

**ANALISIS NUMERICAL ALIRAN FLUIDA PADA RUMAH WATER
VORTEX TURBINE DENGAN WATER DEPTH 200 MM DAN
INLET VELOCITY 0.20 M/S MENGGUNAKAN APLIKASI
ANSYS FLUENT VERSI 16.2**

SKRIPSI



Oleh

ANDRI MAULANA HARAHAP

NIM. 1201961

**PROGRAM STUDI PENDIDIKAN TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI PADANG
2017**

HALAMAN PERSETUJUAN SKRIPSI

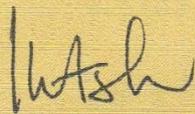
**ANALISIS NUMERICAL ALIRAN FLUIDA PADA RUMAH WATER
VORTEX TURBINE DENGAN WATER DEPTH 200 MM DAN INLET
VELOCITY 0.20 M/S MENGGUNAKAN APLIKASI ANSYS FLUENT
VERSI 16.2**

Nama : Andri Maulana Harahap
NIM/ TM : 1201961/ 2012
Program Studi : Pendidikan Teknik Mesin
Jurusan : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik

Padang, Juli 2017

Disetujui oleh :

Pembimbing I



Dr. Waskito, M.T.
NIP. 19610808 198602 1 001

Pembimbing II



Dr. Ir. Arwizet K, S.T., M.T.
NIP. 19690920 199802 1 001

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Mesin FT-UNP



Dr. Ir. Arwizet K, S.T., M.T.
NIP. 19690920 199802 1 001

HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI

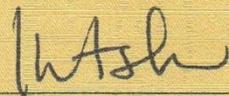
Dinyatakan Lulus Setelah Mempertahankan Skripsi Didepan Tim Penguji
Program Studi Pendidikan Teknik Mesin
Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik
Universitas Negeri Padang

Judul : Analisis Numerical Aliran Fluida pada Rumah Water Vortex Turbine dengan Water Depth 200 mm dan Inlet Velocity 0.20 m/s Menggunakan Aplikasi Ansys Fluent versi 16.2
Nama : Andri Maulana Harahap
NIM/ TM : 1201961/2012
Program Studi : Pendidikan Teknik Mesin
Jurusan : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik

Padang, Juli 2017

Tim Penguji

1. Ketua : Dr. Waskito, M.T.

1. 

2. Sekretaris : Dr. Ir. Arwizet K, S.T., M.T.

2. 

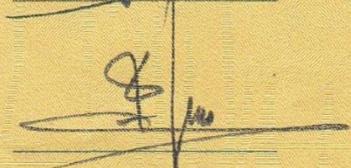
3. Anggota : Dr. Ambiyar, M.Pd.

3. 

4. Anggota : Drs. Hasanuddin, M.S.

4. 

5. Anggota : Drs. Jasman, M.Kes.

5. 

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi ini benar-benar karya saya sendiri. Sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali sebagai acuan atau kutipan dengan mengikuti tata penulisan karya ilmiah yang lazim.

Padang, Juli 2017

Yang menyatakan,



Andri Maulana Harahap

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil 'alamin, puji syukur penulis ucapkan atas kehadiran *Allah Subhanauwata'ala* karena atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul “**Analisis Numerical Aliran Fluida pada Rumah Water Vortex Turbine dengan Water Depth 200 mm dan Inlet Velocity 0.20 m/s Menggunakan Aplikasi Ansys Fluent Versi 16.2**”. Salawat dan salam penulis ucapkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad *Salallahu 'alaihi wassalam* yang dengan seluruh jiwa dan raganya membawa umat manusia dari kehidupan jahiliyah menuju alam yang penuh dengan cahaya ilmu pengetahuan.

Penulisan skripsi ini merupakan syarat untuk menyelesaikan program studi S1 Pendidikan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang. Dalam penulisan skripsi ini, penulis banyak mendapat bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Atas semua bantuan dan bimbingan tersebut, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua penulis dan seluruh keluarga yang telah memberi semangat dan dorongan baik berupa materil maupun spritual.
2. Bapak Dr. Waskito, M.T. selaku Dosen pembimbing I.
3. Bapak Dr. Ir. Arwizet K, S.T., M.T. selaku Dosen pembimbing II sekaligus Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang.
4. Bapak Dr. Ambiyar, M.Pd. selaku Dosen penguji I.
5. Bapak Drs. Hasanuddin, M.S. selaku Dosen penguji II.
6. Bapak Drs. Jasman, M.Kes. selaku Dosen penguji III.

7. Bapak / Ibu Staf Pengajar dan Administrasi Kepegawaian Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang.
8. Rekan-rekan mahasiswa seperjuangan Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang.
9. Rekan-rekan dari Komunitas Naburju.
10. Semua pihak yang telah memberi petunjuk, memberi saran dan dukungan moral serta motivasi kepada penulis yang tidak dapat penulis sebutkan namanya satu per satu.

Semoga *Allah Subhanauwata 'ala* membalas semua jasa baik tersebut dan menjadi catatan kemuliaan di sisi-Nya, *Amin*.

Akhirnya penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini terdapat banyak kekurangan. Penulis berharap adanya masukan dan saran sehingga skripsi ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam rangka pengembangan teknologi. Semoga *Allah Subhanauwata 'ala* memberkati dan meridhoi kita semua, *Amin Ya Rabbal 'Alamin*.

