Simulasi Kavitasi Pada Venturi Dengan Menggunakan CFD (*Computational Fluid Dynamics*)

Mudjijanto[a*]

[a] Sekolah Tinggi Teknologi Ronggolawe
Email: mudjijantoswd@gmail.com

Diterima : 28-06-2022 - Direview : 29-06-2022 - Diterbitkan : 30-06-2022

Intisari

Dalam sistim instalasi pemipaan fenomena kavitasi sering tidak diperhatikan, sedangkan kavitasi sendiri adalah salah satu kerugian di dalam sistim instalasi pemipaan. Untuk itu kami melakukan kajian tentang fenomena kavitasi pada venturi dengan menggunakan software fluent 6.3. Tekanan fluida masuk venturi berasal dari pompa yang tersusun secara tunggal, seri dan paralel. Untuk pressure yang dihasilkan dari susunan pompa sebagai berikut pompa tunggal 5 psi, seri 6 psi dan paralel 11 psi. Pertama melakukan pengambilan data, pemodelan pada gambit, melakukan proses meshing, menentukan kondisi batas dan menjalankan fluent 6.3 solver 3D. Dari simulasi dapat kita lihat pola aliran dari karakteristik tekanan (*pressure*), kecepatan (*velocity*), arah, garis lintasan tekanan, dan garis lintasan kecepatan aliran. Kavitasi terjadi pada leher venturi dan terjadi aliran turbulen pada jalur keluar venturi

Kata Kunci : **Pola aliran; Simulasi; Venturi**

1. Pendahuluan

Pada sistem instalasi pipa, fenomena kavitasi seringkali diabaikan, padahal kavitasi sendiri merupakan salah satu kelemahan dari sistem instalasi pipa. Kavitasi adalah pembentukan gelembung dalam aliran cairan yang disebabkan oleh tekanan cairan yang turun di bawah tekanan uap jenuh. Gelembung - gelembung uap dapat terjadi pada cairan yang mengalir, baik di pompa maupun di pipa, di area bertekanan rendah atau berkecepatan tinggi di mana aliran sangat sensitif terhadap kavitasi. Pada sistem perpipaan venturi, kavitasi sangat umum terjadi karena bentuk penampang venturi yang berbeda menyebabkan penurunan tekanan turun di bawah tekanan uap jenuh sehingga menimbulkan fenomena yang disebut kavitasi. Kerugian yang ditimbulkan oleh kavitasi antara lain rusaknya dinding venturi yang jika dibiarkan terlalu lama akan menimbulkan korosi pada dinding venturi dan memperpendek atau tidak optimalnya umur venturi.

2. Kerangka Teori

Beberapa peneliti telah melakukan tentang kavitasi antara lain :

Avellan (2005) Mempertimbangkan kavitasi yang terjadi pada pipa selama proses pemompaan cairan seperti air, dan yang ditunjukkan pada gambar (2.1), ditemukan bahwa ketika air memasuki pompa, peningkatan kecepatan menyebabkan penurunan tekanan pompa. Jika tekanan itu terlalu rendah di bawah tekanan uap jenuhnya, air akan teratomisasi/menguap dan membentuk gelembung dalam cairan. Gelembung-gelembung ini meledak dengan keras saat bergerak ke area dengan tekanan lebih tinggi. .

Brookmeyer (2003) meneliti tekanan terhadap kavitasi yang terjadi dalam venturi dan menyatakan bahwa kavitasi terjadi jika tekanan masuk lebih besar daripada tekanan keluar sehingga tekanan keluar turun sampai di bawah tekanan jenuhnya, sehingga kavitasi di dalam venturi dapat terjadi.

Karassik dkk, (1976) Perlu dicatat bahwa kavitasi adalah peristiwa di mana gelembung uap terbentuk dalam cairan yang dipompa, yang disebabkan oleh tekanan cairan yang turun di bawah tekanan uap jenuh cairan pada suhu tertentu. Sirkulasi gelembung uap yang dihasilkan sangat singkat. Knapp menemukan bahwa hanya butuh sekitar 0,003 detik untuk gelembung terbentuk dan meledak. Gelembung-gelembung ini terseret dalam aliran cairan hingga akhirnya berada di area dengan tekanan lebih besar dari tekanan uap jenuh cairan. Di area ini, gelembung pecah dan mengenai dinding pipa. Cairan tiba-tiba memasuki ruang yang diciptakan oleh ledakan gelembung uap dan menyebabkan tabrakan. Peristiwa ini merusak dinding pipa. Meskipun satu gelembung hanya akan menimbulkan bekas kecil pada dinding pipa, kejadian berulang dapat menyebabkan terbentuknya lubang kecil pada dinding pipa. Semua material dapat rusak oleh kavitasi jika terjadi dalam jangka waktu yang lama.

