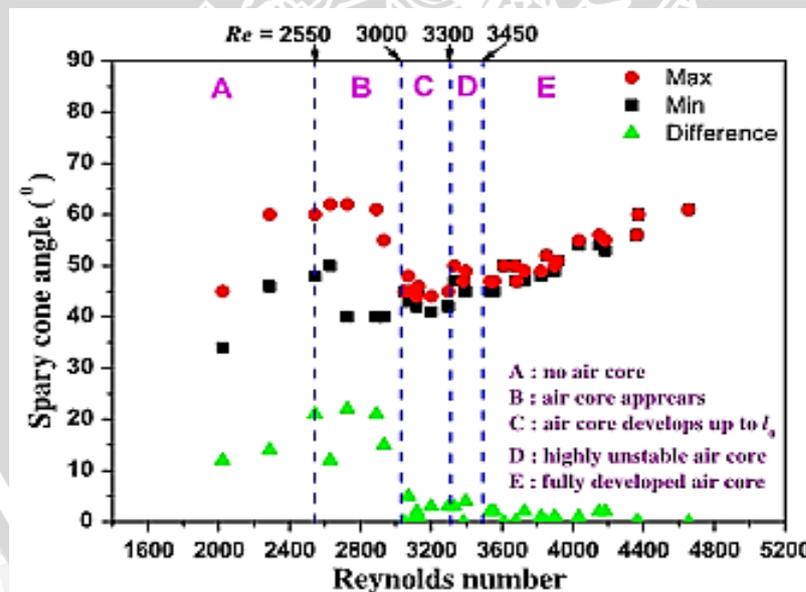


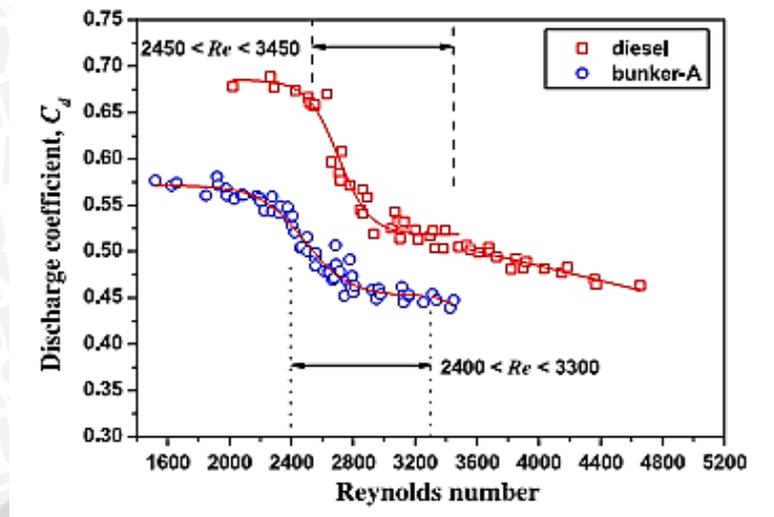
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Lee, *et al.* (2010) meneliti tentang pengaruh variasi bilangan *Reynolds* (Re) terhadap karakteristik *spray* dari sebuah *pressure swirl atomizer* secara eksperimental. *Pressure swirl atomizer* yang digunakan memiliki satu *inlet* dengan fluida masuk yang arahnya tangensial. Diameter *inlet* yang digunakan sebesar 1,5 mm dan fluida uji yang digunakan adalah minyak diesel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada minyak diesel *spray cone angle* meningkat dengan meningkatnya Re , kemudian berkurang pada Re sekitar 2600 – 3200 dan meningkat lagi dengan meningkatnya Re . Sementara itu *coefficient of discharge* berkurang dengan bertambahnya Re . Pada Re sekitar 2450 – 3450, *coefficient of discharge* mengalami penurunan yang drastis. Hal ini dihubungkan dengan fenomena pembentukan dan pertumbuhan *air core* yang timbul karena adanya pusaran dalam *swirl chamber*. Semakin besar Re , semakin besar pula ukuran *air core*nya.

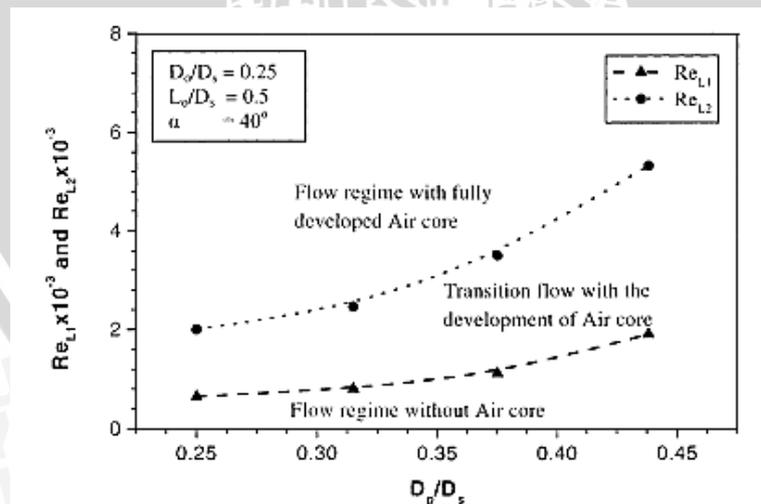


Gambar 2.1 Hubungan antara *spray cone angle* dengan bilangan *Reynolds* pada diesel
Sumber : Lee, *et al.*, 2010 : 1481



Gambar 2.2 Hubungan antara *coefficient of discharge* dengan bilangan *Reynolds*
 Sumber : Lee, *et al.*, 2010 : 1481

Halder, *et al.* (2002) melakukan penelitian mengenai pengaruh perubahan diameter *inlet* terhadap pembentukan *air core* dalam *swirl chamber*. Diameter *inlet* divariasikan sebesar 2,52 mm, 3,50 mm, 5,00 mm dan fluida ujinya adalah air dengan *inlet* yang berjumlah 4. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar perbandingan antara diameter *inlet* dengan diameter *swirl chamber* (D_p/D_s), maka *air core* terbentuk pada *Re* yang semakin tinggi. Hal ini menunjukkan semakin besar diameter *inlet*nya, maka *air core* terbentuk pada *Re* yang semakin besar. Dengan kata lain, semakin besar diameter *inlet* maka *air core* semakin sulit terbentuk.