Padang, 19 Juli 2017

Penulis,

Andri Maulana Harahap

**ANALISIS NUMERICAL ALIRAN FLUIDA PADA RUMAH WATER
VORTEX TURBINE DENGAN WATER DEPTH 200 MM DAN
INLET VELOCITY 0.20 M/S MENGGUNAKAN APLIKASI
ANSYS FLUENT VERSI 16.2**

Abstrak

Rumah Water Vortex Turbine dengan water depth 200 mm menghasilkan outlet velocity yang paling efisien, dimana dengan inlet velocity 0.20 m/s dapat dihasilkan experimental outlet velocity 1.56 m/s pada hasil penelitian O. B. Yakoob, dkk. tetapi nilai difference hasil analisis numerical dengan hasil eksperimental masih tinggi yaitu 7 %. Maka penulis ingin melakukan analisis numerical aliran fluida pada Rumah Water Vortex Turbine dengan water depth 200 mm dan inlet velocity 0.20 m/s menggunakan aplikasi Ansys Fluent versi 16.2. Penelitian ini bertujuan untuk mengurangi nilai difference 7 % pada penelitian O. B. Yakoob, dkk. Flow Time yang digunakan Steady State, Multiphase Model yang digunakan Volume of Fluid (VOF) dan Viscous Model yang digunakan k-epsilon RNG. Analisis numerical dilakukan sebanyak 6 kali yaitu RNG k-e.1, RNG k-e.02, RNG k-e.03, RNG k-e.04, RNG k-e.05 dan RNG k-e.06, dengan tujuan untuk mendapatkan outlet velocity yang paling maksimal dengan penggunaan spatial discretization yang berbeda, penggunaan nilai U-RF yang berbeda dan penggunaan solution initialization yang berbeda. Hasil penelitian yang diperoleh penulis menunjukkan bahwa nilai difference 7 % dapat dikurangi menjadi 2.6 %, dimana experimental outlet velocity hasil penelitian O. B. Yakoob, dkk. adalah 1.56 m/s dan fluent outlet velocity hasil analisis numerical penulis adalah 1.52 m/s.

Kata Kunci: Water Depth 200 mm, Volume of Fluid, Modified HRIC, U-RF, Hybrid Initialization

**NUMERICAL ANALYSIS OF FLUID FLOW IN CASING OF WATER
VORTEX TURBINE WITH WATER DEPTH 200 MM AND INLET
VELOCITY 0.20 M/S USING ANSYS FLUENT VERSION 16.2**

Abstract

Casing of Water Vortex Turbine with water depth 200 mm produce most efficient outlet velocity, which with inlet velocity 0.20 m/s can be produced experimental outlet velocity 1.56 m/s in research results O. B. Yakoob, et al. but the value of difference numerical analysis results with experimental results still high at 7%. So the author want to do numerical analysis of fluid flow on Casing of Water Vortex Turbine with water depth 200 mm and inlet velocity 0.20 m/s using Ansys Fluent version 16.2. This study aims to reduce the value of difference 7% in research O. B. Yakoob, et al. Flow Time used Steady State, Multiphase Model used Volume of Fluid (VOF) and Viscous Model used k-epsilon RNG. Numerical analysis performed six times i.e. RNG k-e.01, RNG k-e.02, RNG k-e.03, RNG k-e.04, RNG k-e.05 and RNG k-e.06, in order to obtain the maximum outlet velocity with use different spatial discretization, use different U-RF values and use different solution initialization. The results obtained by author show that the value of difference 7% can be reduced to 2.6%, which experimental outlet velocity in research results O. B. Yakoob, et al. 1.56 m/s and fluent outlet velocity in writer's research 1.52 m/s.

Keyword: *Water Depth 200 mm, Difference, Modified HRIC, U-RF, Hybrid Initialization*

DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN JUDUL SKRIPSI	
HALAMAN PERSETUJUAN SKRIPSI	
HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI	
KATA PENGANTAR	i
ABSTRAK	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Identifikasi Masalah	3
C. Batasan Masalah	3
D. Rumusan Masalah	4
E. Tujuan Penelitian	5
F. Manfaat Penelitian	5
BAB II KAJIAN PUSTAKA	7
A. Turbin Air	7
1. Klasifikasi Turbin Air	8
a. Turbin Impuls	9
b. Turbin Reaksi	9
2. Perbandingan Karakteristik Turbin Air	10
B. Fluida	13
1. Beberapa Istilah Dalam Mekanika Fluida	13
2. Klasifikasi Aliran Fluida	14
3. Aliran Laminar dan Turbulen	15
4. Aliran <i>Vortex</i>	19
a. <i>Forced Vortex</i>	20
b. <i>Free Vortex</i>	21
c. <i>Compound Vortex</i>	22
C. <i>Water Vortex Turbine</i>	22
1. Prinsip Kerja <i>Water Vortex Turbine</i>	24
2. Keunggulan <i>Water Vortex Turbine</i>	25
D. Perhitungan Dinamika Fluida	26
1. Hukum Konservasi Massa	26
2. Hukum Konservasi Momentum	27