2.1. Kajian Teoritis

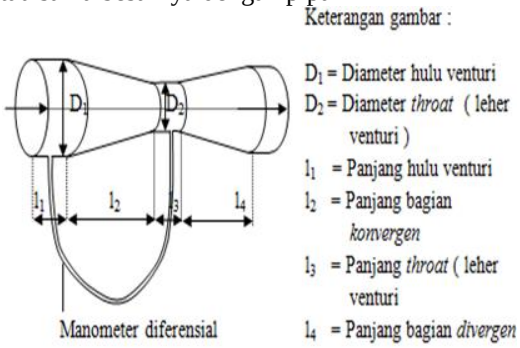
2.2.1. Kavitasi

Kavitasi adalah pembentukan gelembung dalam aliran cairan yang disebabkan oleh tekanan cairan yang turun di bawah tekanan uap jenuh. gelembung - gelembung uap dapat terjadi pada cairan yang mengalir, baik di pompa maupun di pipa, di mana tekanannya rendah atau laju alirannya tinggi, hal ini sangat sensitif terhadap kavitasi. Pompa di mana tekanan pada sisi isap turun di bawah tekanan uap jenuh, sehingga gelembung uap terbentuk, mengembang dan bergerak bersama aliran cairan ke tekanan yang lebih tinggi, setelah itu gelembung meledak di bawah pengaruh tekanan sekitarnya, ini disebut kavitasi. Penyebab kavitasi Saat air memasuki venturi kecepatannya meningkat, menyebabkan penurunan tekanan di dalam venturi. Jika tekanan ini terlalu rendah, air

akan berkabut/menguap dan membentuk gelembung di dalam cairan. Gelembung-gelembung ini meledak dengan keras saat bergerak ke area dengan tekanan lebih tinggi. peristiwa ini yang disebut kavitasi.

2.2.2. Venturimeter

Venturi meter adalah alat yang digunakan untuk mengukur debit aliran dalam pipa. Alat ini terdiri dari:
(1) bagian hulu dengan ukuran yang sama dengan pipa. Pengukur tekanan diferensial dipasang di area ini. (2) bagian kerucut konvergen. (3) Leher pipa berbentuk silinder dan diameternya lebih kecil dari diameter hulu. Pengukur tekanan diferensial juga dipasang di bagian ini. (4) karakteristik bagian kerucut secara bertahap sama besarnya dengan aliran hulu atau sama besarnya dengan pipa



Gambar 2.2 Venturimeter

2.2.1. Sifat - sifat Fluida

2.2.3.1. Kerapatan (ρ)

Kerapatan (*density*) adalah massa per satuan volume. Bisa juga bermakna bentuk ukuran untuk konsentrasi zat tersebut dan disebutkan dengan massa per satuan volume.

$\rho = \frac{m}{V}$ .....(2.1)

dengan :

ρ = kerapatan (kg/m^3)
m = massa (kg)
V = volume (m^3)

Massa jenis relatif atau berat jenis (SG) adalah rasio massa jenis cairan terhadap massa jenis air pada suhu tertentu. Biasanya suhu ini adalah 4˚C dan massa jenis air adalah 1000 kg/m^3:

$SG = \frac{\rho}{\rho_{air}}$ .....(2.2)

Dimana :

SG = Spesific Grafity atau kerapatan relatif
ρ = kerapatan (density) (kg/m3)
ρair = 1000 kg/m^3

2.2.3.2. Berat jenis (γ)

Berat jenis atau specific gravity (γ) suatu zat adalah berat zat per satuan volume atau massa jenis (ρ) dikalikan percepatan gravitasi (g). $\gamma = \rho.g = \frac{W}{v}$ .....(2.3)

dengan :

γ = berat jenis (N/m^3)
ρ = kerapatan (kg/m^3)
g = percepatan gravitasi (m/s^2)
W = berat (N)
v = volume (m^3)

2.2.3.3. Volume Jenis (*v*)

Volume spesifik (v) suatu zat adalah volume yang ditempati oleh satu satuan massa zat, atau kebalikan dari kerapatan .

