

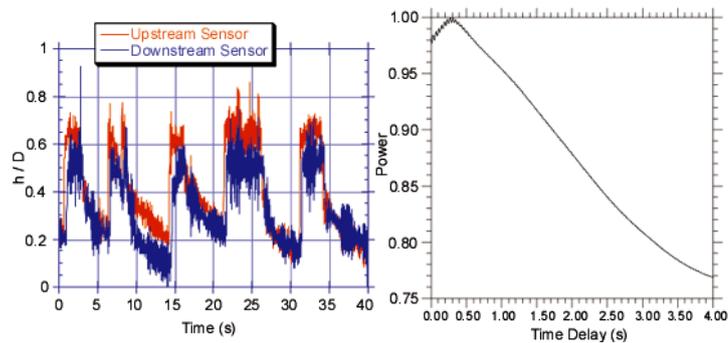
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

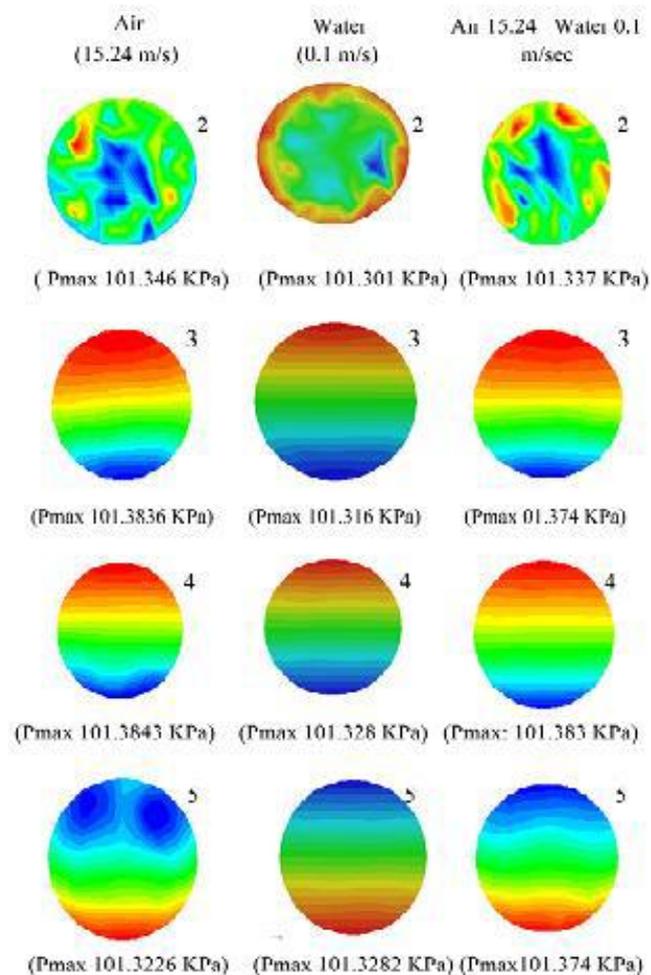
Aliran *slug* adalah aliran gelembung panjang dan *slug* cair bergantian dalam ruang dan waktu. Unit *slug* ini terdiri dari tubuh *slug* dan gelembung gas memanjang yang bergerak melalui pipa. Dalam analisa pola aliran *slug*, struktur aliran sering dinyatakan dalam "unitcell". Rosa (2004) menyatakan bahwa konsep ini pertama kali diusulkan oleh Dukler. Dalam konsep ini struktur aliran *slug* dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu *liquid slug* dan *elongated gas bubble*. *Liquid slug* merupakan bagian yang terdiri dari fase cair dengan kemungkinan adanya gelembung gas, sedangkan *elongated gas bubble* adalah gelembung panjang yang mengalir di atas lapisan *film* cairan.

Marruaz dkk (2001) menyatakan bahwa pengetahuan tentang karakteristik aliran *slug* seperti frekuensi, kecepatan *unit cell*, panjang gelembung, dan panjang *liquid slug* sangat penting dalam menentukan ukuran jaringan perpipaan dan desain *receiving vessel* serta peralatan *pre-processing*. Sebagai contoh, kecepatan *unit cell* menentukan laju aliran sesaat gas dan cairan yang masuk pada *receiving vessel*; panjang *liquid slug* mempunyai korelasi yang kuat dengan penurunan tekanan.



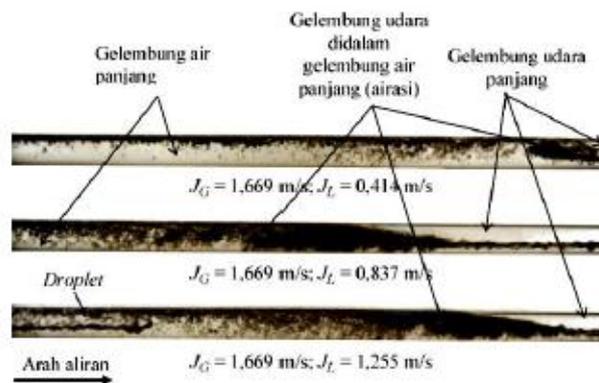
Gambar 2.1. Sinyal Pada *Hydrostatic Transducer* dan Tipe *Cross-Correlation Time Shift* Pada Sinyal ($J_G = 0,61$ m/s, $J_G = 0,89$ m/s) (Marruaz dkk, 2001)

Penelitian terkait pola aliran fluida tipe *single* dan *multiphase* terus berkembang. Mazumder (2012) melakukan analisa aliran *single* dan *multiphase* pada pipa tipe elbow. Pola karakteristik aliran yang diamati ada pada 6 titik berbeda dengan memberikan variasi 3 jenis kecepatan udara dan 3 jenis kecepatan air. Profil tekanan dan kecepatan pada 6 titik menunjukkan peningkatan pada tekanan di geometri elbow dengan penurunan tekanan pada sisi outlet karena fluida yang meninggalkan elbow. Pola penurunan tekanan yang diamati akan serupa untuk aliran *singlephase* dan *multiphase*.



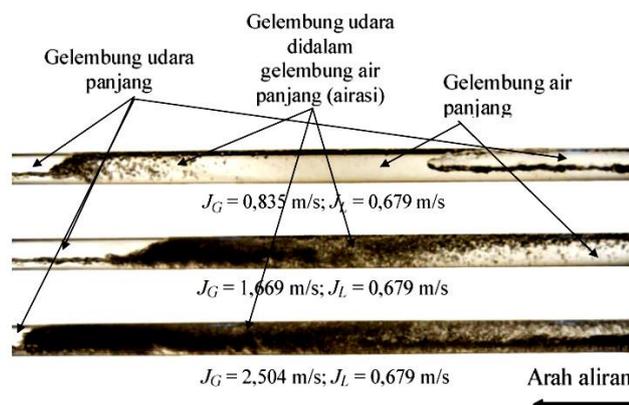
Gambar 2.2. Pola Penurunan Tekanan Aliran Singlephase Dan Multiphase (Mazumder, 2012)

Penelitian yang mempelajari tentang karakteristik aliran *slug* dilakukan oleh Santoso (2010). Karakteristik dari fluktuasi beda tekanan aliran *slug* sangat dipengaruhi oleh kecepatan superfisial fluida. Perubahan kecepatan superfisial udara dan kecepatan superfisial air dapat dibedakan dengan jelas menggunakan analisis statistik, PDF, autokorelasi dan PSD.



Gambar 2.3. Tipe Pola Aliran *Slug* Hasil Observasi Penelitian (Santoso, 2010)

Santoso (2011) melakukan penelitian tentang kecepatan pola aliran *slug*, di dalam penelitiannya tersebut menggunakan variasi kecepatan superfisial air 0,319 m/s - 1,952 m/s, dan kecepatan superfisial udara 1,043 m/s - 3,652 m/s. Pola aliran *slug* dapat teramati dengan jelas, kecepatan gelembung dapat diamati dengan cara visualisasi menggunakan *high speed video camera*.

