

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

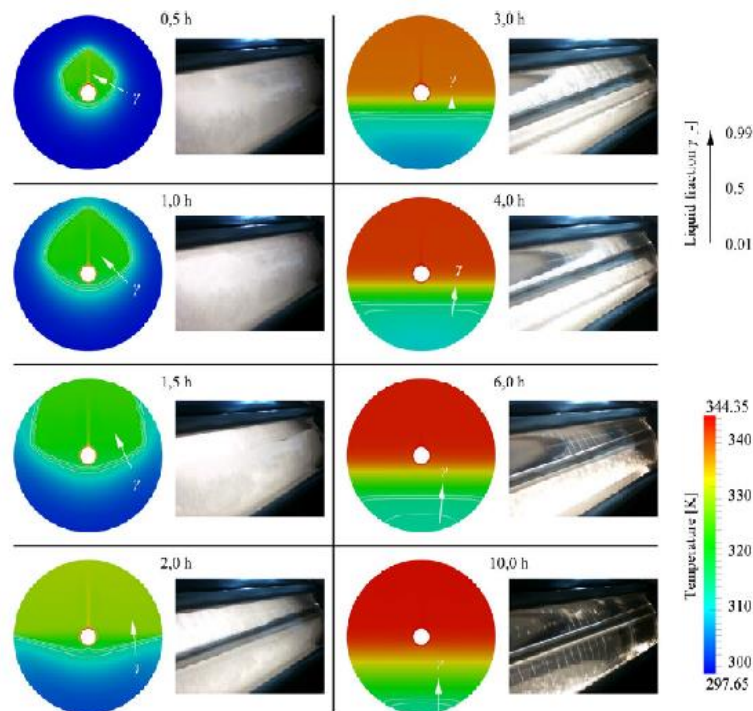
2.1. Tinjauan Pustaka

Penelitian berbasis modeling dengan permodelan pelelehan PCM telah banyak dilakukan oleh peneliti untuk memprediksi perpindahan kalor. Penelitian terdahulu pernah dilakukan oleh Nadjib dan Suhanan (2014) tentang perpindahan kalor pada tangki TES sistem PATS *thermosyphon*. Fokus yang dikaji dalam penelitian tersebut yakni menganalisis evolusi temperatur air dan *paraffin wax* RT52 selama proses *charging*. Hasil penelitian perpindahan kalor dari HTF ke PCM berlangsung efektif serta data pada temperatur masih diambil secara aksial. Dilain sisi, waktu *melting* tidak dapat ditentukan karena proses dilakukan secara *outdoor*. Oleh karena itu, sumber kalornya menggunakan *heat flux* yang berfluktuasi.

Hosseini dkk (2014) melakukan eksperimental dan simulasi evolusi PCM pada *heat exchanger* tipe *shell and tube* sebagai tangki TES. Tujuan dari penelitian ini yaitu membandingkan evolusi temperatur air dan PCM serta waktu dengan variasi temperatur yang berbeda. Peningkatan temperatur HTF *inlet* pada penelitian yakni 80°C akan mengurangi waktu *melting* total sebesar 37%.

Perbandingan permodelan dari pelelehan PCM *paraffin wax* dengan pemanasan dari dalam secara horizontal silinder, Regin dkk (2006) melakukan penelitian dengan tiga permodelan yaitu permodelan pertama mencakup peranan konduksi, konveksi, serta tanpa *melting range* PCM. Permodelan kedua diasumsikan terdapat peran konduksi, konveksi, dan tanpa *melting range* PCM. Permodelan ketiga, diasumsikan terdapat peranan konduksi dan tanpa *melting range*. Setelah melakukan validasi, disimpulkan bahwa permodelan pertama yang paling mendekati hasil eksperimen tersebut dengan akumulasi *error* 10% yang terjadi saat memprediksi waktu pelelehan.

