakan sebagai HTF yang mengalir di luar kapsul untuk kapsul yang berbentuk bola dan silinder, sedangkan untuk bentuk kapsul dan pipa HTF dialirkan dari dalam. Hasil pengamatan yang didapatkan adalah pelepasan kalor pada TES lebih cepat dengan peningkatan laju aliran massa dan temperatur *inlet* yang rendah. Variasi pada debit juga berpengaruh pada waktu *discharging*. Di antara keempat geometris tersebut kapsul berbentuk bola memiliki efisiensi paling baik dalam pelepasan kalor kemudian diikuti bentuk silinder, pelat dan tabung.

Penggunaan software pemodelan telah banyak dilakukan para peneliti untuk mendapatkan hasil penelitian yang lebih akurat. Salah satunya pengujian menggunakan aplikasi CFD untuk mengetahui laju perpindahan kalor pada proses *discharging*. Afrianto (2018) pernah melakukan pengujian dengan menggunakan *software Ansys* 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. Proses *discharging* menyebabkan terjadinya

proses pembekuan pada *paraffin wax*, air yang mengalir secara kontinyu menyebabkan perpindahan kalor dari PCM ke air dan mengakibatkan penurunan temperatur pada PCM sehingga kembali ke fase padat. Dari pengujian tersebut didapatkan hasil yaitu arah radial memiliki kecepatan waktu pembekuan yang lebih cepat dibandingkan dengan arah aksial.

Penelitian tentang simulasi pelelehan dan pembekuan pada PCM di dalam pemanas air tenaga matahari pernah dilakukan oleh Marsah (2014) dengan menggunakan metode perhitungan komputasi dinamik. Dalam penelitian ini model yang disimulasikan dalam 2D dengan dimensi 1025 x 160 mm dengan bantuan *software Ansys Fluent 12.0* dan menggunakan PCM dengan jenis *stearic acid*. Hasil dari simulasi yang telah dilakukan adalah proses *discharging* akan mulai berlangsung pada pukul 19.00 WIB saat sinar matahari sudah benar-benar menghilang.

Anggara (2017) melakukan simulasi proses pelelehan *paraffin wax*. *Paraffin wax* yang digunakan berjenis *Rubitherm 52 (RT-52)*. Tujuan dari pengujian ini adalah 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°C , 75°C , dan 90°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.

Studi numerik tentang perbandingan pemodelan pelelehan PCM *paraffin wax* dengan pemanas dari dalam secara horizontal pernah dilakukan oleh Regin, dkk (2006). Dalam studi penelitian dilakukan dengan menggunakan tiga pemodelan yaitu pertama pemodelan mencakup peranan konduksi, konveksi, tanpa *melting range* PCM, kedua pemodelan diasumsikan terdapat peran konduksi, konveksi, dan tanpa *melting range* PCM, dan pemodelan ketiga diasumsikan terdapat peranan konduksi dan tanpa *melting range*. Hasil penelitian

yang didapat pemodelan pertama yang paling mendekati hasil eksperimen dengan akumulasi *error* 10% yang terjadi saat memprediksi waktu pelepasan.

Tabel 2.1. Ringkasan dari Tinjauan Pustaka

Penulis	Judul	Tujuan	Hasil
Ogueke 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.
Ocsirendi, dkk (2018)	Rancang Bangun <i>Solar Water Heater</i> dengan Kolektor Pelat Datar Berbentuk <i>Spiral</i> Berbasis Mikrokontroler	Mengetahui efesiensi dan optimalisasi biaya dari penggunaan SWH dengan metode debit kontinyu dan bertahap.	Penggunaan metode debit secara kontinyu terbukti lebih baik dalam hal efektifitas pemanasan air dibanding dengan metode debit bertahap perbedaan suhu maksimal 10,66 °C.
Gabriela (2011)	<i>Seasonal Sensible Thermal Energy Storage Solutions</i>	Mengetahui kekurangan dan kelebihan sistem penyimpanan panas <i>sensible</i> .	SHS memiliki kelebihan pada desain yang simpel tetapi memiliki kekurangan pada ukuran yang besar dan tidak dapat menyimpan dengan temperatur yang konstan.
Beemkumar, dkk (2017)	<i>Investigation of Sensible and Latent Heat Storage System using various HTF</i>	Mengetahui perbandingan air dan <i>therminol-66</i> sebagai HTF.	Air sebagai HTF memiliki penyimpanan SHS lebih besar, sedangkan <i>therminol-66</i> meningkatkan penyimpanan pada LHS.