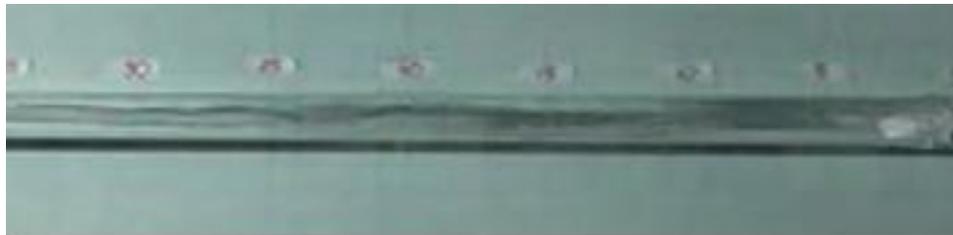


Gambar 2.4. Tipe Pola Aliran *Slug* Hasil Observasi Penelitian Pada Kecepatan Superfisial Air Tetap (Santoso, 2011)

Pola aliran dua fasa uap-kondensat berdasarkan pengukuran beda tekanan pada pipa horisontal pernah diteliti oleh Sukamta, dkk (2010). Tujuan penelitian untuk mengetahui pola aliran berdasarkan pengukuran beda tekanan. Bahan yang digunakan pipa anulus bagian dalam dari bahan tembaga berdiameter 17 mm dengan panjang 1,6 m, sedangkan pipa anulus bagian luar adalah pipa besi berdiameter 4 inchi. Hasilnya Pola aliran yang teridentifikasi pada aliran dua fasa air-uap air (kondensat) dari hasil kondensasi uap pada pipa horisontal ini meliputi pola aliran *stratified*, *wavy*, *plug*, *pre-slug*, dan *slug*.



Gambar 2.5. Fenomena Gradien Tekanan Untuk $Q_{\text{uap}} = 0,007078511 \text{ M}^3/\text{S}$ Pada Detik Ke-4 (*Stratified*) (Sukamta dkk, 2010)

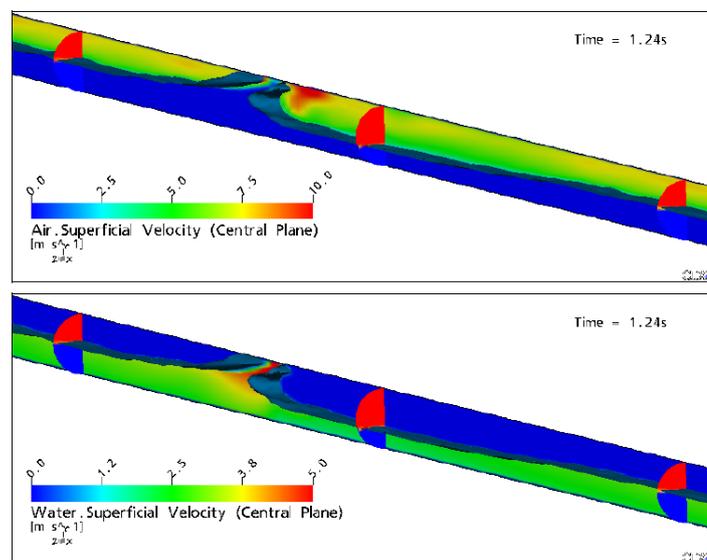


Gambar 2.6. Fenomena Gradien Tekanan Untuk $Q_{\text{uap}} = 0,007078511 \text{ m}^3/\text{s}$ Pada Detik Ke-9 Hingga 10 (*Wavy-Pre-Slug*) (Sukamta dkk, 2010)



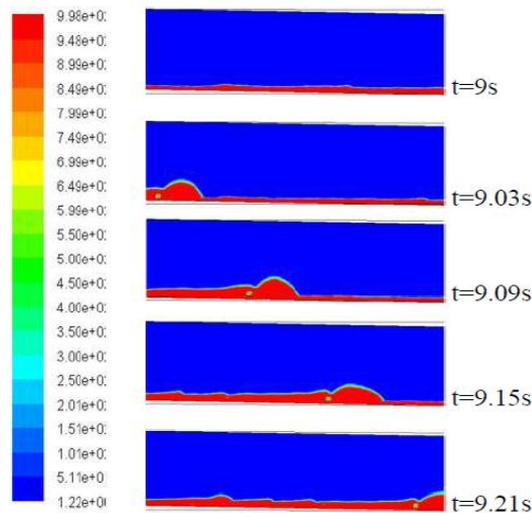
Gambar 2.7. Fenomena Gradien Tekanan Untuk $Q_{\text{uap}} = 0,007078511 \text{ m}^3/\text{s}$ Pada Detik Ke-52-54 (*Long Slug*) (Sukamta dkk, 2010)

Penelitian tentang investigasi numerik pada pembentukan dan propagasi aliran *slug* pada pipa melingkar *horizontal* pernah disimulasikan oleh Frank (2005). Setelah rezim aliran *slug* telah mengembang aliran *slug* diamati stabil dalam waktu dan menunjukkan aliran kualitatif perilaku dan karakteristik (frekuensi *slug*, panjang *slug*, dan kecepatan *slug*) sama seperti eksperimen meskipun perbandingan kuantitatif belum bisa dilakukan karena ketidakpastian kondisi antara eksperimen dan simulasi.



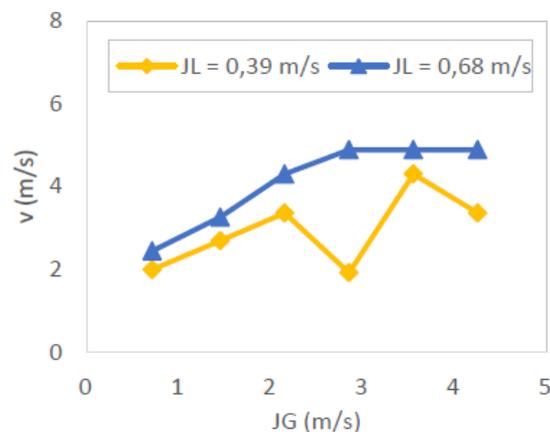
Gambar 2.8. Distribusi Kecepatan Superficial Untuk Fasa Cair dan Gas Pada *Liquid Slug* (Frank, 2005)

Penelitian tentang pola aliran dan karakteristik aliran *slug* menggunakan metode CFD juga pernah dilakukan oleh Rahimi (2013). Pada penelitian tersebut disimpulkan bahwa rezim aliran dalam pipa horizontal cenderung sangat tergantung pada tingkat cairan inlet mengalir. Hasil analisis penelitian menunjukkan bahwa perubahan signifikan struktur aliran sepanjang pipa untuk semua rezim aliran. Karakteristik aliran *slug* dapat dihitung menggunakan metode CFD. Hasilnya menunjukkan bahwa *slug* cair tidak mempertahankan panjang yang konstan pada tiap bagian. Dalam pipa tersebut dominan *stratified flow*, simulasi *presseur drop* dan cairan terus naik sebanding dengan data eksperimen.