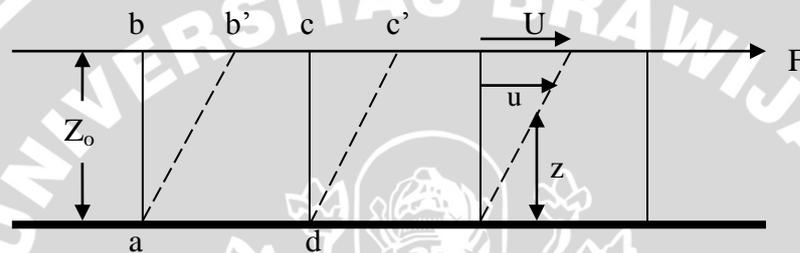


Gambar 2.3 Grafik hubungan antara bilangan *Reynolds* terhadap D_p/D_s
 Sumber : Halder, *et al.*, 2002 : 875

2.2 Fluida

2.2.1 Definisi dan Sifat – Sifat Fluida

Fluida adalah suatu zat yang dapat mengalami perubahan bentuk (deformasi) secara terus – menerus apabila dikenakan tegangan geser yang relatif kecil. Selama tegangan geser itu masih bekerja, fluida akan bergerak dan berubah bentuk secara kontinyu (terus – menerus). Besarnya tegangan geser dalam sebuah fluida sebanding dengan laju perubahan kecepatan ruang yang arahnya normal terhadap aliran fluida. Laju perubahan kecepatan ruang ini disebut gradien kecepatan, yang juga berarti laju deformasi sudut. Makin besar laju deformasi fluida, makin besar pula tegangan geser yang terjadi pada fluida tersebut.



Gambar 2.4 Deformasi elemen fluida
Sumber : Streeter & Wylie, 1993 : 4

Dari gambar di atas, apabila besaran lainnya dipertahankan konstan maka F berbanding lurus dengan A (luas pelat tersebut) dan juga akan berbanding terbalik dengan tebal antar pelat (t) dalam bentuk persamaan sebagai berikut :

$$F = \mu \frac{A U}{t} \quad (2-1)$$

Dimana,

μ = faktor kesebandingan pengaruh fluida yang tercakup didalamnya

U/t = kecepatan sudut garis ab atau laju perubahan bentuk sudut fluida, dapat ditulis du/dy . [m/s]

Jika tegangan geser $\tau = \frac{F}{A}$ maka diperoleh persamaan :

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (\text{Streeter \& Wylie, 1993 : 4}) \quad (2-2)$$

Dimana,

τ = tegangan geser [N/m²]

F = gaya yang bekerja [N]

A = luas penampang fluida [m²]

Bentuk diferensial di atas adalah hubungan antara tegangan geser dan laju deformasi fluida untuk aliran satu dimensi. Faktor kesebandingan μ disebut viskositas fluida dan persamaan di atas adalah hukum viskositas Newton.

Pada dunia rekayasa, semua fluida memiliki sifat – sifat penting, contohnya kerapatan dan kompresibilitas merupakan sifat – sifat fluida yang diperlukan untuk fluida yang diam, sedangkan fluida yang bergerak masih ada satu sifat lagi yang penting yaitu viskositas. Untuk tekanan dan temperatur dianggap sebagai sifat – sifat termodinamika yang menentukan sifat – sifat lain.

Kerapatan merupakan besar konsentrasi dalam suatu zat dan dinyatakan dalam massa per satuan volume, yang mana nilai dari kerapatan ini dapat diperoleh dari perbandingan antara massa zat yang terkandung dalam suatu bagian tertentu terhadap volume bagian tersebut. Sedangkan kompresibilitas adalah perubahan kerapatan fluida akibat geseran viskos atau kompresi oleh suatu tekanan dari luar yang bekerja terhadap suatu volume fluida. Besarnya nilai kompresibilitas diperoleh dari perbandingan tekanan yang bekerja dari luar dengan perubahan volume fluida tiap satuan volume.

Viskositas adalah suatu sifat fluida yang memberikan tahanan terhadap tegangan geser yang diberikan pada fluida tersebut. Hukum viskositas Newton menyatakan bahwa laju perubahan bentuk sudut fluida tertentu berbanding lurus dengan tegangan geser dan viskositas. Misalnya cairan yang sangat viskos (kental) adalah larutan gula tetes, sedangkan air dan udara mempunyai viskositas yang sangat kecil. Viskositas (μ) seringkali disebut viskositas mutlak atau dinamik agar tidak terkecual dengan viskositas kinematik (ν), yang merupakan perbandingan viskositas (μ) terhadap massa jenis (ρ) (Streeter & Wylie, 1993 : 10) :

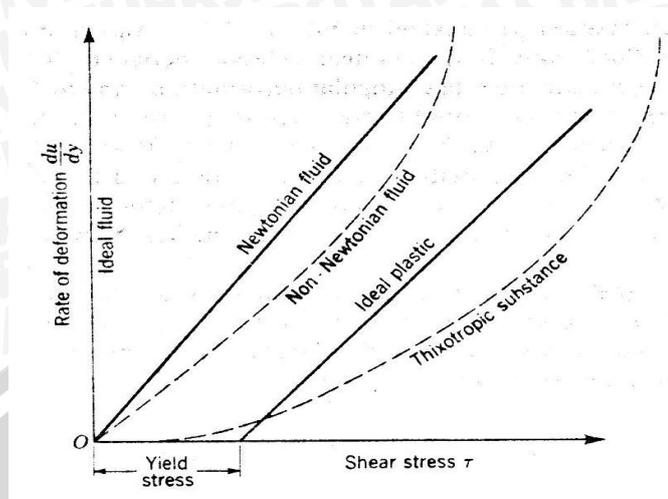
$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-3)$$

Viskositas kinematik (ν) sering muncul dalam banyak penerapan, misalnya dalam bilangan *Reynolds* yang tanpa dimensi untuk gerakan suatu benda melalui fluida.