Faninger (1998)	<i>Thermal Energy Storage</i>	Mengetahui kelebihan air sebagai media penyimpanan <i>sensible</i> pada TES.	Media penyimpanan <i>sensible</i> yang paling digunakan adalah air karena mudah didapatkan, murah, dan memiliki nilai konduktivitas termal yang tinggi.
Cengel (2004)	<i>Heat Transfer a Practical Approach</i>	Mengetahui sifat-sifat air sebagai HTF.	Air memiliki sifat-sifat diantaranya adalah nilai konduktivitas termal air @25°C mencapai 0,607 W/m.K, <i>specific heat</i> @25°C sebesar 4,18 J/kg.K, <i>boiling point</i> sebesar 100°C.
Wirawan, dkk (2015)	Pengaruh Jumlah Pipa Terhadap Laju Pelepasan Kalor Pada Kolektor Surya Absorber Batu Granit	Mengetahui beberapa faktor yang mempengaruhi laju pelepasan kalor pada SHS.	Jumlah pipa dan besarnya debit mempengaruhi laju perpindahan kalor pada kolektor surya yang menggunakan media SHS.
Wei, dkk (2005)	Study on PCM Heat Storage System for Rapid Heat Supply	Mengetahi pengaruh konfigurasi geometris serta pengaruh temperatur kondisi awal tangki	Kapsul berbentuk bola memiliki efisiensi paling baik dalam pelepasan kalor, dan pelepasan kalor pada TES lebih cepat dengan peningkatan laju aliran massa.
Afrianto (2018)	Studi Proses Pembekuan <i>Paraffin Wax</i> di Dalam Pipa Ganda	Mengetahui hasil proses pembekuan <i>paraffin wax</i> di	Kecepatan waktu penurunan suhu pada arah radial lebih cepat dibandingkan dengan arah aksial.

	Konsentrik dengan Variasi Temperatur Kondisi Awal <i>Phase Change Material</i> Menggunakan Simulasi <i>Computational Fluid Dynamics</i>	dalam tabung pipa ganda konsentrik pada arah aksial dan radial.	
Marsah (2014)	Simulasi Pelelehan dan Pembekuan pada <i>Phase Change Material</i> di Dalam Pemanas Air Tenaga Surya dengan Menggunakan Metode Perhitungan Komputasi Dinamik	Mengetahui proses membekunya PCM yang ada pada kolektor.	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.
Regin dkk (2006)	<i>Latent heat thermal energy storage using cylindrical capsule: Numerical and experimental investigations</i>	Mengetahui pelelehan paraffin wax dengan menggunakan tiga pemodelan dengan mencakup peran konduksi, konduksi dan tanpa <i>melting range</i> .	Pemodelan pertama yang paling mendekati hasil eksperimen dengan akumulasi <i>error</i> 10% yang terjadi saat memprediksi waktu pelelehan.