$V = \frac{V}{m}$ ..... (2.4)

atau

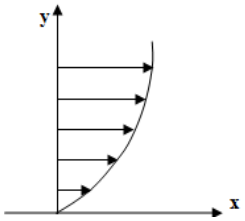
$v = \frac{1}{\rho}$ ..... (2.5)

dengan :

v = volume jenis (m3/kg)
ρ = kerapatan (kg/m3)
V = volume (m3)
m = massa (kg)

2.2.3.4. Viskositas

Viskositas dinamis atau viskositas absolut (μ) adalah ukuran ketahanan fluida terhadap perubahan bentuk di bawah tegangan geser atau deformasi sudut. Viskositas disebabkan oleh gaya kohesif dan perubahan momentum molekul cairan



Gambar 2.3. Profil Kecepatan dan Gradien Kecepatan

Tegangan geser yang timbul

$\tau = \mu \frac{du}{dy}$ atau $\mu = \frac{\tau}{du/dy}$ ..... (2.6)

τ = tegangan geser (N/m^2)
μ = viskositas dinamis (N$_s$/m^2)
du/dy = gradien kecepatan setiap harga y

Perubahan tekanan dan temperatur dapat mempengaruhi tingkat viskositas. Dalam perhitungan praktis, perubahan viskositas akibat perubahan tekanan dapat diabaikan karena sangat kecil. Efek terbesar berasal dari perubahan suhu. Viskositas cairan sangat dipengaruhi oleh gaya kohesif antar molekul. Ketika suhu meningkat, gaya kohesif menurun, sehingga viskositas menurun. Jadi, meningkatkan suhu cairan menurunkan viskositasnya. Viskositas gas sangat dipengaruhi oleh momentum antar molekul. Dengan meningkatnya suhu, momentum antar molekul meningkat. Jadi, meningkatkan suhu gas meningkatkan viskositasnya.

Viskositas kinematik (υ) adalah rasio (rasio) viskositas dinamis terhadap kerapatan .

$v = \frac{\mu}{\rho}$ ..... (2.7)

dengan :

υ = viskositas kinematis (m^2/s)
μ = viskositas dinamis (Ns/m^2)
ρ = kerapatan (kg/m^3)

2.2.3.5. Tekanan (p)

Tekanan fluida memancar ke segala arah dengan gaya yang sama dan bekerja tegak lurus terhadap bidang. Pada bidang yang sama, gaya tekan pada zat cair adalah sama, tekanan dinyatakan sebagai gaya dibagi luas. Pada kondisi dimana gaya (F) tersebar merata pada luasan (A), maka:

$p = \frac{F}{A}$ ..... (2.8)

dengan :

P = teka nan fluida (Pa atau N/m^2)
F = gaya (N)
A = luas (m^2)

Perbedaan tekanan pada dua titik, pada ketinggian yang berbeda dalam suatu fluida adalah :

$p_2 – p_1 = \rho g(h_2 – h_2)$ .....(2.9)

dengan :

ρg = satuan berat cairan (N/m^3)

h1 dan h2 = perbedaan ketinggian (m)

Untuk mengetahui perbedaan tekanan antara dua titik menggunakan manometer diferensial.

2.2.2. Jenis-jenis Aliran

2.2.4.1. Aliran laminer dan turbulen

Dalam aliran laminar, partikel cairan bergerak berlapis-lapis dalam lintasan yang seragam, dengan satu lapisan cairan bergerak merata di atas lapisan lainnya. Dalam kasus aliran laminar, pengaruh viskositas melemahkan kecenderungan turbulensi. Aliran turbulen adalah hal yang paling umum kita jumpai di bidang teknik. Dalam arus turbulen, partikel fluida bergerak tidak menentu, mengubah momentum dari satu bagian fluida ke bagian lainnya. Tegangan geser yang dihasilkan pada aliran turbulen relatif lebih tinggi daripada aliran laminar, sehingga kerugiannya juga lebih tinggi. Aliran termasuk dalam aliran laminar atau turbulen tergantung pada bilangan Reynoldsnya.

$Re = \rho Vd/\mu = Vd/v$

dengan :

V = kecepatan rata-rata (m/s)

d = diameter dalam pipa (m)

υ = viskositas kinematik (m^2/s)

μ = viskositas dinamis (Ns/m^2)

ρ = kerapatan (kg/m^3)

Bilangan Reynold (Re) < 2000 : aliran laminer

Re = 2000 d/s 4000 : transisi, cenderung berubah menjadi turbulen.