2.2.2 Klasifikasi Fluida dan Alirannya

Kemampuan fluida dalam menahan tegangan geser yang bekerja terhadap fluida tersebut ditandai dengan laju perubahan bentuknya, yang mana fluida di sini dibedakan menjadi 2 yaitu fluida Newtonian dan fluida Non – newtonian. Fluida Newtonian adalah fluida yang mengalami penambahan laju deformasi yang seiring dengan bertambahnya tegangan geser, contohnya adalah air, oli dan udara. Sedangkan pada fluida Non –

newtonian terdapat hubungan tak linier antara laju deformasi dengan tegangan geser, contohnya adalah pasta gigi, lumpur dan mayones.

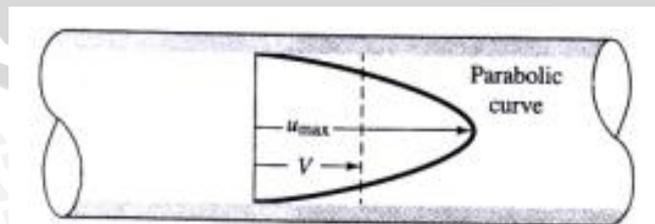


Gambar 2.5 Fluida Newtonian dan fluida Non – newtonian
Sumber : Streeter & Wylie, 1993 : 5

Berdasarkan viskositasnya, fluida dibagi menjadi 2 yaitu aliran *inviscid* (tidak viskos) dan aliran *viscous* (viskos). Aliran *inviscid* merupakan aliran dimana viskositas fluidanya dianggap nol, sehingga fluida tersebut tidak memberikan tahanan sama sekali terhadap tegangan geser yang terjadi padanya. Sedangkan aliran *viscous* adalah aliran dimana viskositasnya tidak sama dengan nol. Dari aliran *viscous* ini, kemudian dibagi menjadi 2 yaitu :

1. Aliran Laminar

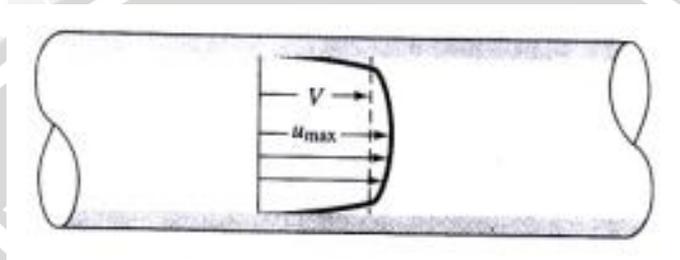
Aliran laminar merupakan aliran fluida yang partikelnya bergerak secara berurutan mengikuti lintasan yang lancar secara kontinu dengan kecepatan yang tetap, yang ditunjukkan seperti gambar 2.6. Aliran laminar memiliki bilangan *Reynolds* lebih kecil dari 2300. Pada aliran laminar kecenderungan turbulensi diredam oleh gaya-gaya viskos yang memberi hambatan terhadap gerak relatif lapisan-lapisan fluida.



Gambar 2.6 Profil kecepatan aliran laminar di dalam pipa
Sumber : White, 1986 : 311

2. Aliran Turbulen

Aliran turbulen adalah aliran fluida dimana *stream line* bergerak secara acak ke segala arah dan saling berpotongan antara satu dan yang lain. Hal ini dikarenakan pada aliran turbulen memiliki partikel – partikel fluida yang bergerak secara acak dengan saling tukar momentum dan partikel antar lapisan fluida yang berdekatan dalam skala mikroskopis. Karena pada aliran turbulen terjadi pertukaran partikel dalam skala besar, maka fluida bergerak ke segala arah, dan terjadi pembauran aliran fluida, yang ditunjukkan oleh gambar 2.7.



Gambar 2.7 Profil kecepatan aliran turbulen di dalam pipa
Sumber : White, 1986 : 311

Ciri – ciri aliran serta lapisan batas tergantung pada bilangan *Reynolds*. Bilangan *Reynolds* adalah parameter tak berdimensi yang menunjukkan perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya viskos dari suatu fluida. Hal ini dapat dirumuskan dari persamaan berikut (Streeter & Wylie, 1993 : 165) :

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (2-4)$$

Dimana,

V = kecepatan aliran fluida [m/s]

D = ukuran linear yang mewakili ukuran pipa [m]

ν = viskositas kinematik [m²/s]

Berdasarkan mampu mampatnya, fluida dibedakan menjadi 2 yaitu fluida *compressible* dan fluida *incompressible*. Fluida *compressible* adalah fluida yang mampu mampat dan kerapatan fluida dipengaruhi perubahan tekanan. Sedangkan fluida *incompressible* adalah fluida yang tidak mampu mampat dan perubahan kerapatan fluida akibat perubahan tekanan dapat diabaikan.

2.3 Hukum Dasar dan Metode Analisa Aliran Fluida

Dalam menganalisa aliran fluida ada beberapa hukum dasar yang digunakan antara lain :

- Hukum konservasi massa : laju perubahan massa fluida pada suatu sistem sama dengan total laju aliran massa fluida yang masuk ke dalam sistem tersebut.
- Hukum ke II Newton : laju perubahan momentum pada suatu sistem sama dengan jumlah gaya – gaya yang bekerja pada sistem tersebut.
- Hukum ke I Termodinamika : laju perubahan energi pada suatu sistem sama dengan laju panas yang ditambahkan dan laju kerja yang dilakukan pada suatu sistem.

Klasifikasi analisa aliran fluida berdasarkan pada daerah yang akan dianalisa dibagi menjadi 2 yaitu :

1. Sistem tertutup (*closed system*)

Sistem dianggap memiliki jumlah massa yang tetap dan tidak ada transfer massa yang melewati batas sistem, tetapi kerja dan energi bisa keluar masuk melewati batas sistem tersebut.

2. Volume kontrol (*open system*)

Suatu daerah sembarang dalam ruang dimana ruang itu dilewati fluida yang mengalir dengan parameter – parameter fluida dan aliran fluida tersebut adalah aliran fluida yang diamati dan dianalisis, sedangkan permukaan kontrol adalah permukaan – permukaan yang membatasi volume kontrol.