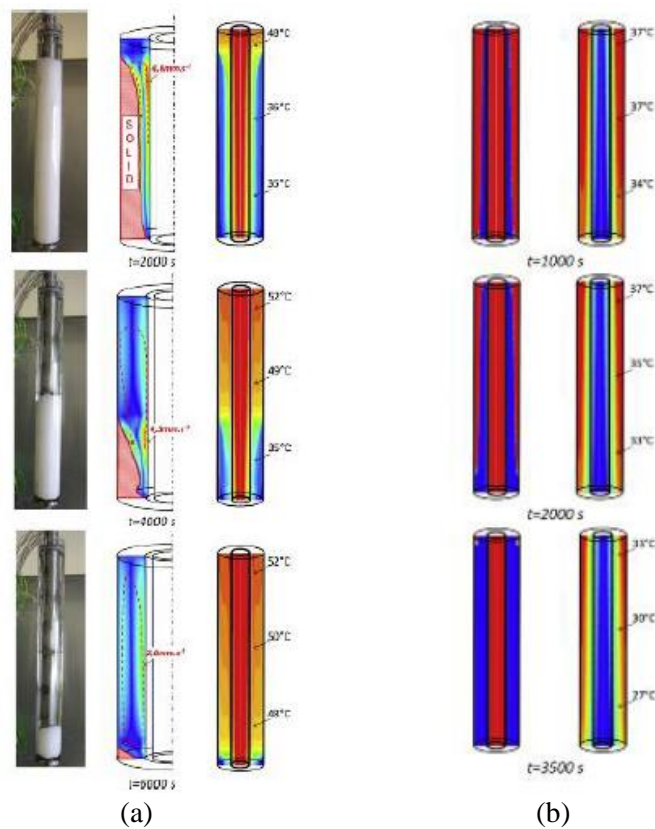
Rosler dkk (2011) melakukan simulasi menggunakan *enthalpy porosity* dengan bentuk geometri pemanasan *shell and tube* dari dalam. Nilai kalor jenis pada PCM diasumsikan bergantung pada fraksi pelelehan. Gambar 2.1 merupakan hasil penelitian dengan menggunakan *software Openfoam* untuk simulasi numerik, simulasi yang dilakukan dalam bentuk dua dimensi.



Gambar 2.1. Perbandingan Kontur Pelelehan Simulasi dengan Eksperimen
(Rosler dkk. 2011)

Kesimpulan yang didapat bahwa konveksi alami berperan penting saat proses pelelehan. Gambar 2.1 menunjukkan bahwa daerah bagian atas tabung mengalami pelelehan terlebih dahulu (warna merah) dibandingkan daerah yang di bagian bawah tabung, hal ini sebagai efek dari adanya konveksi alami.

Longeon dkk (2013) melakukan penelitian menggunakan *software ANSYS Fluent* dengan menggunakan permodelan *enthalpy porosity* secara dua dimensi dan hasil dari simulasi yang telah divalidasi dengan eksperimen seperti di Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Kontur (a) pelelehan dan (b) pembekuan (Longeon dkk.2013)

Gambar 2.2 (a) menjelaskan bahwa bagian atas tabung mengalami proses pelelehan terlebih dahulu, hal ini disebabkan karena terdapat konveksi alami. Gambar 2.2 (b) menunjukkan bahwa kontur pembekuan terjadi secara simetris yang mengakibatkan tidak adanya peranan konveksi alami selama proses pembekuan.

Penelitian ini memiliki kesamaan dengan penelitian yang dilakukan oleh Longeon dkk (2013) dan Hosseini dkk (2014). Fokus yang dikaji pada penelitian ini yaitu proses pelelehan *paraffin wax* pada *heat exchanger* dimana saluran *input* dan *output* HTF berada pada arah sumbu tabung TES.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Definisi *Thermal Energy Storage* (TES)

TES merupakan suatu teknologi yang digunakan sebagai penyimpanan energi seperti baterai, akan tetapi TES tidak menyimpan energi listrik namun hanya energi termal yang berasal dari sumber panas. Maka dengan adanya TES, pemanfaatan

energi termal dapat menjadi lebih efisien. Pembuatan *design* TES sendiri sudah dimulai sejak beberapa tahun yang lalu. Menurut Dincer dkk (2011) *design* TES harus memiliki beberapa unsur penting seperti tingginya kapasitas penyimpanan energi, *lifetime* yang baik, ukuran yang konsisten, harga yang relatif murah, efisiensi, ketersediaannya cukup, serta aman. Kemudian menurut Cabeza dkk (2011) menyebutkan bahwa kebutuhan *design* TES harus memiliki densitas energi yang tinggi, baiknya perpindahan kalor dari HTF menuju PCM, kestabilan sifat material dalam sistem, dan juga sedikitnya *energy loss* saat disimpan.

Pengaplikasian TES sendiri memiliki tiga siklus yaitu *charging*, *storage*, dan *discharging* (Cabeza dkk. 2011). *Charging* merupakan proses memindahkan energi dari HTF ke media penyimpanan energi. Selama media fase belum berubah dan temperaturnya masih rendah, maka proses *charging* akan terus berlangsung. Kemudian proses *storage*, proses ini memiliki tujuan menjaga energi yang telah tersimpan agar tidak berkurang dalam jangka waktu yang telah diprediksikan. Selanjutnya yang terakhir *discharging*, merupakan proses memindahkan energi dari media penyimpanan energi ke HTF. Siklus tersebut bertujuan untuk memanfaatkan kembali energi yang telah disimpan.

Menurut Akgun dkk (2007) menyatakan bahwa TES mampu menyimpan energi termal ke dalam tiga bentuk yaitu *sensible heat*, *latent heat*, dan *thermochemical*. Bentuk energi termal yang sering disimpan yaitu bentuk *Latent Heat Thermal Energy Storage* (LHTES) dan *Sensible Heat Thermal Energy Storage* (SHTES).