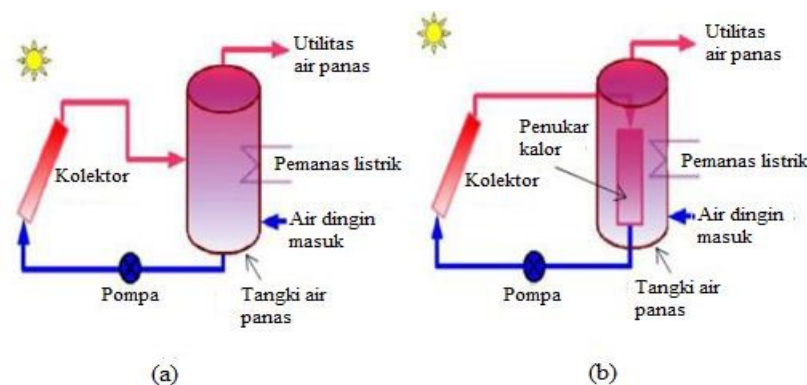
2.2. Dasar Teori

2.2.1. Solar Water Heater (SWH)

Solar Water Heater (SWH) merupakan salah satu aplikasi teknologi dari pemanfaatan energi matahari dengan cara menangkap energi yang dihasilkan dari radiasi matahari kemudian digunakan untuk memanaskan air yang dapat digunakan untuk keperluan komersial, rumah tangga ataupun industri (Nshimyumuremyi dkk, 2019). Perkembangan pasar untuk SWH tumbuh dengan cepat yaitu menyumbang 15% untuk tingkat pertumbuhan tahunan. Pangsa pasar terbesar SWH adalah India, China, dan Eropa. Secara umum komponen SWH terdiri dari kolektor panas, tangki penyimpanan, dan pipa penghubung (Jayakanth dkk, 2016). Berdasarkan jenis alirannya sistem SWH dibagi menjadi dua kategori yaitu sistem aktif dan sistem pasif (*Thermosyphon*) (Dwivedi, 2009).

2.2.1.1. Sistem Aktif

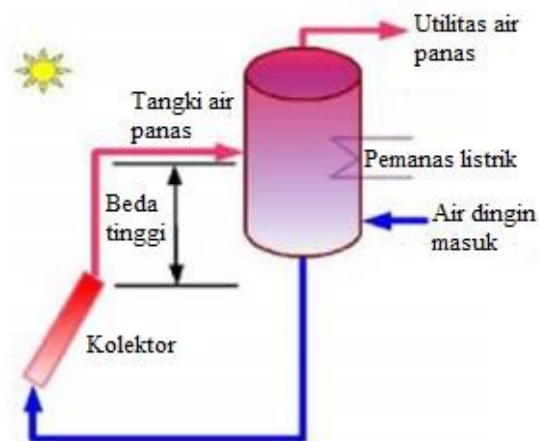
Solar Water Heater sistem aktif merupakan pemanas air yang menggunakan pompa listrik, *valves*, dan *controllers* untuk mendistribusikan air melalui kolektor panas. SWH sistem aktif lebih lanjut lagi dibagi menjadi dua yaitu *direct/open loop* dan *indirect/close loop* (Shelke dkk, 2015). SWH dengan sistem aktif *direct/open loop* yang ditunjukkan pada gambar 2.1 merupakan sistem pemanas air dimana panas dipindahkan oleh kolektor secara langsung menuju tangki tanpa membutuhkan perantara lain. Sedangkan, SWH dengan sistem aktif *indirect/close* merupakan pemanas air yang dalam memindahkan kalor fluidanya tidak tercampur dengan fluida kerja yang berada di tangki.



Gambar 2.1. SWH Sistem (a) Aktif-direct/Open Loop (b) Aktif-indirect/Close Loop (Dwivedi, 2009)

2.2.1.2. Sistem Pasif (*Thermosyphon*)

Solar Water Heater dengan sistem pasif atau *thermosyphon* adalah pemanas air yang memanfaatkan konveksi alami air antara panel kolektor matahari dengan tangka air panas, sehingga sistem ini tidak membutuhkan energi listrik seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Saat 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 2.2. SWH Sistem Pasif (Dwivedi, 2009)

2.2.2. *Thermal Energy Storage (TES)*

Thermal Energy Storage (TES) adalah sebuah tempat penyimpanan energi panas berupa tangki, memiliki prinsip kerja yang berfungsi menyimpan energi panas agar energi yang tersimpan dapat digunakan kapan pun yang diinginkan. Sharma dan Chen (2009) menjelaskan TES adalah komponen paling penting pada sistem energi panas karena menyediakan penyimpanan energi yang dapat mengatasi ketidakcocokan antara waktu ketersediaan energi matahari dan waktu kebutuhan penggunaan energi. Menurut Lefebvre dan Tezel (2017) pada energi panas terdapat proses *melting*, *heating*, *cooling*, *solidifying*, *thermo-chemical* dan *vaporizing* sehingga energi panas dapat disimpan dan juga dapat dilepas. Menurut Khot dan Khanwalkar (2016) menyatakan tipe TES dibagi

menjadi 3 yaitu *Sensible Heat Storage*, *Latent Heat Storage*, dan *Termo-chemical Storage*.