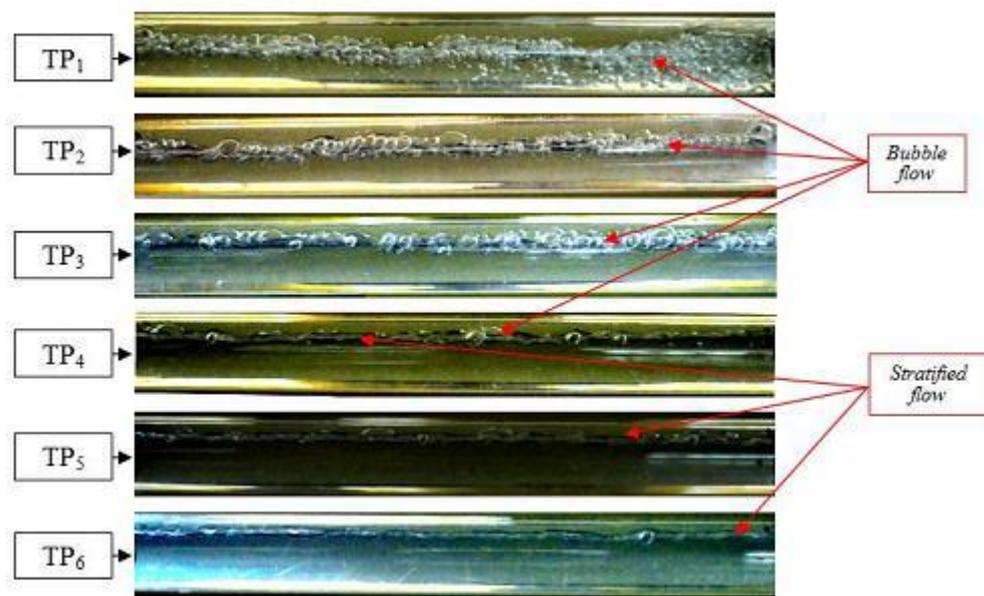
Gambar 2.9. Formasi *Slug* Dengan $U_{SG} = 2/4$ (m/s) and $U_{SL} = 0,59$ (Rahimi dkk, 2013)

Penelitian tentang superfisial gas dan superfisial cairan dilakukan oleh Purwanto (2013). Dalam penelitiannya disimpulkan bahwa kenaikan kecepatan superfisial gas akan membuat udara terdispersi ke dalam cairan sehingga kantong udara akan semakin panjang, sedangkan pengaruh kecepatan superfisial cairan akan membuat kantong semakin memendek dan jumlahnya akan semakin bertambah, dan semakin besar kecepatan superfisial gas, maka nilai *liquid hold-up* akan semakin rendah pula, sedangkan untuk kecepatan gelombangnya akan semakin besar.



Gambar 2.10. Kecepatan Gelombang Dengan Variasi J_G (Purwanto, 2013)

Penelitian tentang kecepatan superficial juga pernah dilakukan Korawan (2015). Dalam penelitiannya pola aliran yang dapat diamati yaitu pola aliran *bubble*, *slug*, dan *stratified*. Semakin besar nilai U_{sl} mengakibatkan semakin panjang *bubble region* yang terjadi sedangkan semakin rendah nilai U_{sl} mengakibatkan terjadinya pergeseran perubahan pola aliran, dimana pada nilai U_{sl} rendah terjadi perubahan dari *bubble flow* menjadi *stratified flow* dan pada nilai U_{sl} tinggi terjadi perubahan dari *bubble flow* menjadi *slug flow*.



Gambar 2.11. Visualisasi Pola Aliran Pada Kecepatan $U_{SL} = 0,55$ m/s (Korawan, 2015)

Dari uraian tinjauan pustaka diatas, penelitian mengenai analisa terjadinya pola aliran *slug* dengan menggunakan *software* CFD belum banyak dilakukan. Maka dari itu penelitian ini mengambil topik simulasi CFD aliran *slug* air-udara searah pipa horizontal, yang bertujuan untuk mengetahui proses terbentuknya aliran *slug* pada kecepatan superficial air dan udara yang berbeda menggunakan CFD dan mengetahui bentuk simulasi CFD aliran *slug* air-udara searah pada pipa horisontal.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Aliran Fluida

Pada dasarnya aliran fluida di dalam pipa dapat dikategorikan sebagai berikut :

a. Aliran Laminar

Aliran partikel-partikel fluida yang bergerak secara paralel (tidak saling memotong), atau aliran berlapis. Dalam aliran laminar ini viskositas berfungsi untuk meredam kecenderungan terjadinya gerakan relatif antar lapisan. Sehingga aliran laminar memenuhi hukum viskositas newton. Aliran laminar memiliki nilai bilangan Reynold kurang dari 2100 ($Re < 2100$).

b. Aliran Turbulen

Aliran dimana pergerakan dari partikel-partikel fluida sangat tidak menentu karena mengalami percampuran serta putaran partikel antar lapisan, yang mengakibatkan saling tukar momentum dari satu bagian fluida ke bagian fluida yang lain dalam skala yang besar. dalam keadaan aliran turbulen maka turbulensi yang terjadi membangkitkan tegangan geser yang merata diseluruh fluida sehingga menghasilkan kerugian-kerugian aliran. Aliran laminar memiliki nilai bilangan Reynold lebih dari 4000 ($Re > 4000$).

c. Aliran Transisi

Aliran transisi merupakan aliran peralihan dari aliran laminar ke aliran turbulen. Aliran laminar memiliki nilai bilangan Reynold antara 2100 sampai 4000 ($2100 < Re < 4000$).

Aliran fluida dapat dibedakan menjadi 2 jenis waktu. Aliran fluida berdasarkan waktu yaitu:

a. Aliran *Steady*

Suatu aliran dimana kecepatannya tidak terpengaruh oleh perubahan waktu sehingga kecepatan konstan pada setiap titik (tidak mempunyai percepatan).

b. Aliran *Transient*

Suatu aliran dimana terjadi perubahan kecepatan terhadap waktu.

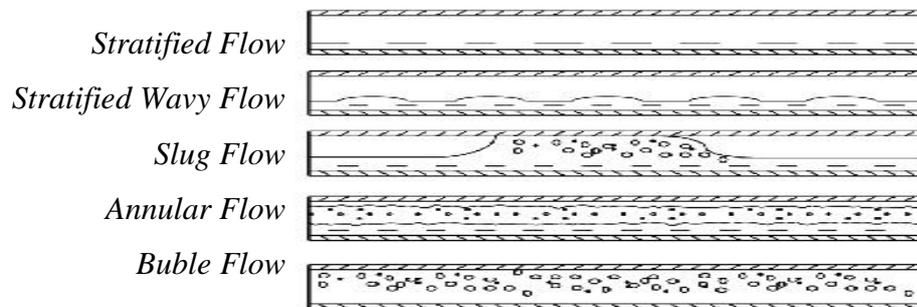
2.2.2 Pola Aliran Fluida Pada Pipa Horisontal

Pola aliran fluida multifasa pada pipa horisontal memiliki karakteristik yang lebih rumit dibanding dengan pola aliran pada pipa vertikal. Hal ini disebabkan karena adanya pengaruh gaya gravitasi yang menyebabkan fluida yang memiliki massa jenis lebih ringan cenderung berada diatas pipa dan fluida yang memiliki massa jenis lebih berat akan cenderung berada di posisi bagian bawah pipa.

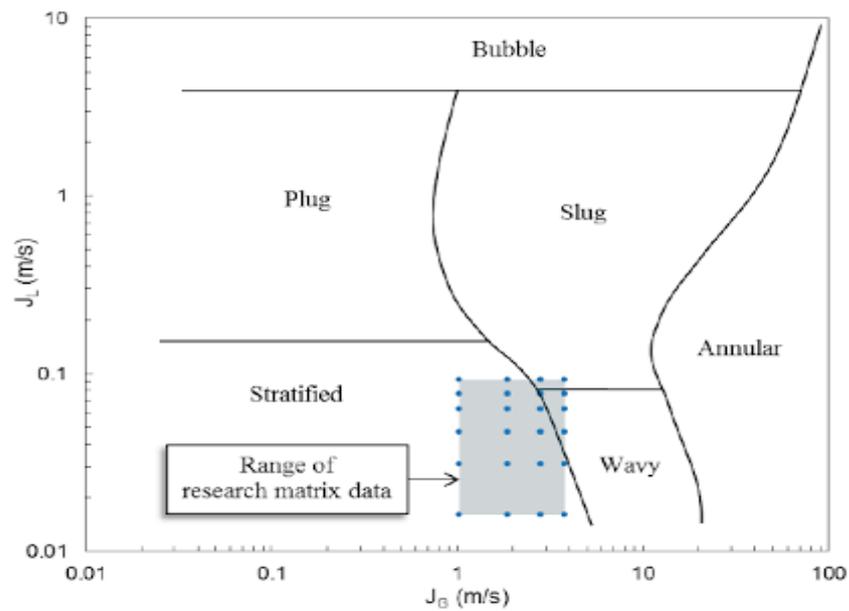
Ada beberapa pola aliran dalam pipa horisontal seperti yang terlihat pada gambar 2.1, yaitu :