2.2.2. Latent Heat Thermal Energy Storage (LHTES)

Latent Heat Thermal Energy Storage merupakan suatu aplikasi dari TES. Dalam LHTES ini, energi termal disimpan dalam bentuk energi laten pada media penyimpanan (PCM). Terjadinya perubahan fase pada PCM dari padat ke cair dan temperatur lelehnya relatif stabil saat menyimpan energi merupakan pengertian dari energi laten sendiri (Dincer dkk 2011). Keunggulan yang paling menonjol dari LHTES adalah densitas energinya yang besar, sehingga mampu menyimpan *energy* yang besar pada wadah yang relatif kecil (Zhou dan Zhao, 2011).

2.2.3. *Phase Change Material (PCM)*

PCM adalah komponen terpenting dari LHTES karena PCM memiliki peranan penting sebagai media penyimpanan energi termal. Menurut Dincer dkk. (2011) air/es, *salt hydrate*, dan beberapa polimer merupakan tipe-tipe PCM yang sering digunakan. Beberapa pertimbangan operasional yang harus dimiliki PCM supaya dapat diterapkan dengan baik, diantaranya yaitu: memiliki *enthalpy latent* yang tinggi, kemampuan PCM untuk kembali ke fase awal secara menyeluruh, temperatur leleh PCM disesuaikan dengan temperatur HTF, tidak mengalami reaksi kimia antara PCM dengan tabung, perubahan *volume* PCM saat berubah fase tidak terlalu besar, tidak beracun dan murah. Menurut Dincer dkk. (2011) terdapat beberapa jenis PCM yang dapat digunakan, salah satunya yaitu *paraffin wax*.

Menurut Cabeza dkk. (2011) *paraffin wax* merupakan material gabungan dari beberapa komponen organik yang sesuai sebagai media yang berfungsi untuk menyimpan energi untuk sistem *solar heating*.

2.2.4. *Computational Fluid Dynamics (CFD)*

CFD yaitu sebuah metode yang digunakan sebagai alat simulasi perilaku fluida dinamis dengan menggunakan metode numerik. Penelitian pada kasus ini, peranan komputer sangat diperlukan sebagai media untuk proses simulasi dalam bentuk iterasi. CFD terdiri dari tiga persamaan atur yang menjadi dasar dalam proses kalkulasi yang dilakukan. Persamaan atur *Navier-Stokes* pada CFD terdiri dari persamaan atur massa, persamaan atur momentum, dan persamaan atur energi. Tiga persamaan tersebut akan diturunkan menjadi persamaan aljabar. Tahun 1800 persamaan tersebut ditemukan oleh M. Navier di Perancis dan G.G. Stokes di Inggris. Berikut persamaan 2.1 dan 2.2 merupakan persamaan umum yang sering digunakan pada simulasi numerik yang diatur dalam *theory guide* ANSYS Fluent untuk *basic fluid flow*.

- a. Persamaan atur massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.1)$$

b. Persamaan atur momentum

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2.2)$$

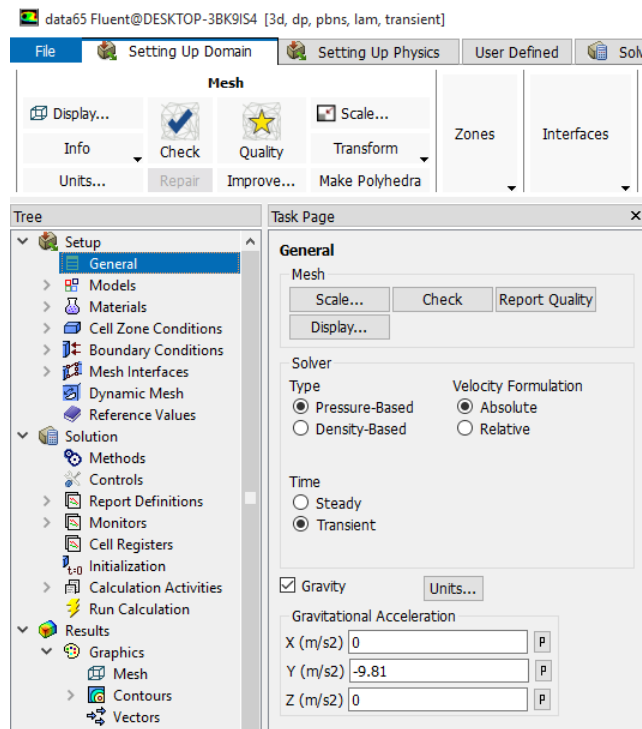
$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} l \right] \quad (2.3)$$

Dimana :

| | | |
|--------------|---|----------------------|
| ρ | = | Densitas |
| $\bar{\tau}$ | = | <i>Stress tensor</i> |
| \vec{v} | = | Kecepatan |
| \vec{g} | = | Gaya gravitasi |
| \vec{F} | = | Gaya eksternal |
| μ | = | Viskositas |
| l | = | <i>Unit tensor</i> |
| t | = | Waktu |
| ∇ | = | <i>Nabla</i> |

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.