2.2.2.1. *Sensible Heat Storage*

Pada *Sensible Heat Storage* (SHS), energi tersimpan dengan menaikkan temperature suatu media dengan menggunakan kapasitas yang dimiliki media tersebut. SHS memiliki dua jenis media penyimpanan yaitu cair dan padat. Adapun media zat cair yang digunakan seperti air, minyak dan *molten salts*. Keunggulan dari SHS adalah biaya murah dan mediana mudah didapat. Tetapi SHS memiliki kekurangan yaitu densitas energy yang paling rendah diantara ketiga tipe *storage* lainnya dan *heat loss* yang merugikan sebagai material penyimpan energi. Perbandingan energi yang tersimpan dapat terlihat pada Gambar 2.3.

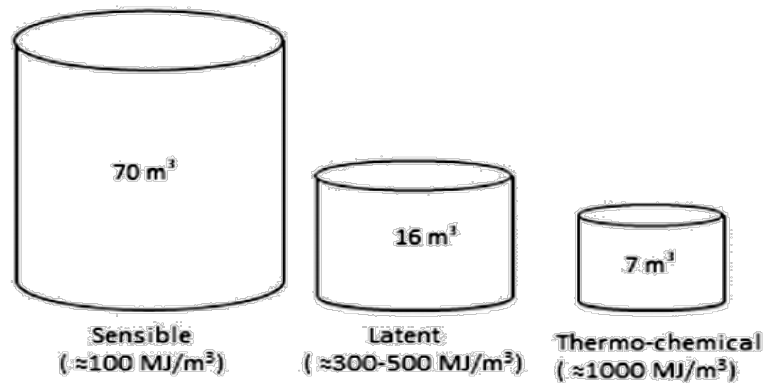
Total Besarnya energi yang tersimpan (dalam *Joule*) dapat dihitung dengan persamaan (2.1) berikut (Sharma dkk, 2009).

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

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

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 2.3. Volume dari *Storage* untuk Penyimpanan (1800kWh)
(Levebvre dan Tezel, 2017)

2.2.2.2. Latent Heat Storage

Latent Heat Storage (LHS) merupakan media penyimpanan yang menyimpan energi panas ke dalam bentuk energi laten. Panas laten yaitu jumlah panas yang diserap atau dilepaskan pada saat perubahan fasa terjadi. Material yang digunakan untuk menyimpan energi panas laten disebut Phase Change Material. Keuntungan LHS dibandingkan dengan SHS yaitu memiliki densitas energi yang tinggi dan perubahan fase pada PCM dari padat ke cair dan temperatur lelehnya relatif stabil (Sarbu dan Dorca, 2019)

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_g = 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-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* adalah memiliki 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 penyimpanan (kg)

Δh_r = kalor endotermik (kJ/mol)

α_r = fraksi yang bereaksi (mol)

2.2.3. *Discharging*

Proses *discharging* yaitu awal mula temperatur tinggi dan sedikit demi sedikit akan melepaskan energi termal yang tersimpan air yang ditandai dengan penurunan suhu pada air. Proses *discharging* akan terus berlanjut hingga temperatur akhir mencapai hasil ditentukan.

2.2.4. *Computational Fluid Dynamics*

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah sekumpulan metodologi berbasis komputer bermodel matematis yang dapat menyelesaikan dan menganalisa elemen-elemen perilaku fluida dinamis secara numerik. Komputer berperan penting pada simulasi CFD karena sangat diperlukan sebagai media proses dalam bentuk iterasi. Metode perhitungan numerik yang dilakukan aplikasi CFD memerlukan kontrol-kontrol perhitungan yang menggunakan 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