Re > 4000 : aliran turbulen penuh

2.2.4.2. Aliran mantap (*steady flow*) *dan aliran tak mantap* (*unsteady flow*)

Steady flow adalah ketika jumlah cairan yang mengalir per satuan waktu adalah konstan. *Unsteady flow* terjadi ketika jumlah fluida yang mengalir per satuan waktu tidak konstan atau berubah .

2.2.4.3. Aliran fluida ideal dan riil

Fluida ideal adalah fluida tanpa gesekan (*frictionless*), sehingga proses alirannya tidak rugi (*lossless*). Asumsi bahwa fluida merupakan fluida ideal seharusnya membantu dalam analisis kondisi aliran. Meskipun fluida sejati adalah fluida dengan gesekan, alirannya mengalami kerugian.

2.2.3. Persamaan Kontinuitas

Dengan aliran seragam/mantap, massa fluida yang mengalir melalui semua bagian aliran fluida per satuan waktu adalah sama. persamaan adalah :

ρ1A1V1=ρ2A2V2 .....(2.12)

Untuk fluida inkompresibel dan bila ρ1 = ρ2 maka persamaan tersebut menjadi :

A1V1=A2V2atauQ1=Q2 .....(2.13)

dengan :

A1 = luas penampang bagian satu (m^2)

A2 = luas penampang bagian dua (m^2)

V1 = kecepatan rata-rata penampang bagian satu (m/s)

V2 = kecepatan rata-rata penampang bagian dua (m/s)

Q = laju aliran volume (m^3/s)

2.2.4. Persamaan Bernoulli

Persamaan ini adalah salah satu yang tertua dalam mekanika fluida, dan banyak asumsi yang digunakan untuk menurunkannya, tetapi dapat efektif dalam analisis fluida. Persamaannya adalah sebagai berikut :

P + 1/2 ρV^2+ γz = konstan .....(2.14)

atau

p/(p) + V^2/2 + gz = konstan.....(2.15)

atau

p/γ + V^2/2g + z = konstan.....(2.16)

dengan :

V = kecepatan rata-rata (m/s)

p = tekanan (N/m^2)

ρ = kerapatan (kg/m^2)

z = ketinggian (m)

γ = berat jenis (N/m^3)

g = percepatan gravitasi bumi (m/s2)

Persamaan Bernoulli untuk dua titik :

p1 + 1/(2) ρV_1^2 + γz1 = p2 + 1/2 ρV_2^2 + γz2 .. (2.17)

atau

p1/γ + (V_1^2)/2g + z1 = p_2/(γ) + (V_2^2)/2g + z2

.....(2.18)

dengan :

V1 = kecepatan rata-rata di titik satu (m/s)

V2 = kecepatan rata-rata di titik dua (m/s)

p1 = tekanan di titik satu (N/m^2)

p2 = tekanan di titik dua (N/m^2)

ρ = kerapatan (kg/m^3)

γ = berat jenis (N/m^3)

z1 = elevasi di titik satu (m)

z2 = elevasi di titik dua (m)

Untuk menggunakan persamaan Bernoulli, harus diperhatikan asumsi (1) fluida ideal, (2) aliran adalah aliran tunak/*uniform*, (3) aliran mampat. Persamaan Bernoulli hanya dapat diterapkan sepanjang garis-arus. Jika aliran horizontal (z1 = z2), persamaan Bernoulli menjadi :

p1 + 1/2 ρV_1^2 = p2 + 1/2 ρV_2^2 .....(2.19)

dengan :

V1 = kecepatan rata-rata di titik satu (m/s)

V2 = kecepatan rata-rata di titik dua (m/s)

p1 = tekanan di titik satu (N/m^2)

p2 = tekanan di titik dua (N/m^2)

ρ = kerapatan (kg/m^3)

Pengaruh aliran non-horizontal mudah dijelaskan dengan memasukkan perubahan ketinggian (z1-z2) ke dalam persamaan. Kombinasi persamaan kontinuitas (2.14) dengan persamaan Bernoulli (2.20) menghasilkan persamaan aliran teoritis:

Q = A2 √((2 (p_1-p_2))/(ρ [1-(A_2⁄A_1)^2])) ..... (2.20)

dengan:

Q = laju aliran (m^3/s)