CFD sendiri memiliki berbagai ragam perangkat lunak yang dapat digunakan. ANSYS Fluent sendiri merupakan suatu pilihan yang sering digunakan karena memiliki fitur yang lengkap dan memudahkan dalam pengoperasian. Gambar 2.3 menunjukkan *graphic user interface* (GUI) pada perangkat lunak ANSYS Fluent.



Gambar 2.3. Tampilan GUI pada ANSYS Fluent

Berikut langkah-langkah dasar pada ANSYS Fluent dalam mensimulasikan suatu kasus:

1. Penentuan jumlah *mesh* serta pemeriksaan *geometry*

Nilai *volume mesh* diusahakan tidak mempunyai nilai negatif dikarenakan dapat menyebabkan gangguan saat proses iterasi. Nilai negatif merupakan tanda adanya kegagalan pada permukaan *mesh* dalam proses pembentukan *mesh*. Maka, sebelum simulasi perlu dilakukan *mesh volume* dan *geometry check up* terlebih dahulu.

2. Menetapkan formula atau model dari simulasi

Formulasi aliran fluida memiliki beberapa jenis yang dapat digunakan sesuai dengan kasus yang diteliti. Ketepatan formulasi yang digunakan diharapkan dapat memberi hasil yang lebih akurat.

3. *Cell Zone*

Terdapat beberapa jenis material yang tersedia pada *library* ANSYS Fluent, baik berupa material *fluid* maupun *solid* yang dapat digunakan untuk simulasi sehingga ditentukan sesuai jenisnya.

4. Penentuan Jenis *Solver Setting*

Solver memiliki dua jenis yang dapat digunakan ketika simulasi, yaitu *pressure based* dan *density based*. *Pressure based* menggunakan persamaan momentum dan kontinuitas sebagai formula utama, sementara *density based* menggunakan persamaan momentum, kontinuitas, energi, dan spesies dalam proses perhitungan. *Pressure based solver* dapat digunakan dalam regim aliran yang luas, mulai dari aliran dengan kecepatan rendah hingga aliran dengan kecepatan tinggi termasuk aliran fluida *incompressible* maupun *compressible*. Sedangkan *density based* cenderung digunakan jika terdapat keterkaitan antara densitas, energi, momentum, serta spesies seperti dalam kasus *combustion* pada aliran *compressible* kecepatan tinggi, aliran *hypersonic*, interaksi *shockwave* dan lainnya.

5. Mengatur *Boundary Condition*

Proses ini mencakup pemasukan data berdasarkan jenis *boundary condition* yang telah ditetapkan.

6. Pemilihan nilai *Under Relaxation Factor*

URF atau *Under Relaxation Factor* berupa angka digunakan untuk mengatur besar atau kecilnya toleransi untuk *variable* seperti energi, kecepatan, viskositas, momentum, dan lain-lain. Pengatur URF ditujukan guna meminimalisir peluang *error* dengan memaksimalkan toleransi saat hendak melakukan iterasi.

7. Menetapkan Metode Inisialisasi yang ingin digunakan

Inisialisasi merupakan proses memasukkan nilai awal sebelum simulasi dijalankan. Terdapat tiga jenis metode yang tersedia yaitu *standard initialization*, *hybrid initialization*, *full multi grid (FMG) initialization*.

8. Memasukan Jumlah Iterisasi yang dilakukan

Jumlah iterasi yang diperlukan tergantung pada kerumitan suatu model, jika model tersebut kompleks, maka iterasi yang diperlukan pun semakin besar agar hasilnya konvergen.

9. Kalkulasi

Perintah untuk proses iterasi pada ANSYS Fluent sesuai dengan parameter yang sudah dimasukkan.

2.2.5. Proses Simulasi CFD

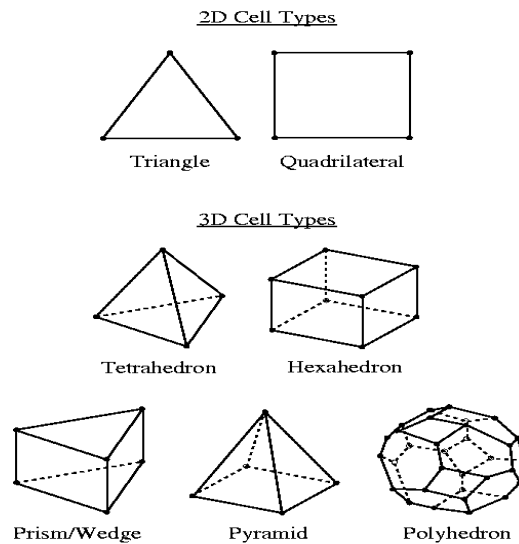
Ketika melakukan simulasi CFD, terdapat tiga tahapan yang perlu dilakukan yaitu *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*. Tahapan-tahapan tersebut dapat diproses langsung dengan *software* ANSYS Fluent ataupun menggunakan *software* lain sesuai dengan tingkat kerumitan geometri atau kasusnya.