Klasifikasi analisa aliran fluida berdasarkan tujuan analisa dibagi 2 yaitu :

1. Analisa integral pada volume kontrol

Suatu hukum dasar yang diterapkan pada kontrol volume akan menghasilkan persamaan integral pada kontrol volume tersebut. Jika persamaan volume kontrol ini diselesaikan maka akan dihasilkan nilai besaran rata – rata dari suatu parameter aliran fluida. Penggunaan persamaan integral dengan menggunakan volume kontrol biasanya lebih mudah untuk proses menganalisis aliran yang terjadi.

2. Analisa differensial pada volume kontrol

Penggunaan hukum dasar dimana persamaan differensial, jika diselesaikan maka akan bisa didapat nilai besaran dari suatu parameter aliran fluida di setiap titik atau aliran fluida secara jelas.

Klasifikasi analisa aliran fluida berdasarkan partikel yang diamati dibagi menjadi 2 yaitu :

1. Metode lagrangian

Analisa aliran fluida dimana persamaan – persamaan yang ditulis untuk suatu sistem massa yang tetap dan yang menjadi pusat pengamatan adalah partikel – partikel fluidanya.

2. Metode Eulerian

Analisa aliran fluida untuk suatu volume yang terdiri dari partikel – partikel fluida yang sangat banyak dimana persamaan – persamaan yang ditulis adalah untuk volume kontrol dan menyatakan hubungan antara kondisi – kondisi dalam volume kontrol yang meliputi aliran massa, momentum, atau energi yang melalui kontrol volume.

2.4 Analisa dengan Persamaan Differensial untuk Gerak Aliran Fluida

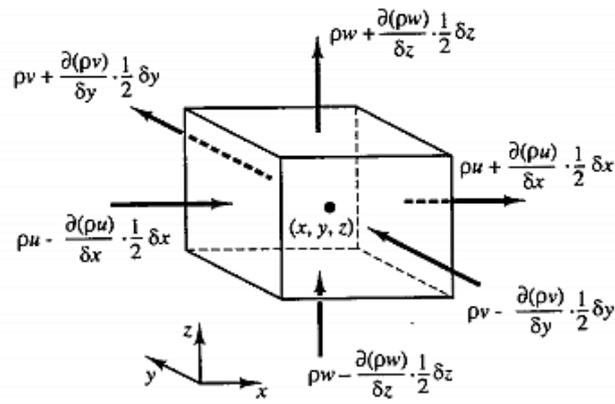
Persamaan untuk gerak aliran fluida yang digunakan dalam penelitian ini adalah persamaan konservasi massa dan persamaan momentum dengan sistem koordinat silinder karena bendanya adalah gabungan dari beberapa bagian yang berbentuk silinder. Tetapi penurunan rumus dari persamaan tersebut yang akan dijelaskan dalam bab ini menggunakan sistem koordinat kartesius, karena sistem ini lebih sering digunakan sehingga mudah dipahami. Persamaan konservasi massa dan persamaan momentum dalam bentuk sistem koordinat silinder akan ditunjukkan pada sub bab berikutnya yaitu 2.9.

2.4.1 Konservasi Massa

Konservasi massa untuk suatu elemen fluida dinyatakan dengan laju perubahan massa pada suatu elemen fluida sama dengan total laju aliran massa yang masuk ke dalam elemen tersebut. Besarnya rata – rata perubahan massa pada elemen fluida adalah sebagai berikut :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \delta x \delta y \delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta x \delta y \delta z \quad (2-5)$$

Laju aliran massa yang melintasi permukaan elemen dari sisi yang diberikan oleh rapat massa, luas dan komponen kecepatan normal pada permukaan seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.8 sebagai berikut :



Gambar 2.8 Aliran massa yang masuk dan keluar dari elemen fluida
Sumber : Malalasekera & Versteeg, 1995 : 12

Dari gambar tersebut aliran aktual dalam elemen adalah hasil dari penambahan massa di dalam elemen fluida, dimana aliran massa yang masuk ke dalam elemen fluida diberi tanda positif dan aliran massa yang keluar dari elemen fluida diberi tanda negatif sehingga total laju aliran massa yang masuk ke dalam elemen fluida adalah :

$$\left(\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x\right) \delta y \delta z - \left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x\right) \delta y \delta z + \left(\rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y\right) \delta x \delta z - \left(\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y\right) \delta x \delta z + \left(\rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z\right) \delta x \delta y - \left(\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z\right) \delta x \delta y = 0 \quad (2-6)$$

Selanjutnya persamaan 2-5 dan 2-6 disamakan dan dibagi dengan volume elemen $\delta x \delta y \delta z$, maka akan diperoleh hasilnya adalah

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2-7)$$

Dalam notasi vektor persamaan menjadi

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (2-8)$$

Persamaan 2-8 merupakan konservasi massa 3 dimensi pada fluida kompresibel yang alirannya *unsteady*, sedangkan untuk fluida inkompresibel nilai ρ konstan maka persamaan di atas menjadi

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \text{ atau } \text{div} \vec{V} = 0 \quad (2-9)$$

2.4.2 Persamaan Momentum

Pada volume kontrol, persamaan momentum dinyatakan dengan hukum ke II Newton yang menyatakan bahwa laju perubahan momentum pada suatu sistem sama dengan jumlah gaya – gaya yang bekerja pada sistem tersebut. Berdasarkan hukum

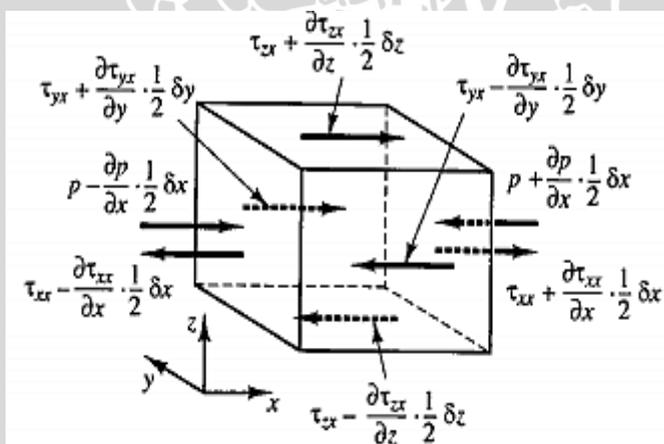
tersebut bahwa rata - rata laju perubahan momentum sama dengan jumlah gaya – gaya pada partikel fluida dalam *cartesian* memiliki sumbu x, y dan z per satuan kontrol volume partikel fluida adalah :

$$\rho \frac{Du}{Dt} \quad \rho \frac{Dv}{Dt} \quad \rho \frac{Dw}{Dt} \quad (\text{Malalasekera \& Versteeg, 1995 : 15}) \quad (2-10)$$

Di dalam partikel fluida ada 2 jenis gaya yang bekerja didalamnya yaitu *body force* dan *surface force*.