A1 = luas penampang bagian satu (m^2)

A2 = luas penampang bagian dua (m^2)

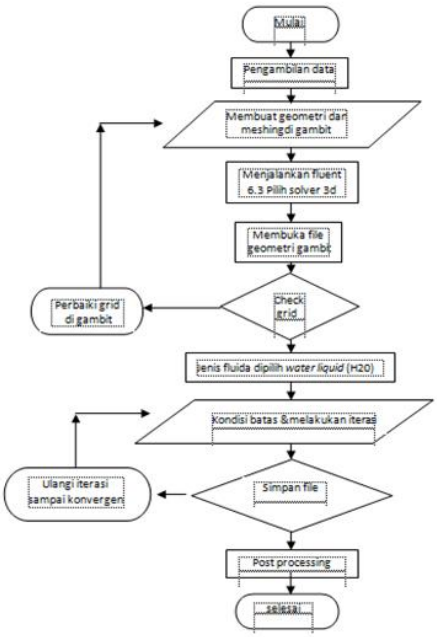
p1-p2= Δp = perbedaan tekanan

ρ = kerapatan (kg/m^3)

Catatan: A2 < A1

Hasil laju aliran teoritis tersebut akan lebih besar daripada laju aliran terukur aktual karena perbedaan antara "dunia nyata" dan asumsi yang digunakan dalam menurunkan/menggunakan persamaan Bernoulli. Perbedaan ini bisa 1-40%.

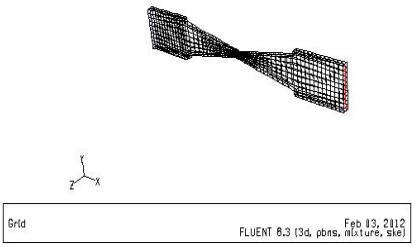
3. Metode Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.1 Pemodelan CFD Menggunakan Software Fluent 6.3

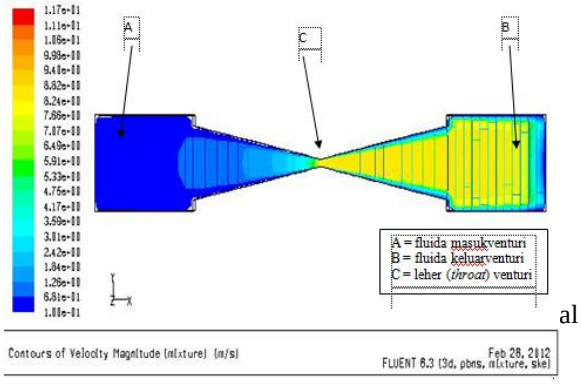
Dari pemodelan yang dilakukan akan menghasilkan data kualitatif, diperoleh dengan pemodelan CFD menggunakan *software* Fluent 6.3 untuk mendapatkan visualisasi pola aliran yang melewati venturi. Dengan pressure yang dihasilkan dari susunan pompa tunggal 5 psi, ganda seri 6 psi dan ganda paralel 11 psi



Gambar 3.2 Panel *Grid Display*

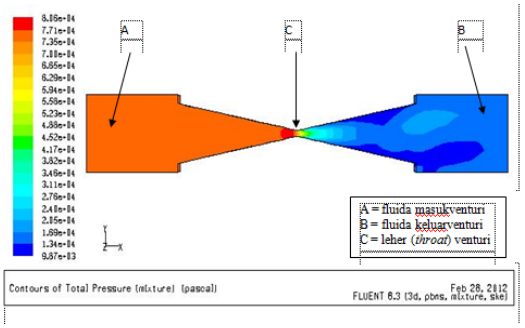
3.2 Hasil Pemodelan

1.2.1 Pemodelan Kontur Tekanan



al

Gambar 3.4 Kontur Tekanan Pompa Kerja Ganda Seri



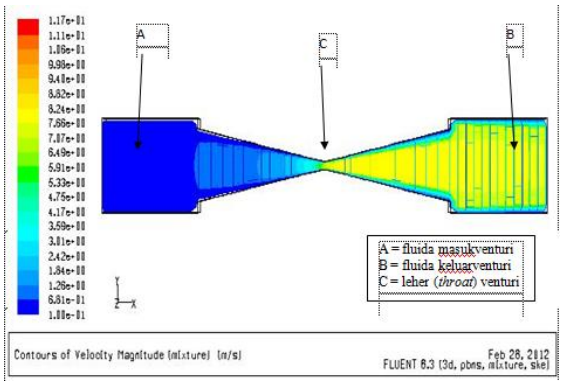
Gambar 3.5 Kontur Tekanan Pompa Kerja Ganda Paralel