- a. *Bubbly flow*, pola aliran ini sama dengan yang terjadi pada pipa aliran vertikal, perbedaannya yaitu gelembung udara akan mengalir di setengah bagian atas pipa.
- b. *Plug flow*, sama dengan *slug flow* pada pipa vertikal, hanya saja gelembung udara mengalir di bagian atas.
- c. *Stratified flow*, pola ini terjadi pada kecepatan liquid dan udara yang rendah dan terlihat *liquid* dan udara mengalir terpisah dengan garis batas yang halus.
- d. *Wavy flow*, pola aliran ini terjadi akibat naiknya kecepatan aliran udara yang berada di bagian atas pipa yang mengakibatkan garis batas udara dan *liquid* terganggu dan terbentuk gelombang.
- e. *Slug flow*, pola aliran ini terjadi ketika kecepatan udara terus meningkat dan mengakibatkan gelombang yang signifikan pada garis batas udara dan *liquid* sehingga meruncing dan memunculkan busa (*foamy slug*).

- f. *Annular flow*, pola aliran ini terjadi ketika masih pada kecepatan udara yang tinggi dan polanya sama dengan *annularflow* terjadi pada pipa vertikal dimana udara berada di tengah-tengah pipa dan *liquid* berada pada permukaan pipa.



Gambar 2.12. Pola Aliran Gas-Cair Pada Pipa Horisontal (Guo, 2015)



Gambar 2.13. Peta Pola Aliran (Mandhane dkk, 1974)

2.3 Pengaruh Aliran *Slug*

Pola aliran *slug* terjadi ketika kecepatan uap terus meningkat dan mengakibatkan gelombang yang signifikan pada garis batas uap-liquid sehingga meruncing dan memunculkan busa (*foamy slug*).

Pola aliran *slug* termasuk salah satu jenis aliran dua fasa yang ditandai dengan adanya gelembung uap berukuran cukup besar yang terjebak diantara cairan kondensat, sehingga jika gelembung uap ini terkondensasi secara cepat maka akan menghasilkan kenaikan tekanan yang tinggi secara tiba-tiba. Oleh karena itu pola aliran *slug* sangat berbahaya, karena dapat merusak sistem perpipaan dan peralatan lain di dalam industri.

2.4 Kecepatan Superfisial

Pada aliran dua fase banyak korelasi menyebut kecepatan sebagai kecepatan *superficial* (*superficial velocity*). Kecepatan superficial diidentifikasi sebagai kecepatan fase gas/likuid yang menunjukkan bahwa fase tersebut dialirkan melalui atau menempati seluruh luas penampang pipa.

Kata *superficial velocity* dari tiap fase bisa di gambarkan sebagai *volumetric flux*, yaitu *flow rate* dari tiap fase dibagi dengan area *pipe cross sectional* dengan asumsi bahwa fase mengalir sendiri di dalam pipa. Sehingga untuk kecepatan superficial gas dan kecepatan superficial air bisa diperoleh sebagai berikut:

$$J_G = \frac{Q_G}{A} \quad (2.1)$$

$$J_L = \frac{Q_L}{A} \quad (2.2)$$

Dimana :

J_G = kecepatan *superficial* gas (m/s)

J_L = kecepatan *superficial* cairan (m/s)

- Q_G = laju aliran gas dalam pipa (m^3/s)
- Q_L = laju aliran likuid dalam pipa (m^3/s)
- A = luas penampang pipa diameter dalam (m^2)

2.5 Komputasi Dinamika Fluida

Computational Fluid Dynamics (CFD), yang biasa disebut Komputasi Dinamika Fluida adalah ilmu yang mempelajari cara memprediksi aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia, dan fenomena lainnya dengan menyelesaikan persamaan-persamaan matematika (model matematika).

Computational fluid Dynamics (CFD) sering digunakan untuk desain suatu sistem fluida dapat juga digunakan untuk mencari sumber atau analisis kegagalan suatu sistem fluida. Penggunaan CFD di dunia industri banyak terdapat dalam bidang : Otomotif, *Biomedical*, *Equipment Manufacturing*, *Chemical Processing*, Semikonduktor, *Aerospace*.

Pada dasarnya CFD mengganti persamaan-persamaan diferensial parsial dari kontinuitas, momentum, dan energi dengan persamaan-persamaan aljabar. Persamaan yang asalnya kontinum (memiliki jumlah sel tak terhingga) dirubah menjadi model diskrit (jumlah sel terhingga).

Ada beberapa metode diskritisasi yang digunakan untuk memecahkan persamaan-persamaan diferensial parsial, diantaranya adalah :

- a. Metode beda hingga (*finite difference method*)
- b. Metode elemen hingga (*finite element method*)
- c. Metode volume hingga (*finite volume method*)
- d. Metode elemen batas (*boundary element method*)
- e. Metode skema resolusi tinggi (*high resolution scheme method*)

Metode diskritisasi yang dipilih pada umumnya menentukan kestabilan dari program numerik/CFD yang dibuat atau program *software* yang ada.

2.6 FLUENT

Fluent adalah suatu jenis program CFD yang menggunakan metode volume hingga. Fluent menyediakan fleksibilitas *mesh* yang lengkap. Oleh karena itu Fluent dapat menyelesaikan kasus aliran fluida dengan *mesh (grid)* yang tidak terstruktur sekalipun dengan cara yang relatif mudah.

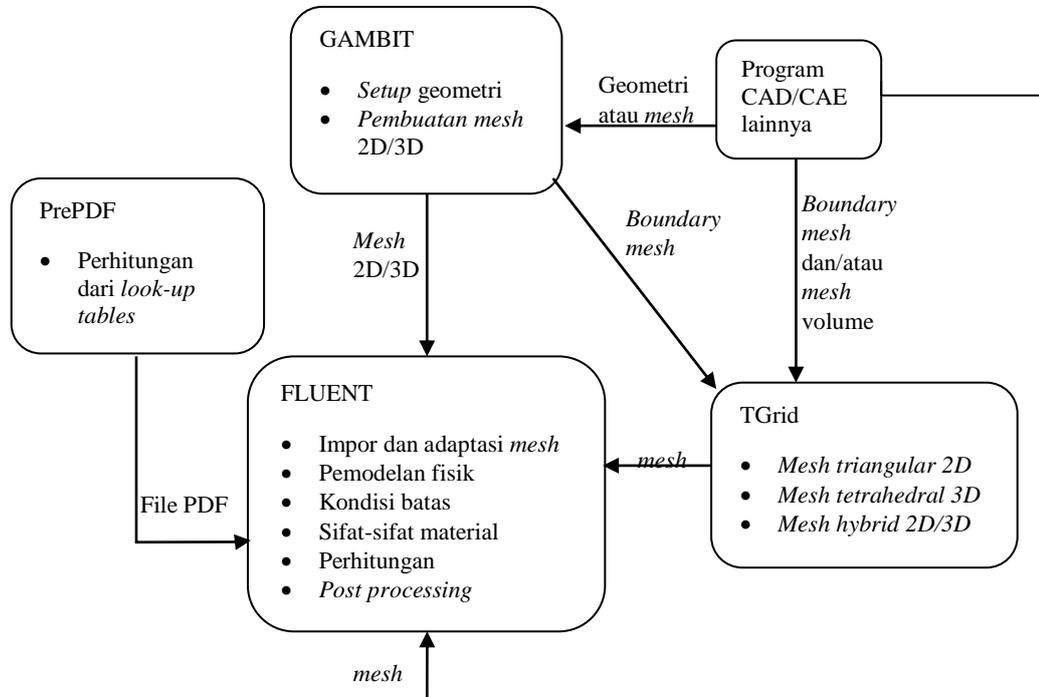
Fluent dapat memperhalus atau memperbesar *mesh* yang sudah ada. Fluent juga didukung oleh jenis *mesh* tipe *2D triangular-quadrilateral*, *3D tetrahedral-hexahedral-pyramid-wedge*, dan *mesh* campuran (*hybrid*).