- *Body force* : - gaya tekan
- gaya viskos
- *Surface force* : - gaya gravitasi
- gaya sentrifugal
- gaya elektromagnetis
- gaya *coriolis*

Tegangan pada elemen fluida didefinisikan dengan besaran tekanan dan sembilan komponen gaya viskos yang ditunjukkan pada gambar 2.9. Tekanan, tegangan normal dinotasikan dengan P, sedangkan gaya viskos dinotasikan dengan τ . Biasanya gaya pada akhiran notasinya menggunakan τ_{ij} yang menunjukkan arah gaya viskos. Notasi i dan j dalam τ_{ij} menunjukkan bahwa komponen gaya bekerja pada arah j dalam permukaan normal menuju arah i.



Gambar 2.9 Tegangan dalam arah x pada elemen fluida
Sumber : Malalasekera & Versteeg, 1995 : 15

Pada gambar 2.9 ditunjukkan semua tegangan yang bekerja dalam arah x pada suatu elemen fluida dan sembilan komponen gaya viskos τ_{xx} , τ_{yx} , τ_{zx} . Besarnya dari gaya yang dihasilkan oleh tegangan permukaan didapatkan dari tegangan dan luasan. Gaya yang searah sumbu x diberi notasi positif, sedangkan gaya yang berlawanan dengan

sumbu x diberi notasi negatif. Rata – rata gaya pada arah sumbu x sama dengan jumlah dari komponen – komponen gaya yang bekerja dalam arah tersebut pada elemen fluida.

Pada sumbu x :

$$\left[\left(P - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left(\tau_{xx} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z + \left[- \left(P + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) + \left(\tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z = \left(- \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \right) \delta x \delta y \delta z \quad (2-11)$$

Pada arah sumbu x menuju sumbu y :

$$- \left(\tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z + \left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \delta x \delta y \delta z \quad (2-12)$$

Pada arah sumbu x menuju sumbu z :

$$- \left(\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y + \left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \delta x \delta y \delta z \quad (2-13)$$

Selanjutnya persamaan 2-11, 2-12 dan 2-13 dibagi dengan volume $\delta x \delta y \delta z$, maka hasilnya menjadi :

$$\frac{\partial(-p+\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = 0 \quad (2-14)$$

Sehingga persamaan momentum di tiap sumbu adalah :

Sumbu x

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p+\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (2-15)$$

Sumbu y

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p+\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (2-16)$$

Sumbu z

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p+\tau_{zz})}{\partial z} \quad (2-17)$$

Sembilan komponen gaya viskos dari tegangan dalam arah x pada elemen fluida adalah

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \operatorname{div} u \quad (2-18)$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial x} + \lambda \operatorname{div} u \quad (2-19)$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial x} + \lambda \operatorname{div} u \quad (2-20)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2-21)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (2-22)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (2-23)$$

Jika sembilan komponen gaya viskos di atas dimasukkan dalam persamaan 2-15, 2-16 dan 2-17 maka persamaannya akan menjadi :

Sumbu x

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \operatorname{div} u \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \quad (2-24)$$

Sumbu y

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \operatorname{div} u \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \quad (2-25)$$

Sumbu z

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \operatorname{div} u \right] \quad (2-26)$$

Persamaan momentum pada persamaan Navier – Stokes pada bidang x, y dan z berturut

– turut dapat ditulis sebagai berikut :

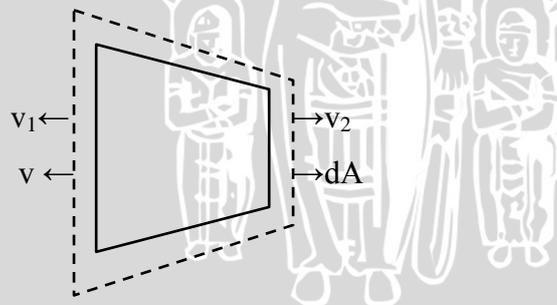
$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \operatorname{div} (\mu \operatorname{grad} u) \quad (2-27)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \operatorname{div} (\mu \operatorname{grad} v) \quad (2-28)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \operatorname{div} (\mu \operatorname{grad} w) \quad (2-29)$$

2.5 Persamaan Analisa Aliran Fluida yang melalui Nosel

Laju aliran massa dan kecepatan rata – rata pada sisi masuk dan keluar nosel dapat dihitung dengan menggunakan analisa kontrol volume, yang ditunjukkan pada gambar 2.10 di bawah ini.



Gambar 2.10 Aliran fluida pada kontrol volume berbentuk nosel

Pada konservasi massa untuk aliran fluida inkompresibel tunak :

$$\rho \int_{CS} V dA = 0$$

Untuk aliran fluida melewati nosel, maka persamaan di atas menjadi :

$$-|\rho V_1 A_1| + |\rho V_2 A_2| = 0 \quad \text{atau}$$

$$|\rho V_1 A_1| = |\rho V_2 A_2| \quad (2-30)$$

$$\dot{m} = \rho VA \quad \text{sehingga berlaku } \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (2-31)$$

Dimana,

ρ = densitas fluida [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

V = kecepatan aliran fluida [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

dA = vektor normal pada suatu elemen permukaan kontrol *surface* [m^2]

\dot{m} = laju aliran massa fluida tiap satuan waktu [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]

Persamaan momentum untuk aliran fluida inkompresibel tunak :

$$F = \int_{CS} V \rho V dV$$

Untuk aliran fluida melewati nosel, maka persamaan di atas menjadi :

$$F = -|V_1 \rho V_1 A_1| + |V_2 \rho V_2 A_2| \quad (2-32)$$

Dengan $\dot{m} = \rho V A$ maka :

$$F = -|V_1 \dot{m}_1| + |V_2 \dot{m}_2| \quad (2-33)$$

2.6 Kerugian Energi pada Aliran Fluida

Pada suatu zat cair yang mengalir melalui saluran atau pipa akan terjadi gesekan antara fluida dengan dinding pipa. Hal ini yang menyebabkan kerugian energi pada aliran fluida, selain itu juga disebabkan oleh belokan, adanya katup, perubahan penampang dan sebagainya.