3.	Hukum Konservasi Energi	27
E.	<i>Computational Fluid Dynamic</i> (CFD)	28
1.	Manfaat <i>Computational Fluid Dynamic</i> (CFD)	30
2.	Proses Analisis <i>Numerical CFD</i>	31
3.	Metode Diskritisasi CFD	32
F.	Metode CFD Menggunakan Perangkat Lunak Ansys Fluent	33
1.	Ansys Fluent	33
2.	Skema Numerik	34
a.	Metode Solusi <i>Segregated</i>	35
b.	Metode Solusi <i>Coupled</i>	36
3.	Diskritisasi (<i>Discretization</i>)	37
a.	<i>First-Order Upwind</i>	37
b.	<i>Second-Order Upwind</i>	38
4.	Metode <i>Volume of Fluid</i> (VOF)	38
5.	Model Turbulen (<i>Turbulence Modelling</i>)	40
a.	Model k-epsilon ($k-\epsilon$)	40
b.	Model k-omega ($k-\omega$)	43
c.	Model Reynold Stress (RSM)	44
	BAB III METODE PENELITIAN	46
A.	Jenis Penelitian	46
B.	Waktu dan Tempat Penelitian	47
C.	Objek Penelitian	47
D.	Jenis dan Sumber Data	48
E.	Alat dan Bahan	49
F.	Metode Pelaksanaan	50
1.	Persiapan Bahan	50
2.	Proses Analisis <i>Numerical</i> Aliran Fluida	52
a.	Proses <i>Pre-Processing</i>	52
b.	Menentukan <i>Solution Solver</i>	55
c.	<i>Post-Processing</i>	65
G.	Tabulasi Penyajian Data Hasil Analisis <i>Numerical</i>	67
H.	Prosedur Penelitian	68
I.	Teknik Analisa Data	69
	BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	71
A.	Hasil Analisis <i>Numerical</i> RNG k-e.01	71
1.	<i>Velocity Streamline</i>	71
2.	<i>Velocity Vector</i>	71
3.	<i>Iso-Surface phase-2</i> dengan nilai <i>volume fraction</i> 0.5	72
4.	<i>Average of velocity on outlet</i>	72
B.	Hasil Analisis <i>Numerical</i> RNG k-e.02	73

1.	<i>Velocity Streamline</i>	73
2.	<i>Velocity Vector</i>	73
3.	<i>Iso-Surface phase-2</i> dengan nilai <i>volume fraction 0.5</i>	74
4.	<i>Average of velocity on outlet</i>	74
C.	Hasil Analisis Numerical RNG k-e.03	75
1.	<i>Velocity Streamline</i>	75
2.	<i>Velocity Vector</i>	75
3.	<i>Iso-Surface phase-2</i> dengan nilai <i>volume fraction 0.5</i>	76
4.	<i>Average of velocity on outlet</i>	76
D.	Hasil Analisis Numerical RNG k-e.04	77
1.	<i>Velocity Streamline</i>	77
2.	<i>Velocity Vector</i>	77
3.	<i>Iso-Surface phase-2</i> dengan nilai <i>volume fraction 0.5</i>	78
4.	<i>Average of velocity on outlet</i>	78
E.	Hasil Analisis Numerical RNG k-e.05	79
1.	<i>Velocity Streamline</i>	79
2.	<i>Velocity Vector</i>	79
3.	<i>Iso-Surface phase-2</i> dengan nilai <i>volume fraction 0.5</i>	80
4.	<i>Average of velocity on outlet</i>	80
F.	Hasil Analisis Numerical RNG k-e.06	81
1.	<i>Velocity Streamline</i>	81
2.	<i>Velocity Vector</i>	81
3.	<i>Iso-Surface phase-2</i> dengan nilai <i>volume fraction 0.5</i>	82
4.	<i>Average of velocity on outlet</i>	82
G.	Tabulasi Penyajian Data Hasil Analisis Numerical RNG k-e.01, RNG k-e.02, RNG k-e.03, RNG k-e.04, RNG k-e.05 dan RNG k-e.06	83
H.	Menghitung $Difference_{FF}$	83
1.	RNG k-e.01	83
2.	RNG k-e.02	83
3.	RNG k-e.03	83
4.	RNG k-e.04	83
5.	RNG k-e.05	83
6.	RNG k-e.06	83
I.	Menghitung $Difference_{EF}$	84
1.	RNG k-e.01	84
2.	RNG k-e.02	84
3.	RNG k-e.03	84
4.	RNG k-e.04	84
5.	RNG k-e.05	85
6.	RNG k-e.06	85