Fluent dapat dijalankan sebagai proses terpisah secara simultan ada klien *desktop workstation* dan *computer server*. Fluent ditulis dalam *bahasa C*, sehingga Fluent memiliki struktur data yang efisien dan lebih fleksibel. Fluent sering digunakan karena memiliki kelebihan :

- a. Fluent mudah untuk digunakan
- b. Model yang realistic (tersedia berbagai pilihan solver)
- c. Diskritisasi atau *meshing* model yang efisien (dalam Gambit)
- d. Cepat dalam penyajian hasil (bisa dengan paralel komputer)
- e. Visualisasi yang mudah untuk dimengerti

Dalam dunia industri, Fluent sering digunakan untuk mencari sumber atau analisa kegagalan suatu sistem fluida juga untuk desain suatu sistem fluida. Klasifikasi penggunaan Fluent dalam dunia industri (secara umum) : Pembangkit tenaga, Semikonduktor, Pertambangan, Petrokimia, Polimer, Turbomachinery, Aerospace, Otomotif, Biomedical, Proses kimia.

2.6.1 Struktur Program



Gambar 2.14. Struktur Komponen Program Fluent

2.6.2 Gambaran Penggunaan Fluent

2.6.2.1 Merencanakan Analisis CFD

Ada beberapa hal yang harus diperhatikan ketika akan menyelesaikan suatu kasus dengan menggunakan Fluent, yaitu :

- a. Menentukan tujuan pemodelan
- b. Pemilihan model komputasional
- c. Pemilihan model fisik
- d. Penentuan prosedur

2.6.2.2 Langkah Penyelesaian Masalah

Setelah merencanakan analisis CFD pada model, langkah-langkah umum penyelesaian analisis CFD pada Fluent sebagai berikut :

- a. Membuat geometri dan *mesh* pada model
- b. Memilih *solver* yang tepat untuk model tersebut (2D atau 3D)
- c. Mengimpor *mesh* model
- d. Melakukan pemeriksaan pada *mesh* model
- e. Memilih formulasi *solver*
- f. Memilih persamaan dasar yang akan dipakai dalam analisis
- g. Menentukan sifat material yang akan dipakai
- h. Menentukan kondisi batas
- i. Mengatur parameter control solusi
- j. *Initialize the flow field*
- k. Melakukan perhitungan/iterasi
- l. Memeriksa hasil iterasi
- m. Menyimpan hasil iterasi
- n. Jika perlu, memperhalus *grid* kemudian dilakukan iterasi ulang untuk mendapatkan hasil yang lebih baik.

2.6.3 Kondisi Batas dan Parameter Pada Kondisi Batas

Untuk mendefinisikan suatu kasus, harus memasukkan informasi pada variabel aliran pada domain kasus tersebut, antara lain fluks massa, momentum, energi, dll.

Data yang diperlukan pada batas tergantung dari tipe kondisi batas dan model fisik yang dipakai (turbulensi, persamaan energi, multifasa, dll). Data yang diperlukan pada kondisi batas merupakan data yang sudah diketahui atau bisa juga data yang dapat diasumsikan. Tetapi asumsi data yang dipakai harus diperkirakan mendekati yang sebenarnya. *Input* data yang salah pada kondisi batas akan sangat berpengaruh terhadap hasil simulasi.

2.6.3.1 Velocity Inlet

Kondisi batas *velocity inlet* digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran dan besaran skalar lainnya pada sisi masuk aliran. Kondisi batas ini hanya digunakan untuk aliran inkompresibel.

2.6.3.2 Mass Flow Inlet

Pada kondisi batas ini harus memasukkan data laju aliran massa atau fluks massa, temperature fluida (apabila mengaktifkan persamaan energi), tekanan *gauge* pada sisi masuk, arah aliran, dan besaran turbulensi. Nilai tekanan *gauge* tersebut hanya akan digunakan sebagai tebakan awal oleh Fluent dan akan dikoreksi sendiri sejalan dengan proses iterasi. Tetapi apabila nilai tekanan tersebut berbeda jauh dari keadaan sebenarnya maka akan memperlambat proses iterasi. Metode spesifikasi arah aliran dan turbulensi sama dengan kondisi batas *velocity inlet*.

2.6.3.3 Pressure Inlet

Pada kondisi batas ini harus memasukkan data tekanan total (*absolute*), tekanan *gauge*, temperatur, arah aliran, dan besaran turbulen. Tekanan total yang dimaksud di sini adalah penjumlahan dari nilai tekanan operasi dan tekanan *gauge*. Sedangkan nilai temperatur masukan tersebut akan digunakan sebagai temperatur static pada aliran inkompresibel. Metode spesifikasi arah aliran dan turbulensi sama dengan kondisi batas *velocity inlet*.

2.6.3.4 Pressure Outlet

Kondisi batas ini dipakai pada sisi keluar fluida dan data tekanan pada sisi keluar harus diketahui atau dapat diperkirakan mendekati data yang sebenarnya. Pada kondisi batas ini harus memasukkan nilai tekanan statik, temperatur aliran balik (*backflow*), dan besaran turbulen aliran balik.

2.6.3.5 Outflow

Kondisi batas ini digunakan apabila data aliran pada sisi keluar tidak diketahui sama sekali. Data pada sisi keluar diekstrapolasi dari data yang ada pada aliran sebelum mencapai sisi keluar.

2.6.3.6 Pressure Far-Field

Kondisi batas ini digunakan untuk memodelkan aliran kompresibel *free-stream* yang mempunyai dimensi yang sangat panjang (jarak antara *inlet* dan *outlet* jauh sekali). Kondisi batas ini ada pada sisi keluar aliran. Besaran yang harus dimasukkan adalah tekanan *gauge*, bilangan *Mach*, temperatur aliran, arah aliran dan besaran turbulensi pada sisi keluar.

2.6.3.7 Inlet Vent dan Outlet Vent

Kondisi batas ini digunakan untuk model saluran masuk/keluar aliran dimana terdapat peralatan ventilasi di sisi luar saluran masuk/keluar yang dapat menimbulkan kerugian tekanan pada aliran. Data yang dimasukkan pada kondisi batas ini sama dengan data pada kondisi batas *pressure inlet/pressure outlet*, hanya terdapat tambahan data untuk kerugian tekanan.

2.6.3.8 Intake Fan dan Exhaust Fan

Kondisi batas ini digunakan untuk model saluran masuk/keluar aliran dimana terdapat *fan/blower* di sisi luar saluran masuk/keluar untuk menghembus/menghisap fluida di dalam saluran. Data yang harus dimasukkan pada kondisi batas ini sama dengan data pada kondisi batas *pressure inlet/pressure outlet*, hanya terdapat tambahan data untuk kenaikan tekanan setelah melewati *fan/blower* (*pressure-jump*).

2.6.3.9 Dinding (wall)

Kondisi batas ini digunakan sebagai pembatas antara daerah fluida (cair dan gas) dan padatan. Kondisi batas ini digunakan juga sebagai dinding untuk aliran fluida dalam saluran atau dapat disebut juga sebagai dinding saluran.

2.6.3.10 Symmetry dan Axis

Kedua kondisi batas ini digunakan untuk mengurangi daya komputasi yang dibutuhkan pada suatu kasus. Pada panel kondisi batas untuk kedua kondisi batas ini tidak ada *input* data yang diperlukan. Kondisi batas simetri digunakan untuk memodelkan dinding tanpa gesekan pada aliran viskos. Kondisi batas ini juga digunakan apabila model geometri kasus yang bersangkutan dan pola aliran pada model tersebut simetri. Sedangkan kondisi batas *axis* digunakan sebagai garis tengah (*centerline*) untuk kasus 2D *axisymmetry*.