Kerugian energi pada aliran fluida yang melewati suatu saluran dibagi menjadi 2 yaitu :

1. *Mayor losses*

Adalah kerugian energi yang terjadi karena adanya gesekan sepanjang pipa saluran dengan luas penampang yang konstan. Secara matematis dapat dituliskan dalam persamaan Darcy's yaitu :

$$h_L = f x \frac{l}{D} x \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Fox, 1994 : 332}) \quad (2-34)$$

Dimana,

f = koefisien gesek

D = diameter dalam pipa [m]

l = panjang pipa [m]

g = percepatan gravitasi [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]

V = kecepatan rata – rata aliran dalam pipa [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

2. Minor losses

Adalah kerugian energi yang terjadi karena adanya perubahan aliran fluida dalam pipa biasanya terjadi pada aliran yang melewati katup, belokan dan perubahan penampang. Berdasarkan rumusan energi yang hilang (*energy losses*) adalah sebagai berikut :

$$h_L = k \times \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Fox, 1994 : 336}) \quad (2-35)$$

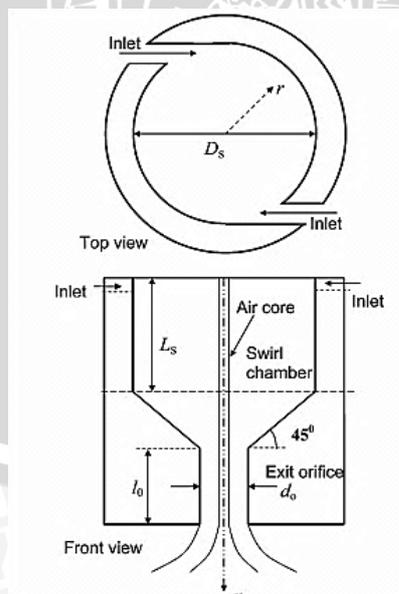
Dimana,

k = koefisien kerugian

2.7 Pressure Swirl Nozzle

Nosel adalah suatu pipa atau tabung dengan diameter yang berbeda dan digunakan untuk mengarahkan atau memodifikasi arah aliran gas atau cairan. Fungsi utama nosel adalah mengubah energi tekanan fluida masuk nosel menjadi energi kecepatan fluida keluar nosel. Pada umumnya nosel digunakan untuk mengontrol laju aliran fluida dan mengubah arah alirannya.

Salah satu jenis dari nosel adalah *pressure spray nozzle*, yang berfungsi untuk memecah fluida cair yang disemprotkan menjadi butiran – butiran halus atau *droplet*. *Pressure swirl nozzle* memiliki bagian – bagian utama yaitu saluran masuk (*inlet*), *swirl chamber*, dan *orifice*, yang ditunjukkan pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Bagian – bagian *Pressure swirl nozzle*

Sumber : Mandal, *et al.*, 2008 : 1495

Fungsi dasar *pressure swirl nozzle* adalah :

1. Mengontrol laju aliran fluida.
2. Atomisasi cairan ke dalam *droplet*.
3. Tersebar nya *droplet* dalam pola tertentu.

Ciri khas dari *pressure swirl nozzle* adalah adanya pusaran di dalam ruang nosel.

Pusaran di dalam ruang nosel terbentuk akibat dari kecepatan tangensial fluida yang sangat tinggi. Hal ini akan mempengaruhi karakteristik *spray* dari *pressure swirl nozzle* diantaranya adalah *spray cone angle*, *coefficient of discharge* dan tebal lapisan fluida. Bila kecepatan pusaran cukup tinggi, maka akan terbentuk *air core* pada bagian tengah *swirl chamber*. Semakin besar pusaran, maka semakin besar pula ukuran *air core*. Hal ini akan mengakibatkan *spray cone angle* yang terbentuk semakin besar dan tebal lapisan fluida yang keluar melalui nosel semakin tipis. Besarnya *spray cone angle* dari *pressure swirl nozzle* dapat dihitung menggunakan persamaan di bawah ini :

$$\psi = 2 \cos^{-1} \left(\frac{V_z}{\sqrt{(V_z^2 + V_r^2 + V_\theta^2)}} \right) \quad (\text{Datta \& Som, 2000 : 415}) \quad (2-36)$$

$$V_z = \frac{4Q}{\pi d_o^2} \quad (2-37)$$

$$V_r = \frac{\int_0^{r_o} r V_{ze} V_{re} dr}{\int_0^{r_o} r V_{ze} dr} \quad (2-38)$$

$$V_\theta = \frac{\int_0^{r_o} r V_{ze} V_{\theta e} dr}{\int_0^{r_o} r V_{ze} dr} \quad (2-39)$$

Dimana,

ψ = sudut spray [$^\circ$]

V = kecepatan fluida [m/s]

Q = debit aliran fluida [m³/s]

d_o = diameter orifice [m]

d_a = diameter *air core* [m]

Selain kedua karakteristik di atas, pusaran di dalam ruang nosel juga mempengaruhi besarnya *coefficient of discharge* yang terbentuk. *Coefficient of discharge* merupakan hasil perbandingan dari aliran fluida aktual (sebenarnya) dengan aliran fluida teoritis. Besarnya *coefficient of discharge* dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut (Halder, *et al.*, 2004 : 300) :

$$C_d = \frac{Q}{A_o \left(\frac{2\Delta P}{\rho} \right)^{1/2}} \quad (2-40)$$

Dimana,

Q = debit aliran fluida [m^3/s]