2.2.5.1 Pre-processing

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

- A. 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. *Inventor* dan *solidworks* merupakan *software* untuk pembuatan geometri yang rumit.
- B. 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 pembentukan

meshing dengan tipe *tetra*, *prisma*, *pyramid*, atau *heksa* dapat dihasilkan dari domain komputasi tiga dimensi, seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Macam-macam bentuk *Mesh* (ANSYS Tutorial Guide)

Mesh yang dibentuk tidak selalu berbentuk heksa. Penggunaan *mesh* berbentuk *tetra* dapat dilakukan untuk bentuk geometri yang rumit. Untuk mengetahui kualitas *mesh* yang telah dilakukan pembentukan dapat menggunakan 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*.

2.2.5.2 Processing

Processing, merupakan tahapan kedua pada CFD. Tahapan dalam *processing* dilakukan pemilihan metode inisialisasi serta menentukan kondisi batas atau *boundary condition*.

2.2.5.3 Post processing

Post processing, tahap terakhir pada proses CFD. Hasil proses perhitungan dari kondisi batas dan metode *solver* yang digunakan akan ditampilkan pada proses ini. Tahap *post processing* dapat memberi tampilan grafis yang menunjukkan *mesh*, *contour*, *vector*, dan *pathline*.

2.2.6. Persamaan Atur Pelelehan

Beberapa persamaan yang digunakan pada CFD merupakan persamaan atur konservasi massa, konservasi momentum, dan konservasi energi. ANSYS Fluent *theory guide*, menyediakan persamaan atur pelelehan dapat ditulis pada persamaan 2.4 untuk momentum dan persamaan 2.5.f untuk energi.

a. Persamaan atur momentum :

$$S = \frac{(1-\gamma)^2}{(\gamma^3 + \varepsilon)} A_{mush} (\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (2.4)$$

Nilai ε dimasukan dengan nilai 0,001 agar fungsi *porosity-source* tidak menjadi tak hingga ketika PCM masih berfase padat.

b. Persamaan atur energi :

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (2.5.a)$$

$$H = h + \Delta H \quad (2.5.b)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (2.5.c)$$

$$\Delta H = \gamma L \quad (2.5.d)$$

Nilai γ merupakan fraksi pelelehan pada persamaan 2.5.d dengan definisi sebagai berikut:

$$\gamma = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ \frac{T-T_s}{T_l-T_s} & T_s \leq T \leq T_l \\ 1 & T > T_l \end{cases} \quad (2.5.e)$$

Sehingga persamaan energi dari persamaan 2.5.a dan 2.5.b ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial \rho(h + \gamma L)}{\partial t} + \nabla \rho(h + \gamma L) \vec{v} = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (2.5.f)$$

Dimana :

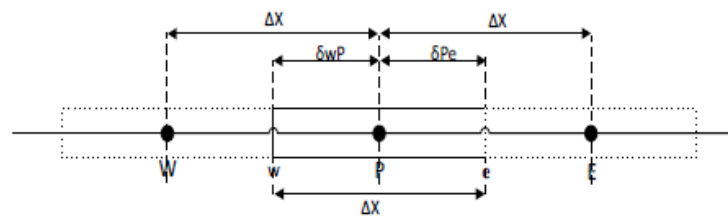
- ρ = Densitas
- H = Entalpi
- \vec{v} = Kecepatan aliran
- S = *Source term*
- ΔH = *Latent heat*

Metode numerik bertujuan untuk mendiskretisasi tiga persamaan atur menjadi bentuk yang dapat diselesaikan dalam perhitungan simulasi. Metode yang biasa digunakan adalah *Finite Different Method* (FDM), *Finite Volume Method* (FVM),

dan *Finite Element Method* (FEM). Untuk *software* ANSYS Fluent menggunakan metode diskretisasi FVM.

2.2.7. *Finite Volume Method*

Finite Volume Method (FVM) digunakan sebagai metode diskretisasi bagi persamaan atur. Gagasan dasar dari metode FVM dilakukan dengan sistem pembagian domain komputasi menjadi *volume-volume* kecil. *Volume* kecil seperti pada Gambar 2.5 digunakan sebagai metode menghitung, sehingga bentuk persamaan *differensial* atur tidak perlu diselesaikan secara eksak.