2.6.3.11 Periodic

Kondisi batas periodik digunakan untuk mengurangi daya komputasi pada kasus tertentu. Karena kondisi batas ini hanya dapat digunakan pada kasus yang mempunyai medan aliran dan geometri yang *periodic*, baik secara translasi atau rotasi.

2.6.3.12 Cell Zone : Fluid

Kondisi batas ini digunakan pada kontinum model yang didefinisikan sebagai fluida. Data yang dimasukkan hanya material fluida. Dapat didefinisikan sebagai media berpori

2.6.3.13 Cell Zone : Solid

Kondisi batas ini digunakan pada kontinum model yang didefinisikan sebagai padatan. Data yang harus dimasukkan hanya material padatan. Dapat didefinisikan *heat generation rate* pada kontinum *solid* (opsional).

2.6.3.14 Porous Media

Porous zone merupakan pemodelan khusus dari zona fluida selain padatan dan fluida. Kondisi batas ini digunakan dengan cara mengaktifkan pilihan *porous zone* pada panel fluida. Digunakan untuk memodelkan aliran yang

melewati media berpori dan tahanan yang terdistribusi, misalnya : *packed beds, filter papers, perforated plates, flow distributors, tube banks.*

2.6.3.15 Kondisi Batas Internal

Kondisi batas interior digunakan untuk bidang yang kedua sisinya dilewati oleh fluida. Sedangkan kondisi batas *fan, radiator, dan porous jump* digunakan untuk memodelkan adanya *fan, radiator, atau media berpori* di tengah-tengah aliran, sehingga tidak perlu dibuat model *fan* atau *radiator*, cukup dengan menentukan kenaikan tekanan yang terjadi setelah melewati alat tersebut.

Kondisi batas ini termasuk dalam kelompok kondisi batas internal yang digunakan untuk bidang yang berada di tengah medan aliran dan tidak mempunyai ketebalan. Yang termasuk dalam kondisi batas internal adalah : *interior, fan, radiator, porous jump.*

2.7 Persamaan Umum Fluent

2.7.1 Persamaan Kekekalan Massa

Dalam penurunan persamaan kekekalan massa, langkah pertama adalah menuliskan kesetimbangan massa untuk elemen fluida.

Kelajuan peningkatan massa = Neto kelajuan aliran massa

Kelajuan peningkatan massa dalam elemen fluida adalah :

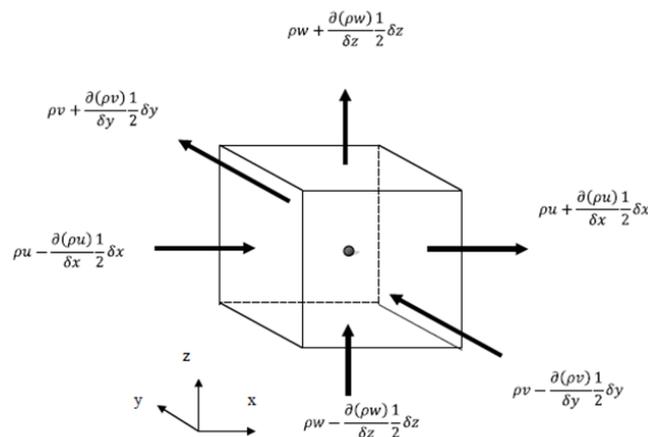
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \delta \times \delta y \delta z) = \frac{\delta \rho}{\delta t} \delta x \delta y \delta z \quad (2.3)$$

Langkah selanjutnya yaitu menerangkan kelajuan massa aliran melintasi sebuah bidang elemen yang diberikan oleh hasil dari densitas, luas dan komponen kecepatan normal terhadap bidang dari gambar 2.4 dapat

dilihat bahwa neto kelajuan aliran massa kedalam elemen melewati *boundary*-nya diberikan oleh:

$$\begin{aligned}
 & \left(\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z - \left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z \\
 & + \left(\rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z - \left(\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z \\
 & + \left(\rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y - \left(\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y \quad (2.4)
 \end{aligned}$$

Aliran-aliran yang sejajar kedalam elemen menghasilkan sebuah peningkatan massa dalam elemen dan mempunyai sebuah tanda positif dan aliran-aliran yang meninggalkan elemen diberikan sebuah tanda negatif.



Gambar 2.15. Massa Mengalir Kedalam dan Keluar Elemen Fluida
(Versteeg dkk, 1995)

Kelajuan peningkatan massa kedalam elemen sama dengan neto kelajuan aliran massa kedalam elemen fluida melintasi bidangnya. Semua suku-suku hasil akhir kesetimbangan massa disusun pada sisi sebelah kiri dengan tanda yang sama dan pernyataan dibagi dengan $\delta x \delta y \delta z$.

Menghasilkan:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.5)$$

Kekekalan massa dapat ditulis sebagai berikut :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2.6)$$

Persamaan (2.6) adalah *unsteady*, kekekalan massa atau persamaan kontinuitas tiga dimensi pada sebuah titik dalam sebuah fluida kompresibel. Suku pertama pada sisi sebelah kiri kelajuan perubahan dalam waktu dari densitas (massa per satuan volume). Suku kedua menjelaskan neto aliran massa keluar dari elemen melintasi *boundary*-nya dan disebut suku konvektif. Untuk fluida yang tak mampu mampat (inkompresibel) misalnya liquid densitas adalah konstan dan persamaan pada (2.8) menjadi :

$$\text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2.7)$$

Atau dalam penjabarannya:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.8)$$

2.7.2 Persamaan Kekekalan Momentum

Hukum newton kedua menyatakan bahwa laju perubahan momentum partikel fluida sama dengan gaya pada partikel.

$$\text{Tingkat kenaikan momentum partikel fluida} = \text{Jumlah gaya pada partikel}$$

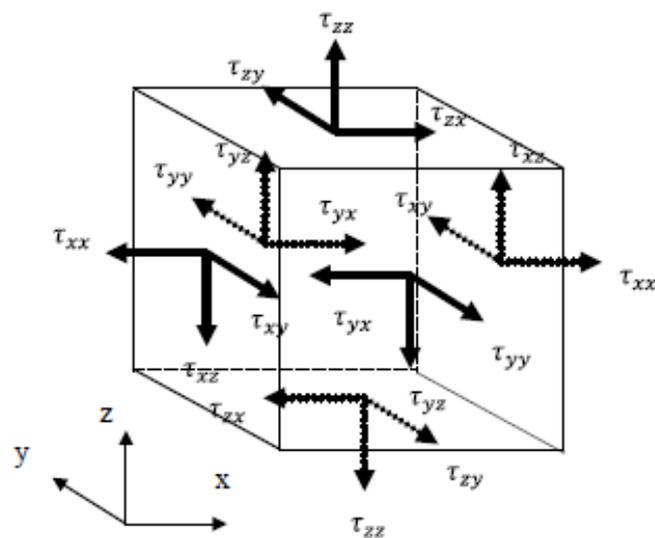
Kelajuan peningkatan momentum x, y, dan z per satuan volume partikel fluida diberikan oleh :

$$\begin{aligned} \rho \frac{Du}{Dt} &= \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) \\ \rho \frac{Dv}{Dt} &= \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} \mathbf{u}) \\ \rho \frac{Dw}{Dt} &= \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{w} \mathbf{u}) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Ada dua macam gaya pada partikel fluida :

- a) Gaya-gaya permukaan :
 - Gaya tekanan
 - Gaya viskos
- b) Gaya-gaya badan :
 - Gaya gravitasi
 - Gaya sentrifugal
 - Gaya coriolis