Dari gambar 3.3 sampai dengan gambar 3.5 dapat dilihat kontur tekanan aliran fluida yang melewati venturi, dimana tekanan fluida tertinggi merata berada pada sisi masuk venturi (titik A), kemudian setelah fluida tersebut mengalir ke leher venturi (titik C) tekanan bertambah besar dan kemudian turun sampai pada sisi keluar (titik B) dengan tekanan rendah dan tidak merata.

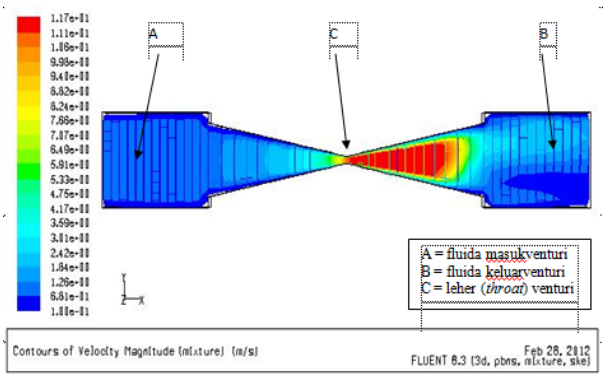
Dari gambar 3.3 sampai dengan gambar 3.5 dapat dilihat bahwa tekanan pompa kerja tunggal dan pompa kerja ganda seri relatif sama tetapi pada pompa kerja ganda seri pada sisi keluar tekananya lebih setabil, Untuk pompa kerja ganda paralel pada sisi masuk relatif sama tetapi pada sisi keluar tekanan fluidanya tidak stabil dikarenakan terjadi turbulensi.

Dari gambar 3.3 sampai dengan gambar 3.5 dapat dilihat bahwa pada sisi leher (*throat*) venturi terjadi penurunan tekanan yang siknifikan sehingga hal ini yang menyebabkan kavitasi pada venturi.

1.2.2 Pemodelan Kontur Kecepatan



Gambar 3.6 Kontur Kecepatan Pompa kerja Tunggal

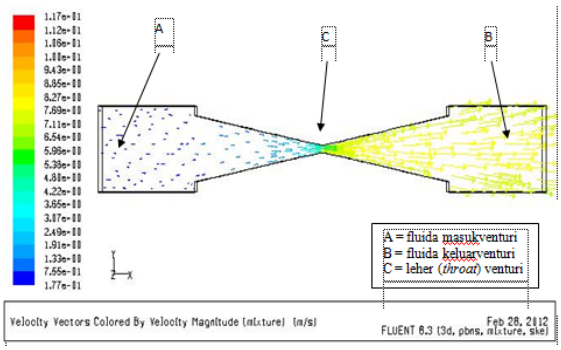


Gambar 3.7 Kontur Kecepatan Pompa Kerja Ganda Seri

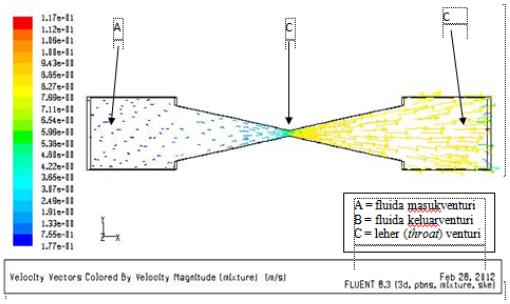
Dari gambar 3.6 sampai dengan gambar 3.7 dapat dilihat kontur kecepatan aliran fluida yang melewati venturi, dimana kecepatan fluida terendah berada pada sisi masuk (titik A) terutamam pada dinding venturi bagian atas dan bawah, kemudian kecepatan aliran fluida semakin menjahui sisi masuk (ke arah sisi luar venturi) kecepatan aliran fluida bertambah tinggi. Dan kecepatan paling tinggi berada pada sisi tengah venturi.

Dari gambar 3.6 sampai dengan gambar 3.8 dapat disimpulkan bahwa pompa kerja ganda kecepatanaliran fluidanya setabil saat keluar dari leher venturi, pompa kerja ganda seri relatif stabil saat fluida meninggalkan leher venturi tetapi untuk pompa kerja ganda paralel kecepatan flidanya saat meninggalkan leher venturi terjadi perubahan kecepatan yang signifikan dan tidak merata.