Gambar 2.5. Perbandingan *Volume* Kontrol Satu Dimensi (*ANSYS Tutorial guide*)

2.2.8. Konduksi

Konduksi yaitu perpindahan kalor suatu zat melalui media pengantar tanpa disertai perpindahan bagian-bagian zat tersebut. Umumnya, zat padat merupakan media perpindahan kalor secara konduksi. Media penghantar pada perpindahan kalor konduksi disebut dengan konduktor, yang merupakan suatu benda yang dapat menghantarkan kalor dari satu sisi ke sisi lain seperti diatur pada persamaan 2.6 berikut.

$$\dot{Q}_k = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.6)$$

Dengan : \dot{Q}_k = Laju perpindahan kalor konduksi (*Watt*)

k = Konduktivitas termal ($W/m.K$)

A = Luas perpindahan kalor (m^2)

ΔT = perubahan suhu (K)

Δx = Tebal (m)

2.2.9. Konveksi Alami

Tahap pertama proses pelelehan PCM perpindahan kalor pada tabung PCM berupa konduksi, setelah PCM mulai mencair konveksi alami lah yang menjadi faktor dominan terjadinya perpindahan kalor dalam tabung PCM (Regin dkk. 2006), (Rosler dkk. 2011), (Longeon dkk. 2013). Faktanya, konveksi alami terjadi selama distribusi temperatur tidak seragam dan adanya gaya gravitasi yang bekerja (Jiji, 2006). Dampak yang diakibatkan konveksi alami yaitu timbulnya *driving force* yang memaksa fluida untuk bersirkulasi akibat perbedaan massa jenis. Massa jenis yang paling ringan akan menempati ruangan pada lapisan teratas.

2.2.10. Aliran Fluida HTF

Aliran fluida memiliki perbedaan dengan zat padat dikarenakan aliran fluida memiliki kemampuan untuk mengalir. Ikatan molekul yang lebih kecil pada fluida menyebabkan fluida lebih mudah mengalir jika dibandingkan dengan ikatan molekul yang terdapat pada zat padat, sehingga fluida memiliki hambatan yang relatif kecil pada perubahan bentuk karena gesekan.

Bilangan *Reynolds* sangat memengaruhi beberapa jenis aliran. Bilangan *Reynolds* merupakan bilangan tidak berdimensi yang penting digunakan dalam penelitian aliran fluida pada pipa. Persamaan 2.7 merupakan persamaan bilangan *Reynolds* untuk aliran di dalam pipa (Cengel dan Cimbala, 2006).

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} \quad (2.7)$$

Keterangan: V = Kecepatan Fluida (m/s)

D = Diameter dalam Pipa (m)

ρ = Massa Jenis Fluida (kg/m^3)

μ = Viskositas Dinamik Fluida (kg/m.s)

Aliran fluida dapat dibedakan menjadi tiga menurut pola alirannya yaitu:

a. *Laminar Flow*

Aliran bergerak yang disertai fluida pada lapisan-lapisan dalam satu lapisan aliran yang mengalir dengan lancar. Besarnya nilai *Reynolds*-nya kurang dari 2300 ($Re < 2300$).

b. *Turbulent Flow*

Memiliki aliran yang tidak menentu dalam pergerakan partikel fluidanya yang disebabkan adanya pertukaran momentum skala besar. *Reynolds number*-nya lebih dari 4000 ($Re > 4000$).

c. *Transition Flow*

Aliran perpindahan antara *laminar flow* dan *turbulent flow*, dengan besar *reynolds number* antara 2300-4000 ($2300 < Re < 4000$).

2.2.11. 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. Persamaan 2.8 dan persamaan 2.9 menurut Hosseini dkk (2014) merupakan asumsi *boussinesq* yang digunakan untuk mendekati sifat termal PCM.

$$\mu = A \cdot e^{BT} \quad (2.8)$$

Dimana : $A = 5,8035$, $B = -1,55 \times 10^{-2}$, $325 \text{ K} \leq T \leq 353 \text{ K}$.

$$\rho = \rho_0 (\beta(T - T_{liquidus}) + 1)^{-1} \text{ untuk } 51^\circ\text{C} < T < 100^\circ\text{C} \quad (2.9)$$

Dimana : ρ adalah densitas, β yaitu termal *expansion*, dan T adalah temperatur.

Penelitian yang dilakukan Rosler dkk (2011) membuat permodelan *weigh function* untuk mengakomodasi asumsi *phase-dependent*. Permodelan densitas PCM dimodelkan ke dalam bentuk persamaan 2.10.

$$\rho = \gamma\rho_l + (1 - \gamma)\rho_s \quad (2.10)$$

Dimana: ρ adalah densitas PCM, γ adalah *liquid fraction* dan ρ_l dan ρ_s berturut-turut adalah densitas PCM fase cair dan fase padat.