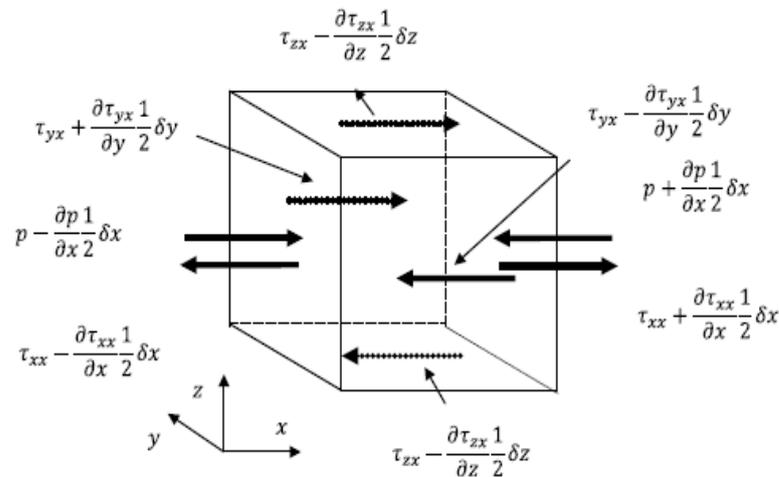
Keadaan tegangan sebuah elemen fluida didefinisikan dalam suku-suku tekanan dan sembilan komponen tegangan viskos ditunjukkan dalam Gambar 2.5. Tekanan normal ditandai oleh p , tegangan-tegangan viskos ditandai oleh τ . Notasi akhiran yang biasa τ_{ij} digunakan untuk menandakan arah tegangan viskos. Akhiran i dan j dalam τ_{ij} menandakan bahwa komponen tegangan bekerja dalam arah j pada sebuah permukaan normal kearah i .



Gambar 2.16. Komponen Tegangan Pada Tiga Bidang Elemen Fluida
(Versteeg dkk, 1995)

Langkah pertama yaitu mempertimbangkan komponen-komponen arah x dari gaya-gaya yang disebabkan komponen tegangan τ_{xx} , τ_{yx} , τ_{zx} dan

tekanan p . Besarnya gaya dari sebuah tegangan permukaan adalah hasil dari tegangan dan luas. Gaya yang sejajar dengan arah dari sebuah $axis$ koordinat menjadi sebuah tanda positif dan dalam arah yang berlawanan dengan sebuah tanda negatif. Neto gaya dalam arah x adalah jumlah komponen gaya yang bekerja pada elemen fluida tersebut.



Gambar 2.17. Komponen Tegangan Dalam Arah x (Versteeg dkk, 1995)

Pada pasangan sisi (timur, barat) :

$$\left[\left(p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left(\tau_{xx} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z + \left[- \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) + \left(\tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z = \left(-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \right) \delta x \delta y \delta z \quad (2.10)$$

Gaya total dalam arah x pada sisi (utara, selatan) :

$$\begin{aligned} & - \left(\tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z + \left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z \\ & = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \delta x \delta y \delta z \end{aligned} \quad (2.11)$$

Gaya total dalam arah x pada sisi bawah dan atas :

$$- \left(\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y + \left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \delta x \delta y \delta z \quad (2.12)$$

Gaya total per satuan volume pada fluida yang disebabkan tegangan-tegangan permukaan ini sama dengan jumlah dari persamaan (2.10), (2.11), (2.12) dibagi oleh volume $\delta x \delta y \delta z$:

$$\frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (2.13)$$

Tanpa mempertimbangkan gaya badan dalam lebih detail lagi pengaruhnya secara menyeluruh dapat dimasukkan dengan mendefinisikan sebuah *source* S_{MX} dari momentum x persatuan volume persatuan waktu.

Komponen x persamaan momentum ditemukan dengan menetapkan perubahan momentum x dari partikel fluida sama dengan total gaya dalam arah x pada elemen yang disebabkan tegangan permukaan ditambah kelajuan peningkatan momentum x disebabkan *source*:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{MX} \quad (2.14)$$

Untuk membuktikan bahwa komponen y persamaan momentum :

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{MY} \quad (2.15)$$

Dan juga komponen z persamaan momentum:

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{MZ} \quad (2.16)$$

2.8 General

2.8.1 Solver

a) *Presseure-based*

Medan kecepatan diperoleh dari persamaan momentum, konversi massa (kontinuitas), dicapai dengan memecahkan persamaan tekanan,

persamaan energi (jika perlu), diselesaikan secara berurutan dan persamaan skalar tambahan juga diselesaikan dalam mode terpisah.

b) *Density-based*

Persamaan yang mengatur kontinuitas, momentum, energi (jika perlu) dan jenis pengangkutan diselesaikan bersama. Persamaan skalar tambahan diselesaikan secara terpisah, berat jenis dijalankan berdasarkan implisit atau eksplisit.

2.9 Models

2.9.1 Multifasa

a) *Volume Of Fluid (VOF)*

Model ini digunakan untuk fluida dua fase atau lebih yang memiliki hubungan antar muka. Persamaan momentum digunakan untuk setiap fasa fluida dan fraksi volume digunakan pada setiap fluida pada perhitungan yang diamati melalui seluruh bidang asal.

b) *Mixture*

Digunakan untuk aliran berbentuk gelombang atau butiran, dimana kedua fasa tercampur sempurna atau fraksi volume fasa diskrit melebihi 10%, untuk aliran yang homogen.

c) *Eulerian*

Digunakan untuk aliran granular dan juga digunakan untuk aliran yang *hydrotransport*

2.9.2 Viskositas

a) *Inviscid*

Digunakan untuk aliran yang tidak mengalami perubahan viskositas. Nilai viskositasnya tetap dan gesekan antar partikelnya relatif kecil. Apabila fluida mengalir pada suatu pipa maka *tangensial stress*

fluida sama dengan nol, sehingga tidak ada energi dan fluida mengalir bebas tanpa adanya hambatan.

b) *Laminar*

Digunakan pada aliran yang fluidanya bergerak dalam lapisan-lapisan atau lamina-lamina dengan satu lapisan meluncur secara lancar.

c) *Spalart-Allmaras*

Model ini dapat digunakan untuk simulasi yang sedikit kasar dengan ukuran *mesh* yang besar sehingga perhitungan aliran turbulen yang akurat bukan hal yang bersifat kritis. Model ini juga dapat digunakan untuk memprediksi perubahan turbulensi isotropic yang homogen dan model ini tidak dapat digunakan pada perubahan *length scale* secara cepat.

d) *k-epsilon*

- *Standart*

Model ini merupakan model turbulensi semi empiris yang lengkap. Walaupun masih sederhana, memungkinkan untuk dua persamaan yaitu kecepatan turbulen (*turbulent velocity*) dan skala panjang (*length scale*) ditentukan secara bebas. Model ini dikembangkan oleh Jones dan Launder. Kestabilan, ekonomis (dari segi komputasi) dan akurasi yang cukup memadai membuat model ini sering digunakan dalam simulasi fluida dan perpindahan panas.

- *Renormalization-group (RNG)*

Model ini diturunkan dengan menggunakan metode statis yang diteliti (teori renormalisasi kelompok). Model ini merupakan perbaikan dari metode *K-ε standart*, jadi bentuk persamaan yang digunakan sama. Perbaikan yang dimaksud meliputi :

- Model *RNG* memiliki besaran tambahan pada persamaan laju disipasi (*epsilon*), sehingga mampu meningkatkan akurasi untuk aliran yang terhalang secara tiba-tiba.

- Efek putaran pada turbulensi juga telah disediakan, sehingga meningkatkan akurasi untuk jenis aliran yang berputar (*swirl flow*). Menyediakan formulasi analisis untuk bilangan prandtl turbulen, sedangkan model *K-ε standart* menggunakan nilai bilangan prandtl yang ditentukan pengguna (konstan). Model *RNG* menyediakan formulasi untuk bilangan Reynold rendah, sedangkan model *K-ε standart* untuk bilangan Reynold tinggi.