BAB V PENUTUP	86
A. Kesimpulan	86
B. Saran	87
DAFTAR PUSTAKA	89
LAMPIRAN	90

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. <i>Outlet Velocity</i> Hasil Analisis <i>Numerical</i> Ansys Fluent dan Eksperimental pada penelitian O. B. Yakoob, dkk.	2
2. Pengelompokkan Turbin	8
3. Kecepatan Spesifik Turbin Air	10
4. <i>Outlet Velocity</i> Hasil Analisis <i>Numerical</i> Ansys Fluent dan Eksperimental pada penelitian O. B. Yakoob, dkk.	47
5. Penentuan <i>Spatial Discretization</i> pada RNG k-e.01, RNG k-e.02, RNG k-e.03, RNG k-e.04, RNG k-e.05 dan RNG k-e.06	59
6. Penentuan <i>Under-Relaxation Factors</i> pada RNG k-e.01, RNG k-e.02, RNG k-e.03, RNG k-e.04, RNG k-e.05 dan RNG k-e.06	60
7. Penentuan <i>Standard</i> dan <i>Hybrid Initialization</i> yang digunakan dalam penelitian	62
8. <i>Outlet Velocity</i> hasil analisis <i>numerical</i> yang telah dilakukan oleh penulis	68
9. <i>Difference</i> antara <i>Fluent Outlet Velocity</i> hasil penelitian O. B. Yakoob, dkk. dengan <i>Fluent Outlet Velocity</i> hasil penelitian penulis	70
10. <i>Difference</i> antara <i>Experimental Outlet Velocity</i> hasil penelitian O. B. Yakoob, dkk. dengan <i>Fluent Outlet Velocity</i> hasil penelitian penulis	70
11. <i>Outlet Velocity</i> hasil analisis <i>numerical</i> yang telah dilakukan oleh penulis	83
12. <i>Difference</i> antara <i>Fluent Outlet Velocity</i> hasil penelitian O. B. Yakoob, dkk. dengan <i>Fluent Outlet Velocity</i> hasil penelitian penulis	84
13. <i>Difference</i> antara <i>Experimental Outlet Velocity</i> hasil penelitian O. B. Yakoob, dkk. dengan <i>Fluent Outlet Velocity</i> hasil penelitian penulis	85

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Skema Turbin Pancar (Turbin Pelton), jalannya tekanan di dalam pipa dan di dalam roda jalan	9
2. Perbandingan Karakteristik Turbin Air	11
3. Karakteristik <i>Water Vortex Turbine</i>	12
4. Aliran turbulen tunak dan tak-tunak	18
5. Aliran laminar tunak dan tak-tunak	18
6. Aliran lapisan batas di pelat datar	18
7. Aliran <i>vortex</i>	20
8. Teh di cangkir yang di aduk adalah aplikasi <i>forced vortex</i>	21
9. Rotational (<i>rigid-body</i>) <i>vortex</i>	21
10. <i>Irrrotational vortex</i>	22
11. Aliran <i>vortex</i> pada Rumah <i>Water Vortex Turbine</i>	23
12. Pengaplikasian pertama <i>Water Vortex Turbine Zotloeterer</i>	23
13. <i>Water Vortex Turbine</i>	25
14. Pengembangan <i>Water Vortex Turbine</i> di aliran sungai	26
15. Pengaplikasian <i>Water Vortex Turbine</i> di beberapa negara	26
16. Perbandingan hasil percobaan dengan hasil CFD	29
17. Gambar 2D dan 3D Rumah <i>Water Vortex Turbine</i> dengan <i>water depth</i> 200 mm	48
18. Solid1, Solid2 dan koordinat gambar 3D Rumah <i>Water Vortex Turbine</i> dengan <i>water depth</i> 200 mm	51
19. Ekspor jenis <i>file</i> gambar	51
20. Ubah jenis <i>file</i> gambar menjadi STEP	52
21. Aplikasi Design Modeler Ansys versi 16.2 mengimpor gambar 3D Rumah <i>Water Vortex Turbine</i> berfile STEP	53
22. Penentuan domain pada gambar 3D Rumah <i>Water Vortex Turbine</i> dengan <i>water depth</i> 200 mm	53
23. Spesifikasi <i>mesh</i> dan hasil <i>mesh</i> yang dilakukan penulis pada model 3D Rumah <i>Water Vortex Turbine</i> dengan <i>water depth</i> 200 mm	55
24. Menentukan <i>Setup General</i>	56
25. Menentukan <i>Setup Models</i>	57
26. Menentukan <i>Setup Materials</i>	57
27. Menentukan <i>Phases Multiphase Volume of Fluid</i>	58
28. Menentukan <i>Setup Boundary Conditions</i>	59
29. Menentukan <i>Solution Methods</i>	60
30. Menentukan <i>Solution Controls</i>	61