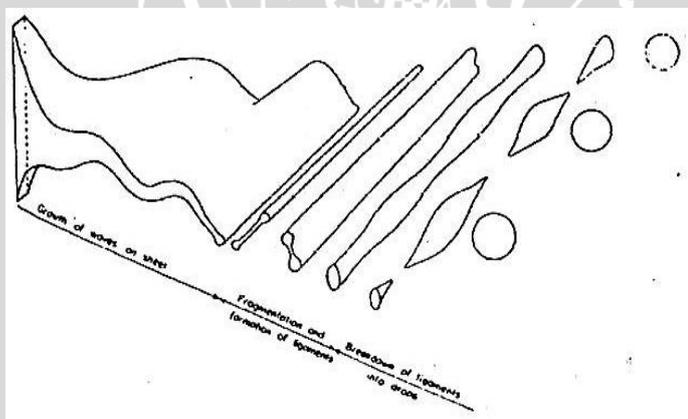
A_o = luas penampang *orifice* [m^2]

ΔP = beda tekanan fluida melalui nosel [N/m^2]

ρ = densitas fluida [kg/m^3]

2.8 Mekanisme Pembentukan *Droplet*

Pada suatu aliran fluida untuk membentuk *droplet* diperlukan energi. Dalam *pressure swirl nozzle*, energi ini biasanya berbentuk energi tekanan dari pompa. Energi tekanan dikonversikan menjadi energi kecepatan dengan mengalirkan fluida melalui beberapa saluran sempit dalam nosel. Fluida keluar dari saluran dengan kecepatan yang sangat tinggi kemudian masuk ke dalam *swirl chamber*. Dalam *swirl chamber*, fluida memiliki 3 komponen kecepatan yaitu kecepatan tangensial, kecepatan aksial dan kecepatan radial. Kemudian fluida keluar melalui *orifice* dalam bentuk *circular jet*, *flat sheet* atau *conical sheet* yang tergantung pada desain *orifice*. Selanjutnya gangguan berupa gesekan dengan udara mengakibatkan *liquid sheet* terpecah membentuk ligamen dalam aliran fluida kemudian ligamen tersebut hancur dengan mekanisme *break up* dan terbentuklah butiran – butiran halus atau *droplet*.



Gambar 2.12 Mekanisme pembentukan *droplet*

Sumber : <http://www.forms.gradsach.psu.edu/equity/sroppapers/2002/delgadojorge.pdf>

2.9 Komputasi Dinamika Fluida (KDF)

Komputasi Dinamika Fluida (KDF) adalah salah satu teknologi dalam bidang analisis suatu sistem. Metode ini mengalami perkembangan yang pesat dari tahun ke tahun sejak tahun 1960. KDF merupakan cabang dari mekanika fluida yang

menggunakan metode numerik untuk memecahkan dan menganalisa masalah yang melibatkan aliran fluida dan perpindahan panas yang dijalankan pada komputer dengan program simulasi. KDF memiliki beberapa keuntungan dalam analisis desain suatu sistem fluida, yaitu :

1. Memiliki pengurangan waktu dan biaya untuk desain baru.
2. Memiliki kemampuan untuk mempelajari sistem yang tidak mungkin dilakukan secara eksperimen, seperti pada sistem yang besar.
3. Memiliki kemampuan untuk mempelajari sistem di bawah kondisi penuh resiko dan di luar kemampuan batas normal manusia, seperti pada eksperimen yang berbahaya.
4. Memiliki tingkat detail hasil yang tak terbatas.

Terdapat beberapa komersial kode yang dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pada KDF seperti: PHOENICS, FLUENT, FLOW3D, dan STAR-CD. *Fluent* merupakan salah satu kode KDF yang terdapat pada *software* Ansys Workbench yang memiliki kelebihan dalam pembuatan *mesh* dan memperbaiki *mesh* ketika sedang melakukan simulasi serta memberikan kemudahan dalam melakukan simulasi. Penyelesaian masalah dalam KDF terdiri dari tiga cara, yaitu *pre-processor*, *processor* dan *post-processor*.

Pre-Processor

Pre-processor merupakan tahap awal yang terdiri atas pemasukan dari suatu masalah untuk suatu program KDF. Langkah – langkah yang terdapat pada tahap *pre – processor* meliputi :

1. Menentukan domain fisik dari masalah yang akan diselesaikan.
yaitu dengan membuat gambar geometri yang akan disimulasikan langsung dengan menggunakan *software Fluent* atau dengan menggunakan *software* CAD seperti *Autocad* dan lain – lain. Fungsi dari domain fisik adalah sebagai batasan dari permasalahan yang akan disimulasikan.
2. *Grid generation (Meshing)*

Grid generation adalah membagi suatu domain fisik menjadi kontrol volume yang lebih kecil agar nilai yang diperoleh dari simulasi akurat. Semakin banyak jumlah *mesh* yang digunakan maka hasil dari suatu simulasi akan semakin akurat. Jadi, penambahan dari jumlah *mesh* ini akan mempengaruhi pada lamanya proses perhitungan komputasi dinamika fluida.

3. Menentukan persamaan atur

Dalam menentukan persamaan aliran dari suatu fluida, akan digunakan bentuk persamaan matematika dari hukum kekekalan fisika dasar yaitu :

1. Hukum konservasi massa

Hukum konservasi massa adalah total laju aliran massa yang masuk ke dalam sistem sama dengan total laju aliran massa yang keluar sistem. Persamaan atur yang digunakan pada hukum konservasi massa adalah :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial r v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (2-41)$$

2. Hukum kekekalan momentum

Hukum kekekalan momentum adalah laju perubahan momentum pada suatu sistem sama dengan jumlah gaya - gaya yang bekerja pada sistem tersebut. Persamaan atur yang digunakan pada hukum kekekalan momentum pada sumbu r, θ , dan z adalah sebagai berikut :

r-momentum

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_r}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} (v_r^2) + \frac{\partial}{\partial z} (v_z v_r) + \frac{v_r^2 - v_\theta^2}{r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{2}{Re} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) \\ + \frac{2}{Re} \frac{\mu_{eff}}{r} \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r} \right) + \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \mu_{eff} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right\} \end{aligned} \quad (2-42)$$

z-momentum

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} (v_r v_z) + \frac{\partial}{\partial z} (v_z^2) + \frac{v_r v_z}{r} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \mu_{eff} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right\} \\ + \frac{2}{Re} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2-43)$$