2.2.12. Software CFD

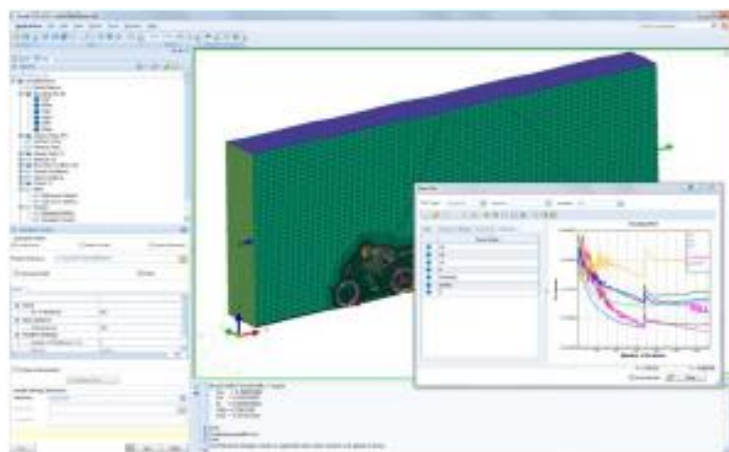
Software CFD sangat banyak digunakan dalam dunia teknik dan eksak, diantaranya seperti: ANSYS Fluent®, OpenFoam®, Autodesk CFD®, Comsol CFD®, serta Quickersim CFD®.

a. OpenFOAM®

Open Field Operation and Manipulation merupakan *free CFD Toolbox* yang bersifat nonkomersil, karena merupakan paket *software open source* yang diproduksi oleh OpenFOAM® Ltd. Pengguna OpenFOAM® cukup besar pada bidang *engineering* dan *exact*, baik dari organisasi komersial maupun akademik. OpenFOAM® juga memiliki berbagai fitur yang dapat digunakan sebagai pemecah masalah apapun pada aliran fluida yang kompleks serta melibatkan reaksi kimia, turbulensi, dan perpindahan panas serta dinamika struktur padat dan elektromagnetik. Gambar 2.6 dan 2.7 berturut-turut merupakan logo OpenFOAM® dan *preview* OpenFOAM®.



Gambar 2.6. Logo OpenFOAM"®"

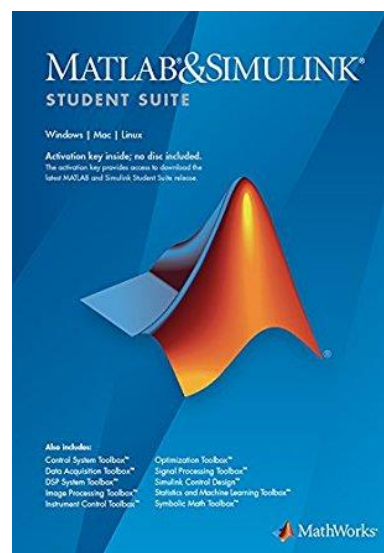


Gambar 2.7. *Preview* OpenFOAM"®"

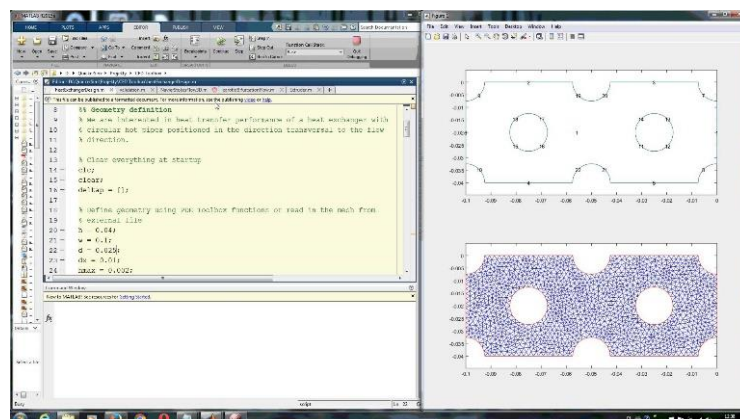
b. Quickersim CFD®

Quickersim CFD® adalah salah satu *toolbox* yang ada pada MATLAB yang digunakan untuk menyelesaikan aliran fluida dengan MATLAB. Hal ini juga memungkinkan untuk mensimulasikan perpindahan panas baik *liquid* maupun *solid* serta memecahkan persamaan *convection-diffusion*. Implementasinya didasarkan dengan metode elemen (FEM).

Quickersim CFD® menyediakan pengguna dengan pemecahan CFD yang efisien serta fungsi tambahan seperti memanipulasi *mesh*, *pre-processing*, dan *post-processing* di dalam MATLAB. Hal ini mendorong pengguna untuk menggunakan kombinasi kode yang mereka buat sendiri. Berikut logo beserta preview dari *Quickersim CFD*® dapat dilihat pada Gambar 2.8 dan Gambar 2.9.