31. Menentukan <i>Solution Monitors</i>	61
32. Menentukan <i>Solution Initialization</i>	63
33. Menentukan <i>Region Adaption</i>	63
34. Menentukan <i>Patch</i>	64
35. Menentukan <i>Solution Calculation Activities</i>	64
36. Menentukan <i>Solution Run Calculation</i>	65
37. Menampilkan <i>output velocity</i> pada Rumah <i>Water Vortex Turbine</i> dengan bantuan <i>function calculator</i> pada aplikasi CFD-Post Ansys versi 16.2	66
38. Diagram alir proses analisis <i>numerical</i> yang dilakukan oleh penulis menggunakan aplikasi Ansys Fluent versi 16.2	67
39. Diagram alir proses penelitian yang dilakukan oleh penulis	68
40. <i>Velocity Streamline</i> RNG k-e.01	71
41. <i>Velocity Vector</i> RNG k-e.01	71
42. <i>Iso-Surface phase-2 volume fraction</i> RNG k-e.01	72
43. <i>Average of velocity on outlet</i> RNG k-e.01	72
44. <i>Velocity Streamline</i> RNG k-e.02	73
45. <i>Velocity Vector</i> RNG k-e.02	73
46. <i>Iso-Surface phase-2 volume fraction</i> RNG k-e.02	74
47. <i>Average of velocity on outlet</i> RNG k-e.02	74
48. <i>Velocity Streamline</i> RNG k-e.03	75
49. <i>Velocity Vector</i> RNG k-e.03	75
50. <i>Iso-Surface phase-2 volume fraction</i> RNG k-e.03	76
51. <i>Average of velocity on outlet</i> RNG k-e.03	76
52. <i>Velocity Streamline</i> RNG k-e.04	77
53. <i>Velocity Vector</i> RNG k-e.04	77
54. <i>Iso-Surface phase-2 volume fraction</i> RNG k-e.04	78
55. <i>Average of velocity on outlet</i> RNG k-e.04	78
56. <i>Velocity Streamline</i> RNG k-e.05	79
57. <i>Velocity Vector</i> RNG k-e.05	79
58. <i>Iso-Surface phase-2 volume fraction</i> RNG k-e.05	80
59. <i>Average of velocity on outlet</i> RNG k-e.05	80
60. <i>Velocity Streamline</i> RNG k-e.06	81
61. <i>Velocity Vector</i> RNG k-e.06	81
62. <i>Iso-Surface phase-2 volume fraction</i> RNG k-e.06	82
63. <i>Average of velocity on outlet</i> RNG k-e.06	82

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran

1. Gambar Rumah *Water Vortex Turbine* dengan *water depth* 200 mm
2. Persiapan Bahan Penelitian Menggunakan Aplikasi Autodesk Inventor Professional 2015
3. Proses Analisis Numerical Aliran Fluida Menggunakan Aplikasi Ansys Fluent versi 16.2
4. Jurnal Penelitian O. B. Yakoob, dkk.
5. Biodata Penulis
6. Halaman Pengesahan Seminar Proposal
7. Halaman Pengesahan Ujian Skripsi
8. Lembaran Konsultasi Skripsi

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Pemanfaatan potensi energi yang dimiliki oleh air mengalir telah sejak lama digunakan. Salah satunya adalah pemanfaatannya untuk membangkitkan energi listrik. Oleh sebab itu tenaga air adalah salah satu dari sumber energi terbarukan yang menyumbangkan produksi energi listrik terbesar di dunia dengan total kapasitas 1067 GW pada tahun 2011 (Abdul Muis, dkk., 2014 : Energi III-1). Di Indonesia dari data yang dipublikasikan oleh BPPT tahun 2014, potensi tenaga hidro yang tersedia 75.000 MW dengan kapasitas yang terpasang 7.059 MW dan potensi tenaga mikrohidro yang tersedia 769,7 MW dengan kapasitas yang terpasang 512 MW (BPPT, 2014 : 20).

Potensi aliran air dengan *head* rendah adalah suatu potensi aliran air yang belum banyak terpakai saat ini. Potensi ini sangat besar dan banyak, hanya saja belum dimanfaatkan dengan baik karena keterbatasan turbin Kaplan dan Bulb, yaitu membutuhkan kanal atau saluran yang relatif kompleks untuk mengatur aliran air sebelum dan sesudah turbin agar bisa memperoleh performa yang optimal, sehingga pengaplikasiannya menjadi relatif mahal. (Abdul Muis, dkk., 2014 : Energi III-1)

Franz Zotloeterer mendapatkan hak paten pertama pada tahun 2004 atas penemuan *Gravitational Water Vortex Power Plant (GWVPP)* atau *Water Vortex Turbine*. Pada tahun 2005, pengaplikasian pertama *Water Vortex Turbine* Zotloeterer dibuat di Obergrafendorf, Austria.

Proyek pertama ini menghasilkan energi listrik 55.000 kWh dalam satu tahun. Proyek ini dibuat dengan *head* air 1,5 m ; debit air 0,9 m³/s dan efisiensi turbin 80 %. *Water Vortex Turbine* ini dapat diaplikasikan pada aliran air dengan *head* yang rendah sebesar 0,7 m sampai 2 m dan debit air sebesar 0,02 m³/s sampai 20 m³/s.

Penelitian yang telah dilakukan oleh O. B. Yaakob, dkk., berjudul *CFD Validation for Efficient Gravitational Vortex Pool System*, mendapatkan hasil analisis *numerical* Ansys Fluent dan hasil eksperimental yaitu kecepatan aliran air pada saluran keluar (*outlet velocity*) Rumah *Water Vortex Turbine* sebagai berikut:

Tabel 1. *Outlet Velocity* Hasil Analisis *Numerical* Ansys Fluent dan Eksperimental pada penelitian O. B. Yakoob, dkk.

<i>Water Depth</i> (mm)	<i>Inlet Velocity</i> (m/s)	<i>Fluent Outlet Velocity</i> (m/s)	<i>Experimental Outlet Velocity</i> (m/s)	<i>Difference</i> (%)
100	0.27	0.91	1.06	14
150	0.31	1.12	1.22	8
200	0.20	1.45	1.56	7
250	0.53	1.32	1.33	0
300	0.42	1.67	1.62	-3

(Sumber : O. B. Yaakob, dkk., 2015 : 99)

Berdasarkan tabel di atas, hasil yang paling efisien adalah *water depth* 200 mm karena dengan *inlet velocity* 0.20 m/s dapat dihasilkan *experimental outlet velocity* sebesar 1.56 m/s. Tetapi perbedaan antara hasil eksperimental dengan hasil analisis *numerical* Ansys Fluent pada *water depth* 200 mm sebesar 7 %, sehingga perlu untuk dilakukan penelitian untuk meningkatkan hasil analisis *numerical* Ansys Fluent sehingga mengurangi perbedaan tersebut.