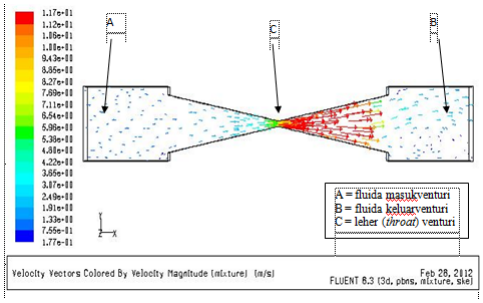
1.2.3 Pemodelan Vektor Kecepatan



Gambar 4.9 Vektor Kecepatan Pompa Kerja Tunggal



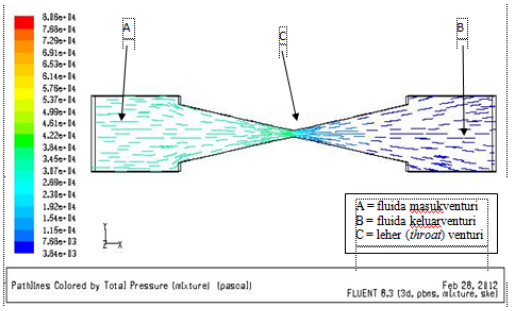
Gambar 4.10 Vektor Kecepatan Pompa Kerja Ganda seri



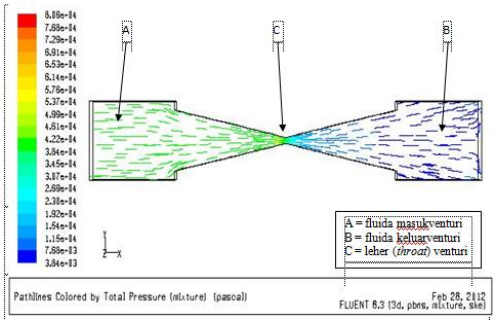
Gambar 3.11 Vektor Kecepatan Pompa Kerja Ganda Paralel

Dari gambar 3.9 sampai dengan gambar 3.11 dapat dilihat vektor kecepatan aliran fluida yang melewati venturi. Dimana fluida dari jalur masuk (*inlet*) masuk kedalam leher venturi, kemudian fluida keluar dari leher venturi dan menyebar ke seluruh ruang pada sisi keluar venturi.Dari gambar 3.9 sampai dengan gambar 3.11 pada pompa kerja tunggal dan pompa kerja ganda seri vektor kecepatan relatif sama tetapi pada pompa kerja ganda paralel pada sisi keluar (B) terjadi perputaran arah kecepatan sehingga aliran menjadi turbulen.