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

2. Persamaan atur momentum

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

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

3. Persamaan atur energi

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

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

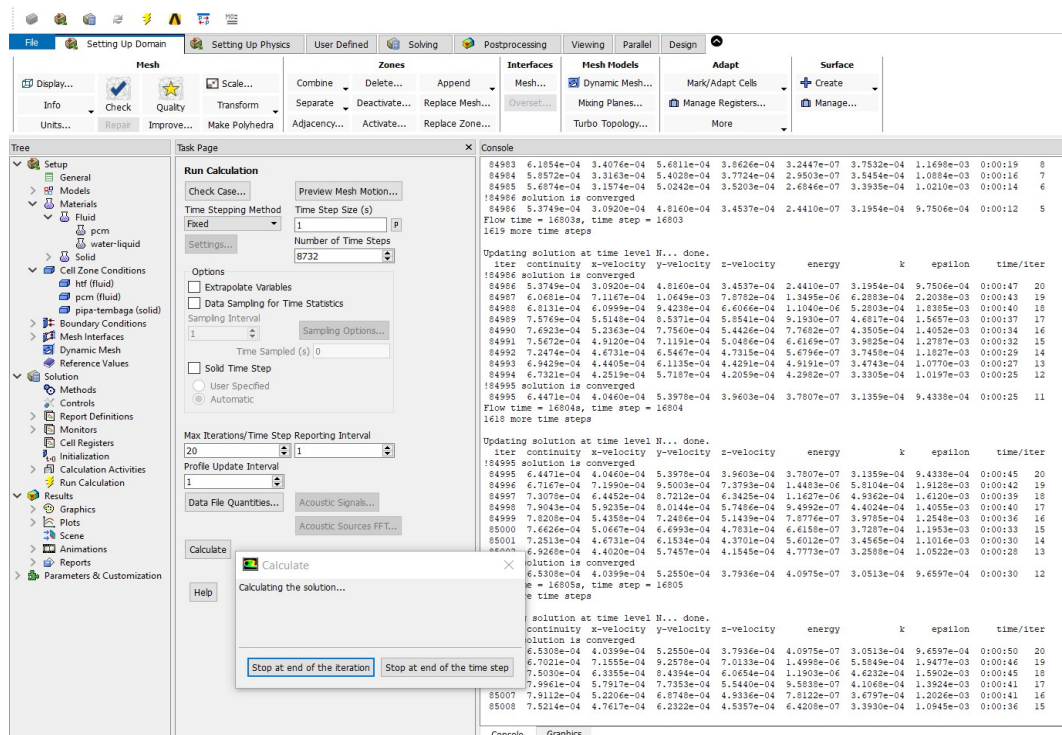
$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \dots \dots \dots (2.9)$$

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* (W/m³)
- h_{ref} = *Reference enthalpy* (J/kg)
- T_{ref} = *Reference temperatur* (K)

Persamaan yang awalnya memiliki jumlah sel tak terhingga (kontinum) diubah menjadi jumlah sel terhingga (diskrit). Selain 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. Graphics User Interface (GUI) *Ansyes 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 volumetrik 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.

2.2.5. Proses Simulasi CFD

Secara garis besar terdapat tiga proses dalam simulasi CFD yakni : *pre-processing*, *processing* dan *post processing*. Proses-proses tersebut dapat dilakukan secara langsung dengan beragam *software* CFD salah satunya *ANSYS Fluent*.

Tahapan-tahapan tersebut dapat diproses langsung dengan beragam *software* CFD salah satunya *ANSYS Fluent*.

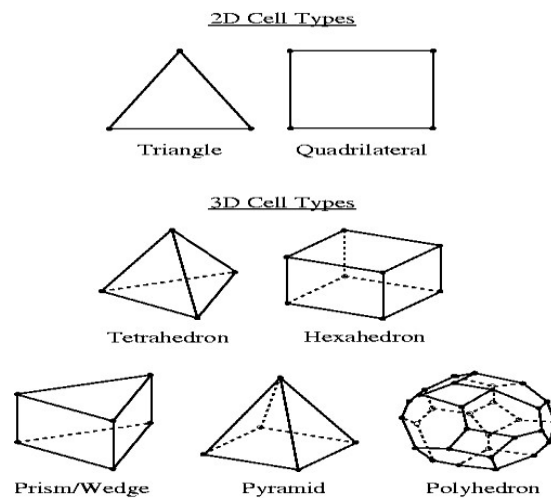
2.2.5.1. *Pre-processing*

Tahap *pre-processing* merupakan tahap awal dari proses CFD, pada tahap ini dilakukan beberapa proses sebagai berikut :