Berdasarkan hal tersebut, penulis ingin melakukan penelitian mengenai **“Analisis Numerical Aliran Fluida pada Rumah Water Vortex Turbine dengan Water Depth 200 mm dan Inlet Velocity 0.20 m/s Menggunakan Aplikasi Ansys Fluent Versi 16.2”**.

B. Identifikasi Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, peneliti dapat mengidentifikasi masalah-masalah yang ada yakni sebagai berikut :

1. Pemanfaatan potensi energi hidro untuk menghasilkan energi listrik di Indonesia baru 9,4 % dari 75.000 MW.
2. Pemanfaatan potensi energi mikrohidro untuk menghasilkan energi listrik di Indonesia baru 66,5 % dari 769,7 MW.
3. Pemanfaatan potensi aliran air dengan *head* yang rendah belum maksimal dikarenakan turbin Kaplan dan Bulb membutuhkan kanal atau saluran yang relatif kompleks untuk mengatur aliran air sebelum dan sesudah turbin agar bisa memperoleh performa yang optimal.
4. Persentase perbedaan *outlet velocity* antara hasil eksperimental dengan hasil analisis *numerical* Ansys Fluent pada Rumah *Water Vortex Turbine* dengan *water depth* 200 mm dan *inlet velocity* 0.20 m/s sebesar 7 % (O. B. Yaakob, dkk., 2015 : 99), sehingga perlu untuk mengurangi persentase perbedaan hasil tersebut.

C. Batasan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang dan identifikasi masalah di atas, maka

dalam penelitian ini peneliti membatasi permasalahan yaitu hanya melakukan analisis *numerical* aliran fluida menggunakan aplikasi Ansys Fluent versi 16.2 pada Rumah *Water Vortex Turbine* dengan *water depth* 200 mm dan *inlet velocity* 0.20 m/s, kemudian menghitung persentase perbedaan *outlet velocity* hasil analisis *numerical* Ansys Fluent pada penelitian O. B. Yakoob, dkk. dengan *outlet velocity* hasil analisis *numerical* Ansys Fluent yang dilakukan oleh penulis, serta menghitung persentase perbedaan *output velocity* hasil eksperimental pada penelitian O. B. Yakoob, dkk. dengan *output velocity* hasil analisis *numerical* Ansys Fluent yang dilakukan oleh penulis .

D. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, identifikasi masalah dan batasan masalah di atas, maka masalah dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut :

1. Berapa *output velocity* hasil analisis *numerical* aliran fluida menggunakan aplikasi Ansys Fluent versi 16.2 pada Rumah *Water Vortex Turbine* dengan *water depth* 200 mm dan *inlet velocity* 0.20 m/s yang dilakukan oleh penulis ?
2. Berapa persen (%) perbedaan *outlet velocity* hasil analisis *numerical* Ansys Fluent pada penelitian O. B. Yaakob, dkk. dengan *outlet velocity* hasil analisis *numerical* Ansys Fluent yang dilakukan oleh penulis ?
3. Berapa persen (%) perbedaan *outlet velocity* hasil eksperimental pada penelitian O. B. Yaakob, dkk. dengan *outlet velocity* hasil analisis *numerical* Ansys Fluent yang dilakukan oleh penulis ?

E. Tujuan Penelitian

Berdasarkan uraian rumusan masalah di atas, maka tujuan dalam penelitian ini adalah untuk mengetahui:

1. *Output velocity* hasil analisis *numerical* aliran fluida menggunakan aplikasi Ansys Fluent versi 16.2 pada Rumah *Water Vortex Turbine* dengan *water depth* 200 mm dan *inlet velocity* 0.20 m/s yang dilakukan oleh penulis.
2. Persentase (%) perbedaan *outlet velocity* hasil analisis *numerical* Ansys Fluent pada penelitian O. B. Yaakob, dkk. dengan *outlet velocity* hasil analisis *numerical* Ansys Fluent yang dilakukan oleh penulis.
3. Persentase (%) perbedaan *outlet velocity* hasil eksperimental pada penelitian O. B. Yaakob, dkk. dengan *outlet velocity* hasil analisis *numerical* Ansys Fluent yang dilakukan oleh penulis.

F. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Manfaat Teoritis
 - a. Memberikan wawasan mengenai teknologi *Water Vortex Turbine* atau *Gravitational Water Vortex Power Plant*.
 - b. Memberikan pengetahuan tentang aplikasi Ansys Fluent versi 16.2.
 - c. Memberikan wawasan mengenai menganalisis aliran fluida pada suatu sistem dengan bantuan aplikasi komputer (Ansys Fluent versi 16.2).
2. Manfaat Praktis
 - a. Manfaat untuk penulis

- 1) Memberikan wawasan dalam pemanfaatan teknologi *Water Vortex Turbine* atau *Gravitational Water Vortex Power Plant*.
 - 2) Memberikan motivasi untuk mengaplikasikan teknologi *Water Vortex Turbine* tersebut di Provinsi Sumatera Barat dan Sumatera Utara.
 - 3) Memberikan wawasan mengenai tata cara penggunaan aplikasi Ansys Fluent versi 16.2 dalam hal menganalisis aliran fluida dalam suatu sistem.
 - 4) Memberikan motivasi untuk memperdalam keahlian dalam penggunaan aplikasi Ansys.
- b. Manfaat untuk lembaga pendidikan
- 1) Memberikan wawasan baru dalam dunia pendidikan di Indonesia, yaitu pemanfaatan aliran air dengan *head* rendah untuk menghasilkan energi listrik menggunakan teknologi *Water Vortex Turbine*.
 - 2) Memberikan ilmu pengetahuan dalam dunia pendidikan di Indonesia, khususnya untuk mahasiswa Jurusan Teknik Mesin FT-UNP yaitu tata cara penggunaan aplikasi Ansys Fluent versi 16.2 dalam hal menganalisis aliran fluida dalam suatu sistem.
- c. Manfaat untuk peneliti selanjutnya
- 1) Dapat dijadikan sebagai bahan perbandingan, pertimbangan atau dikembangkan lebih lanjut dalam hal pemanfaatan teknologi *Water Vortex Turbine* dan penggunaan aplikasi Ansys Fluent versi 16.2.
 - 2) Dapat digunakan sebagai bahan referensi untuk penelitian yang sejenis.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

A. Turbin Air

Turbin air merupakan suatu mesin yang dapat mengubah energi kinetik air menjadi energi mekanik pada roda turbin (Sunyoto, dkk., 2008 : 407). Pada umumnya turbin air digunakan sebagai pembangkit energi listrik, yaitu turbin air harus dilengkapi dengan generator listrik. Jadi, energi mekanik dari roda turbin digunakan untuk membangkitkan energi listrik dengan menggunakan generator listrik. Generator listrik adalah suatu mesin yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik.

Sebelum melakukan pembangunan pusat pembangkit listrik tenaga air, diperlukan kelayakan sumber air yang akan dimanfaatkan energi potensialnya. Terutama ketersediaan *head* dan kapasitas terpenuhi dari bendungan atau waduk untuk beban yang dirancang. Adapun kategori *head* tersedia yang diklasifikasikan sebagai berikut:

1. *head* tinggi (lebih dari 240 m)
2. *head* sedang (30 m hingga 240 m)
3. *head* rendah (kurang dari 30 m). (Sunyoto, dkk., 2008 : 411)

Adapun klasifikasi dari jenis pembangkit dilihat dari daya keluaran turbin, sebagai berikut:

1. *Large-hydro*; daya keluaran turbin sampai 1000 MW
2. *Medium-hydro*; daya keluaran turbin 15 – 100 MW

3. *Small-hydro*; daya keluaran turbin 1 – 15 MW
4. *Mini-hydro*; daya keluaran turbin 100 kW – 1 MW
5. *Micro-hydro*; daya keluaran turbin 5 kW – 100 kW
6. *Pico-hydro*; daya keluaran turbin sampai 5 kW. (Sunyoto, dkk., 2008 : 411)

1. Klasifikasi Turbin Air

Berdasarkan *range* dari *head*-nya, jenis turbin air dapat digolongkan menjadi tiga, sebagai berikut:

- a. Turbin air dengan *head* rendah
- b. Turbin air dengan *head* sedang
- c. Turbin air dengan *head* tinggi. (Faisal Hajj, 2013 : 8)

Dilihat dari cara kerjanya, jenis turbin air dapat dikelompokkan, sebagai berikut:

- a. Turbin Impuls (aksi)
- b. Turbin Reaksi. (Faisal Hajj, 2013 : 8)

Tabel 2. Pengelompokan Turbin

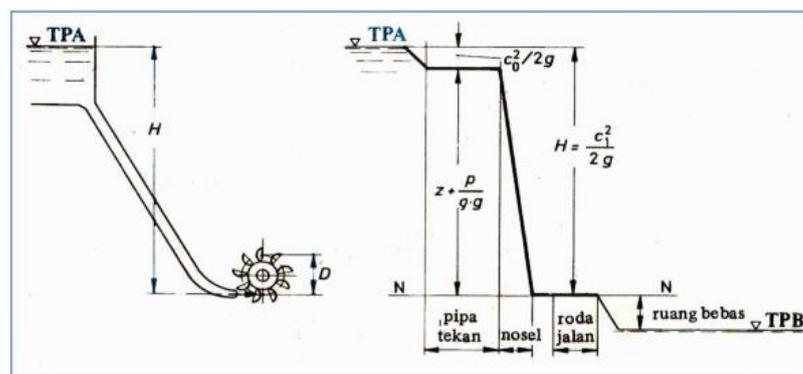
	High Head	Medium Head	Low Head
Impulse Turbine	<ul style="list-style-type: none"> • Pelton • Turgo 	<ul style="list-style-type: none"> • Cross Flow • Multi-Jet • Pelton • Turgo 	<ul style="list-style-type: none"> • Cross Flow
Reaction Turbine		<ul style="list-style-type: none"> • Francis 	<ul style="list-style-type: none"> • Propeller • Kaplan • Vortex