θ -momentum

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_\theta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} (v_r v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (v_z v_\theta) + \frac{2 v_r v_\theta}{r} = \frac{1}{Re} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 \mu_{eff} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} \right) \right\} \\ + \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2-44)$$

Dimana,

$$p_1 = p + 2/3(k), \mu_{eff} = 1 + \mu_t, \mu_t = c_\mu Re k^2 / \epsilon$$

Energi kinetik turbulensi :

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(v_r k) + \frac{\partial}{\partial z}(v_z k) + \frac{v_r k}{r} &= \frac{1}{Re} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial r} \right) + \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \\ \frac{1}{Re} \mu_t \left[2 \left(\left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v_r}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right) + \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right)^2 \right] - \varepsilon \end{aligned} \quad (2-45)$$

Kehilangan energi kinetik turbulensi rata – rata :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(v_r \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial z}(v_z \varepsilon) + \frac{v_r \varepsilon}{r} &= \frac{1}{Re} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) + \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \\ \frac{1}{Re} c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t \left[2 \left(\left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v_r}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right) + \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^2 + \right. \\ \left. \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right)^2 \right] - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (2-46)$$

Dimana,

$$Re = \rho U D_1 / \mu \text{ (bilangan Reynolds pada inlet ke nosel)}$$

Konstanta empiris untuk persamaan 2-45 dan 2-46 sebagai berikut :

$$c_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, c_{1\varepsilon} = 1.44, c_{2\varepsilon} = 1.92$$

4. Menentukan Kondisi Batas (*Boundary Conditions*)

Kondisi batas merupakan nilai dari variabel tak bebas atau turunannya di batas sistem. Tipe dari kondisi batas ada 4 macam yaitu :

- *Dirichlet Boundary Condition* adalah nilai dari variabel tak bebas pada batas yang ditentukan.
- *Newman Boundary Condition* adalah nilai gradien normal dari variabel tak bebas pada batas yang ditentukan.
- *Robin Boundary Condition* adalah jika kondisi batas yang ditentukan merupakan kombinasi linier dari tipe *dirichlet* dan *newman*.
- *Mix Boundary Condition* merupakan gabungan dari tipe *dirichlet* dan *newman*.

Tahap – tahap di atas merupakan langkah-langkah yang terdapat pada *pre-processor*, dengan solusi dari sebuah masalah aliran (kecepatan, tekanan, temperatur dan lain-lain) yang didefinisikan pada titik dalam masing – masing sel. Pada umumnya, semakin banyak sel dalam kisi akan memberikan solusi KDF yang lebih akurat.

Processor

Langkah *processor* adalah langkah penyelesaian persamaan atur dalam domain simulasi untuk mendapatkan nilai dari variabel terikat. Dalam langkah ini persamaan

diferensial akan dirubah menjadi persamaan aljabar. Langkah ini adalah langkah yang sangat penting karena hasil dari langkah inilah yang akan digunakan pada program. Terdapat beberapa metode untuk merubah persamaan atur yang berbentuk persamaan diferensial menjadi persamaan aljabar diantaranya adalah *finite difference method*, *finite element method* dan *finite volume method*. *Fluent* menggunakan *finite volume method* untuk menyelesaikan masalah aliran fluida. Diskretisasi persamaan atur dengan *finite volume method* pada *processor* terdiri dari beberapa tahap yaitu :

1. Integrasi persamaan atur dalam kontrol volume.
2. Diskretisasi persamaan atur yang telah diintegrasikan menjadi persamaan aljabar.
3. Penyelesaian persamaan terdiskretisasi.

Post-processor

Langkah *post-processor* merupakan langkah terakhir dalam KDF. Langkah *post-processor* memiliki kemampuan menampilkan data hasil simulasi dalam bentuk grafik dan visualisasi data yang lengkap. Beberapa cara penampilan data dalam *post-processor* adalah :

1. Domain geometri dan gambaran *grid*
2. Plot vektor
3. 2D dan 3D plot permukaan

Ketiga cara di atas merupakan langkah – langkah dalam pembuatan program KDF. Dasar dalam pembuatan program KDF adalah pemahaman mengenai sifat fisik aliran fluida dan pemahaman mengenai dasar – dasar *numerical algorithms*.

2.9.1 Software ANSYS Workbench

ANSYS Workbench merupakan salah satu *software* yang berbasis *Finite Element Analysis* (FEA), adalah prosedur numeris yang dapat dipakai untuk menyelesaikan masalah – masalah dalam bidang rekayasa (*engineering*) seperti aliran fluida, analisa tegangan pada struktur, perpindahan panas dan elektromagnetis.

ANSYS Workbench dengan *project* lain dirancang guna mengembangkan dan mengatur berbagai jenis program komputer dengan dasar *Computer Aided Engineering* (CAE) dan membuatnya lebih mudah untuk digunakan. *ANSYS Workbench* berisi beberapa fasilitas, diantaranya adalah *Mechanical*, *Fluid Flow*, *Engineering Data*, *Design Modeler*, *Meshing Application* dan *Blade Gen*. Beberapa hal yang dapat dilakukan dengan *ANSYS Workbench* antara lain :

1. Model yang digambar dari beberapa *software* CAD dapat langsung diimport ke ANSYS Workbench.
2. Simulasi FEA dapat dilakukan dengan baik.
3. Pengimplementasian *design* yang dipilih dapat dilakukan untuk kondisi sebenarnya.
4. Model yang telah dibuat dapat dikondisikan sesuai dengan jenis simulasi yang menggunakan *Design Modeler*.

2.10 Hipotesa

Ukuran diameter *inlet* mempengaruhi besarnya kecepatan tangensial fluida yang masuk menuju *swirl chamber*. Untuk debit aliran fluida yang sama semakin besar diameter *inlet*, kecepatan tangensial fluida yang masuk semakin kecil maka pusaran yang terbentuk di dalamnya semakin kecil dan *losses* (kerugian) yang terjadi semakin kecil sehingga *spray cone angle* yang terbentuk kecil dan *coefficient of dischargenya* semakin besar.