Gambar 2.8. Logo *Quickersim CFD*®



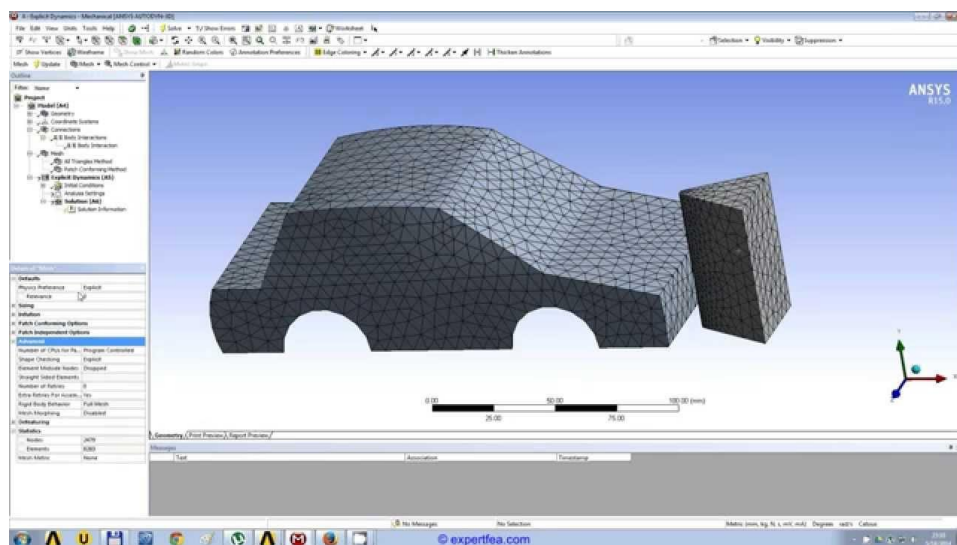
Gambar 2.9. Preview *Quickersim CFD*®

c. Fluent®

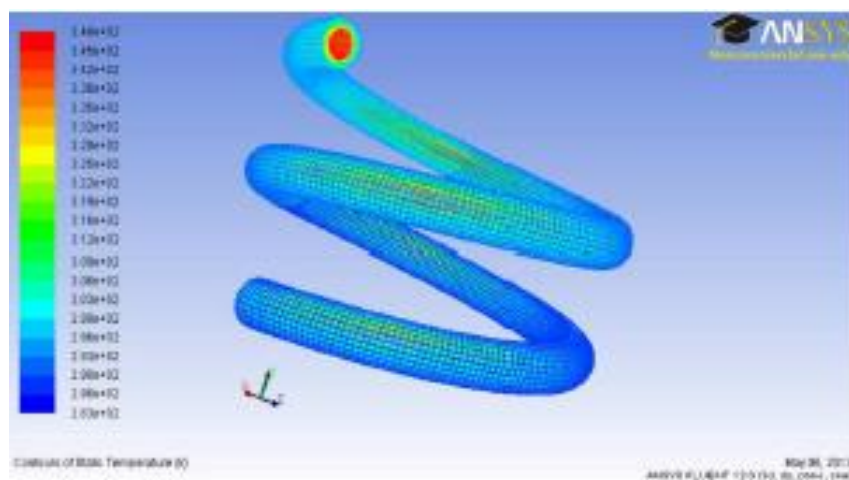
Fluent® merupakan suatu jenis program CFD dengan penggunaan metode *volume*. Fluent® menyediakan fleksibilitas *mesh* yang lengkap serta lebih praktis dibandingkan *software* CFD yang lainnya. Fluent® didukung oleh beberapa jenis *mesh* sehingga dalam pemilihan *mesh* dapat diatur sedemikian rupa seperti pada Gambar 2.10, Gambar 2.11 dan Gambar 2.12 merupakan logo ANSYS dan *Preview Post-processing* pada ANSYS Fluent.



Gambar 2.10. Logo ANSYS Fluent"®"



Gambar 2.11. *Preview* ANSYS Fluent"®"



Gambar 2.12. *Preview Post-processing ANSYS Fluent*"®"

Fluent® disertai struktur data yang efisien dan *flexible* karena Fluent® ditulis dalam bahasa C. Fluent® juga dapat digunakan secara simultan di *workstation dekstop* maupun *server* komputer sehingga Fluent® kerap dipilih untuk proses numerik. Dalam dunia industri, Fluent® kerap dipakai untuk *design* pada sistem *fluida* serta untuk mencari sumber analisis kegagalan suatu sistem fluida. Klarifikasi penggunaan Fluent® dalam dunia industri secara umum meliputi: *aerospace*, *otomotif*, *biomedical*, proses kimia, semikonduktor, petrokimia, *polimer*, pembangkit tenaga, dan *turbomachinery*.