1. Pembuatan bentuk geometri atau domain komputasi. Domain pada kasus ini 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 adalah tahapan pembagian domain komputasi menjadi bagian kecil atau yang biasa disebut sel dalam satu kesatuan domain. Ukuran dan bentuk *mesh* akan menentukan proses serta hasil akhir dari simulasi pada CFD. Semakin kecil ukuran *mesh*, akumulasi *mesh* bertambah banyak sehingga akurasi hasilnya akan semakin baik tetapi membutuhkan waktu yang lebih lama dan komputer yang digunakan harus memiliki spesifikasi tinggi. *Mesh* yang dihasilkan dari domain komputasi dua dimensi terbagi menjadi dua jenis sel yaitu *Triangel* dan *Quadrilateral*, sedangkan untuk domain komputasi tiga dimensi terbagi menjadi tipe *Tetrahedron*, *Pyramid*, *Triangular Prism*, *Hexahedron*, dan *Polyhedron* 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*.

2.2.6.1. *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*

General memiliki *solver setting* dengan dua model yaitu *type solver* dan *timer solver*. *Type solver* terbagi atas *pressure-based* dan *density-based* sedangkan *time solver* terbagi atas *steady* dan *transient*.

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 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*.

3. Menentukan *cell zone* dan jenis material

Library ANSYS Fluent merupakan perpustakaan atau tempat dimana terdapat berbagai jenis material yang dapat digunakan untuk simulasi baik berupa material *fluid* maupun *solid*.