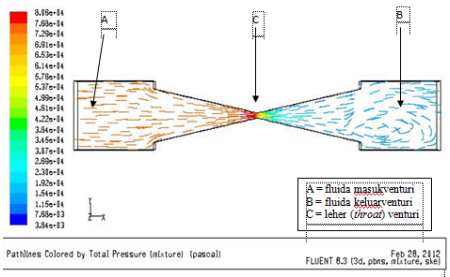
1.2.4 Pemodelan Garis Lintasan Tekanan



Gambar 3.12 *Pathlines Pressure* pada Pompa Kerja Tunggal



Gambar 3.13 *Pathlines Pressure* pada Pompa Kerja Ganda

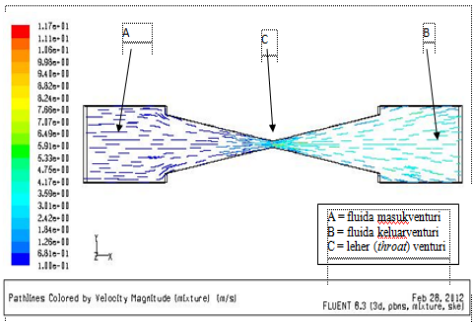


Gambar 3.14 *Pathlines Pressure* pada Pompa Kerja Ganda Paralel

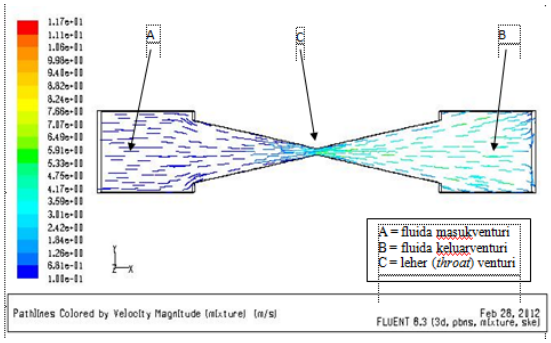
Dari gambar 3.12 sampai dengan gambar 3.14 dapat dilihat garis-garis lintasan tekanan aliran fluida yang melewati venturi, dimana tekanan fluida tertinggi berada pada jalur masuk venturi (titik A), dan mencapai puncaknya saat menuju leher veturi kemudian setelah fluida tersebut meninggalkan leher venturi dan bergerak kearah jalur keluar venturi (titik B) tekanan fluida semakin menjadi turun.

Dari gambar 3.12 sampai dengan gambar 3.14 dapat dilihat bahwa tekanan fluida yang melewati venturi dari jalur masuk dari rendah semakin tinggi, pada leher venturi terjadi penurunan tekanan yang signifikan yang bisa menyebabkan kavitasi pada dinding venturi. Pada pompa kerja tunggal dan pompa kerja ganda seri garis tekanan relatif sama tetapi pada pompa kerja ganda paralel terjadi perputaran arah garis tekanan.

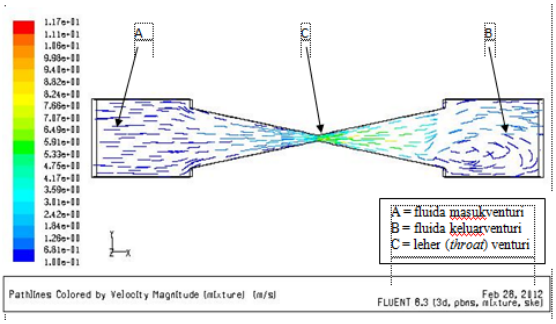
1.2.5 Pemodelan Garis Lintasan Kecepatan



Gambar 3.15 *Pathlines Velocity* pada Pompa Kerja Tunggal



Gambar 3.16 *Pathlines Velocity* pada Pompa Kerja Ganda Seri



Gambar 3.17 *Pathlines Velocity* pada Pompa Ganda Paralel

Dari gambar 3.15 sampai dengan gambar 3.17 dapat dilihat garis-garis lintasan kecepatan aliran fluida yang melewati venturi, dimana kecepatan fluida tertinggi berada pada jalur keluar venturi (titik A), dan mencapai puncaknya saat menuju leher veturi kemudian setelah fluida tersebut meninggalkan leher venturi dan bergerak kearah jalur keluar venturi (titik B) tekanan fluida semakin menjadi turun.

4. Kesimpulan

Hasil simulasi terhadap kinerja pompa kerja tunggal, ganda seri dan ganda paralel adalah sebagai berikut :

1. Kontur tekanan paling besar pada area masuk dan tekanan turun pada leher venturi sehingga pada daerah ini menyebabkan terjadinya gelembung – gelembung udara yang bisa menyebabkan kavitasi pada dinding pipa.
2. Kontur kecepatan pada sisi masuk lebih rendah dari tengah venturi ini disebabkan diameter pipa tengah lebih kecil bahkan pada pompa ganda paralel kecepatannya piling tinggi.
3. Kecepatan aliran terbesar pada pompa ganda paralel yang mana terjadi aliran turbulen saat keluar dari diameter kecil pada pipa venturi tampak pada garis-garis lintasan aliran fluida yang melewati jalur keluar bentuknya menjadi tidak teratur.

Daftar Pustaka

Avelan, (2005), Penelitian Kavitasi Pada Pipa Saat Pemompaan. www.Google.co.id. Diakses pada tanggal 10 Desember 2011

Brookmeyer, (2007), Penelitian Pengaruh Tekanan Terhadap Kavitasi Dalam Venturi. www.Google.co.id. Diakses pada tanggal 10 Desember 2011

Firman. Tuakia, Dasar – Dasar CFD Menggunakan Fluent, Bandung, INFORMATIKA, 2008

Karassik, Igor J., dkk, 1976, Pump Handbook, McGraw-Hill, Inc, United States of America

Victor L. Streeter. E.Benjamin Wylie, Mekanika Fluida, Jakarta, Erlangga, 1999

Sudarja, Mekanika Fluida Dasar, Bahan Kuliah, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta: UMY.