- *Relizable*

Realizable merupakan model pengembangan yang relatif baru dan berbeda dengan model *K-ε standart* dalam dua hal, yaitu:

- Terdapat formulasi baru untuk memodelkan viskositas turbulen. Sebuah persamaan untuk dissipasi, ε , telah diturunkan dari persamaan yang digunakan untuk menghitung fluktuasi vortisitas rata-rata.
- Istilah *Realizable* memiliki arti bahwa model tersebut memenuhi beberapa batasan matematis pada bilangan Reynold, konsisten dengan bentuk fisik aliran turbulen. Kelebihannya adalah lebih akurat untuk memprediksi laju penyebaran fluida dari pancaran jet/nosel. Model ini memberikan permorma yang bagus untuk aliran yang melibatkan putaran, lapisan batas yang memiliki gradien tekanan yang besar, separasi, dan sirkulasi.

e) Model *k-omega*

- *Standart*

Model *k-omega standart* ini dapat diaplikasikan pada aliran dalam saluran maupun aliran bebas gesekan (*free shear flow*). Model ini digunakan untuk menghitung efek aliran pada bilangan reynold rendah, kompresibilitas dan penyebaran aliran geser (*shear flow*).

- *Shear – Stress Transport (SST)*

Model SST digunakan untuk menghitung transport dari tegangan geser turbulen, melibatkan sebuah besaran dari penurunan *damped cross diffusion* pada persamaan omega.

f) *Reynold Stress*

Merupakan model turbulensi yang paling teliti pada FLUENT. Model ini mendekati persamaan Navier-Stokes (*Reynolds-averaged*) dengan menyelesaikan persamaan transport untuk tegangan reynold bersama-sama dengan persamaan laju disiasi. Model ini membutuhkan 4 persamaan transport tambahan pada aliran 2D dan 7 persamaan transport tambahan pada aliran 3D yang berarti proses komputasi yang terjadi lebih panjang dan berat.

Model ini harus digunakan ketika pada aliran terdapat anisotropi dari tegangan reynold, seperti aliran dalam siklon, aliran yang berpusar dalam *combustor*, aliran yang melewati lintasan yang berputar, tegangan paa aliran yang disebabkan aliran sekunder dalam saluran.

g) *Large Eddy Simulation (LES)*

Model ini membutuhkan resolusi *mesh* yang lebih besar, membutuhkan daya komputasi yang jauh lebih tinggi dan tidak praktis untuk aplikasi teknis secara umum.

h) *Detached Eddy Simulation (DES)*

Model ini otomatis muncul pada pilihan *viscous* khusus solver 3D. Model DES merupakan modifikasi dari model *Spalart-Allmaras*, dapat dipertimbangkan sebagai alternatif yang lebih praktis pengganti LES untuk memprediksi aliran dengan bilangan Reynold yang besar.

2.10 *Solution Method*

2.10.1 *Scheme*

a) *Semi Implicit Method For Pressure Linked Equation (SIMPLE)*

SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation)

Merupakan metode yang menggunakan hubungan antara kecepatan dan

tekanan untuk mendapatkan nilai konservasi massa dan nilai bidang tekan (Ansys User Guide, 2013).

Dalam metode ini persamaan kecepatan dikoreksi untuk menghitung satu set baru fluks konservatif. Persamaan momentum yang telah terdiskritisasi dan koreksi kecepatan diselesaikan secara implisit dan koreksi kecepatan diselesaikan secara eksplisit, hal ini adalah alasan disebutnya “Semi-Implisit Metode”. *Simple* dipakai pada skema default, kasar (*robust*).

b) *SIMPLE Consistent* (SIMPLEC)

Dapat mempercepat konvergensi untuk kasus yang sederhana, misalnya aliran laminar dengan bentuk geometri yang tidak terlalu kompleks.

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

Berguna untuk aliran *transient* atau kasus dengan *mesh* yang mengandung *skewness* yang tinggi. Untuk meningkatkan efisiensi perhitungan, metode piso menggunakan dua faktor koreksi tambahan, yaitu *neighbor correcion* dan *skewness correction*. *Neighbor correction* adalah proses iterasi yang disebut sebagai koreksi momentum atau *neighbor correction*. Dengan tambahan *neighbor correction* maka *Control Processing Unit* (CPU) pada komputer mengalami penambahan waktu untuk melakukan proses *solver* iterasi, akan tetapi akan menurunkan nomor iterasi yang dibutuhkan untuk mencapai konvergensi. *Skewness correction* adalah proses penghitungan ulang untuk gradien koreksi tekanan yang digunakan untuk memperbarui koreksi fluks massa. Metode ini didasarkan pada tingkatan yang lebih tinggi dari hubungan pendekatan antara faktor koreksi tekanan dan kecepatan.

d) *Coupled*

Berdasarkan hasil gabungan tekanan *solver* (konvergensi lebih cepat dari *segregated*).

2.10.2 *Gradient*

a) Least Squares Cell Based

Digunakan untuk persamaan konversi massa, momentum, konversi massa, energi, serta besaran skalar lainnya seperti turbulen dan reaksi kimia.

b) *Green-Gauss Cell Based*

Digunakan untuk perhitungan berdasarkan jumlah sel sehingga simulasi tidak memerlukan waktu yang terlalu lama, akan tetapi hasil simulasi menjadi kurang akurat.

c) *Green-Gauss Note Based*

Digunakan untuk perhitungan berdasarkan jumlah *note* dengan menggunakan rata-rata dari dalam sel yang mendefinisikan simpul tersebut.

2.10.3 *Pressure*

a) *PRESTO!*

Digunakan untuk aliran dalam saluran tertutup, aliran yang melibatkan media berpori, aliran dengan pusaran yang tinggi.

b) *Body Force Weighted*

Digunakan pada gaya badan (*body force*) tinggi, misalnya pada kasus konveksi bebas dengan bilangan Raleigh yang besar, aliran dengan pusaran yang tinggi, dll.

2.10.4 *Momentum, Turbulent Kinetic Energy, Turbulet Dissipation Rate*

a) *First-Order Upwind Scheme*

Skema interpolasi yang paling ringan dan cepat mencapai konvergen, tetapi ketelitiannya orde satu.

b) *Second-Order Upwind Scheme*

Menggunakan persamaan yang lebih teliti sampai orde 2, sangat baik digunakan pada mesh tri/tet dimana arah aliran tidak sejajar dengan

mesh. Kerena metode interpolasi yang digunakan lebih rumit, maka lebih lambat mencapai konvergen.

c) *Power Law Scheme*

Lebih akurat dari *first-order* ketika bilangan Reynolds pada aliran <5 (untuk aliran yang sangat lambat).

d) *Monotone Upstream–Centered Scheme for Conservation Laws (MUSCLE)*

Menggunakan konveksi diskritisasi sampai orde 3 untuk *mesh* yang tidak terstruktur, lebih akurat dalam memprediksi aliran sekunder, vortisitas dan kekuatan.

e) *Quadratic Upwind Interpolation (QUICK)*

Diaplikasikan untuk mesh quad/hex dan hybrid, tetapi jangan digunakan untuk elemen mesh tri, dengan aliran fluida yang berputar/*swirl*. Ketelitiannya mencapai orde 3 pada ukuran mesh yang seragam.

2.11 *Solution Initialization*

2.11.1 *Hybrid initialization*

Metode inisialisasi bawaan, memberikan perhitungan yang cepat dari suatu aliran dengan metode yang ada dan menyelesaikan persamaan *laplace* untuk menentukan bidang kecepatan dan tekanan. Seluruh variabel lainnya, seperti suhu, turbulensi, jenis fraksi, volume fraksi akan dihitung secara otomatis berdasarkan nilai rata-rata *domain* atau menggunakan metode interpolasi tertentu.

2.11.2 *Standart initialization*

Pada umumnya pengguna memilih berdasarkan kondisi batas “*compute from*” agar secara otomatis mengisi nilai inisialisasi dengan nilai-nilai yang ditentukan pada batas *inlet* dan *outlet*.