4. Mengatur *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

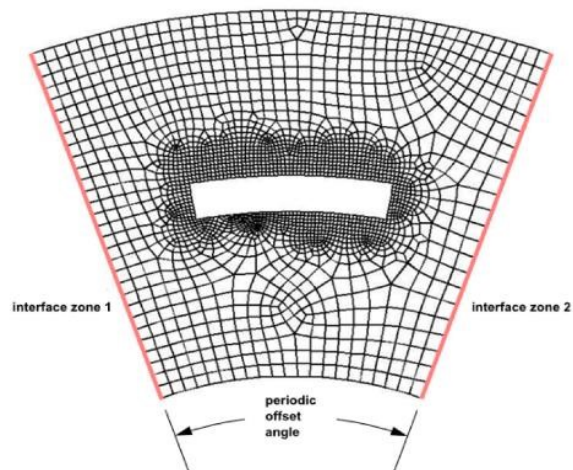
h. *Outflow*

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

5. Mesh Interfaces

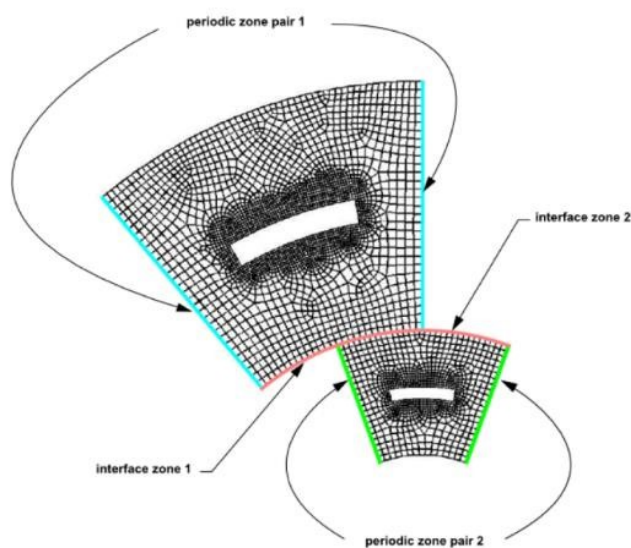
a. Periodic Boundary Condition

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*

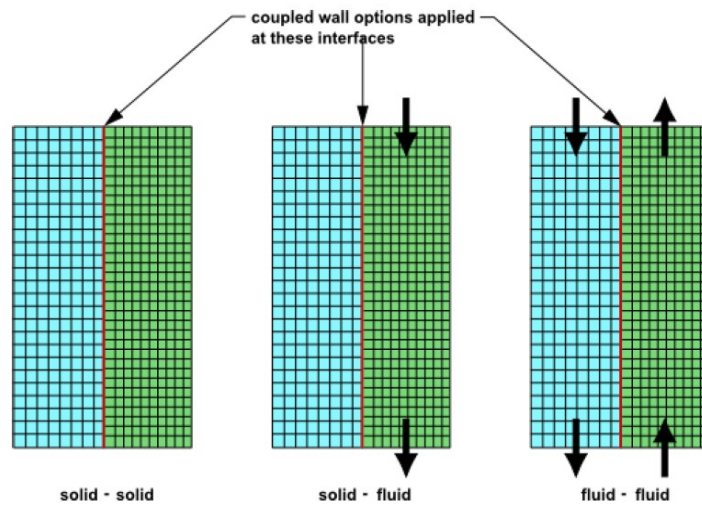
b. *Periodic Repeats* *Periodic Repeats* digunakan ketika geometri memiliki dua atau lebih *cell zones* yang terhubung dan mengalami sifat berulang secara berkala. Gambar 2.7. menunjukkan gambar *periodic repeats*.



Gambar 2.7. *Periodic Repeats*

c. *Coupled Wall*

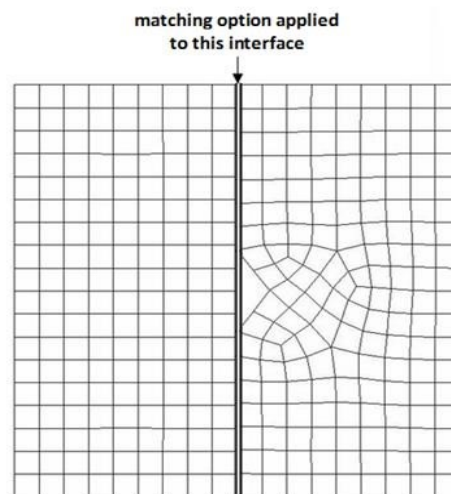
Coupled wall digunakan untuk menghubungkan antar *interface* yang berbeda *wall condition*. *Coupled wall* ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. *Coupled Wall*

d. *Matching*

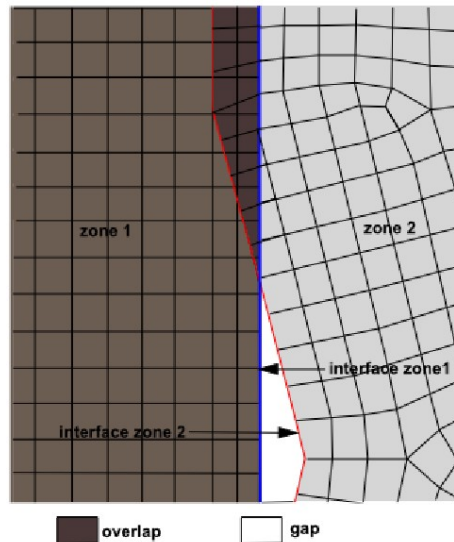
Matching digunakan ketika dua *interface zone* tidak terhubung dengan baik seperti bentuk *mesh* yang berbeda, geometri yang tidak terhubung atau memiliki gap. Contoh kasus penggunaan *interface matching* dapat dilihat pada Gambar 2.9.



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.

6. *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*.

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

8. *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.

2.2.6.2. *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.

2.2.6. 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.

2.2.6.1. 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 temperatur (K)

Δx = Tebal (m)

2.2.6.2. Konveksi

Konveksi yaitu proses transfer panas dengan melibatkan perpindahan massa molekul-molekul fluida dari satu bagian ke bagian lainnya (Beckman dan Duffie, 2013). Contoh dari konveksi yaitu pada saat air yang bersuhu lebih tinggi masuk ke dalam tangki yang berisi air dingin mengakibatkan air dengan suhu yang lebih tinggi bergerak ke posisi yang lebih tinggi, dan air dengan suhu yang lebih rendah cenderung bergerak ke bawah (Kristanto dan Laeyadi, 2000). 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 2.8

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

dengan :

q = Laju perpindahan kalor (W)

A = Luas penampang (m²)

T_w = Temperatur dinding (K)

T = Temperatur fluida (K)

h = Koefisien konveksi (W/m².K)

2.2.6.3. 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)