(Sumber : Faisal Hajj, 2013 : 8)

a. Turbin Impuls

Turbin impuls adalah turbin air yang prinsip kerjanya merubah seluruh energi air (yang terdiri dari energi potensial-tekanan- kecepatan) yang tersedia menjadi energi kinetik untuk memutar turbin, sehingga menghasilkan energi puntir dalam bentuk putaran poros. Ataupun energi potensial air diubah menjadi energi kinetik pada nosel. Contoh turbin impuls adalah turbin Pelton. Turbin Pelton dipakai untuk tinggi air jatuh yang besar. (Faisal Hajj, 2013 : 9)

Turbin impuls merupakan turbin tekanan sama karena aliran air yang ke luar nosel tekanannya adalah sama dengan tekanan atmosfer di daerah sekitarnya. Semua energi potensial dan tekanan ketika masuk ke sudu jalan turbin diubah menjadi energi kecepatan (*Gambar 1.*). (Faisal Hajj, 2013 : 9)



Gambar 1. Skema Turbin Pancar (Turbin Pelton), jalannya tekanan di dalam pipa dan di dalam roda jalan
(Sumber : Faisal Hajj, 2013 : 9)

b. Turbin Reaksi

Turbin reaksi merupakan turbin air yang prinsip kerjanya merubah seluruh energi air yang tersedia menjadi energi puntir dalam bentuk putaran. Sudu

pada turbin reaksi mempunyai profil khusus yang menyebabkan terjadinya penurunan tekanan air selama melalui sudu. (Faisal Hajj, 2013 : 10)

Turbin reaksi terdiri dari sudu pengarah dan sudu jalan dan kedua sudu tersebut semuanya terendam di dalam air. Air dialirkan ke dalam sebuah terusan atau dilewatkan ke dalam sebuah cincin yang berbentuk *spiral* (rumah keong). Perubahan energi seluruhnya terjadi di dalam sudu gerak. (Faisal Hajj, 2013 : 10)

2. Perbandingan Karakteristik Turbin Air

Kecepatan spesifik dari sebuah turbin air dapat diartikan sebagai kecepatan ideal, persamaan geometris turbin, yang menghasilkan satu satuan daya tiap satu satuan *head*. Kecepatan spesifik turbin diberikan oleh perusahaan (dengan penilaian yang lainnya) dan selalu dapat diartikan sebagai titik efisiensi maksimum. Perhitungan tepat ini menghasilkan performa turbin dalam jangkauan *head* dan debit tertentu. (Faisal Hajj, 2013 : 10)

Kecepatan spesifik setiap turbin mempunyai kisaran (*range*) tertentu berdasarkan data eksperimen. Kisaran kecepatan spesifik beberapa turbin air adalah sebagai berikut:

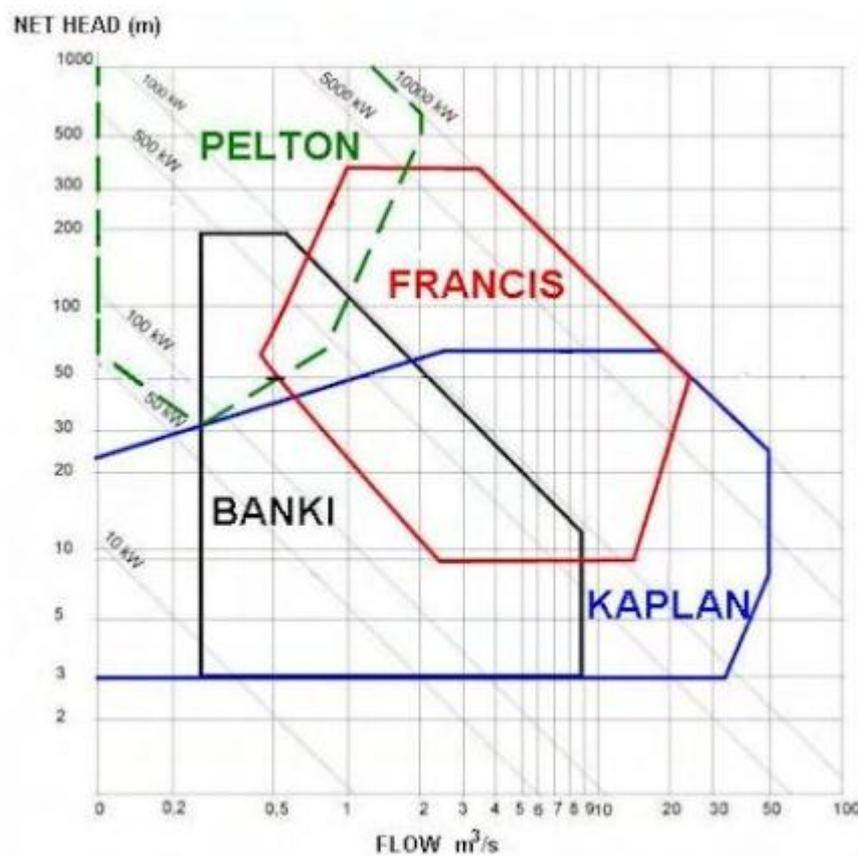
Tabel 3. Kecepatan Spesifik Turbin Air

Turbin Pelton	$12 < n_s < 25$
Turbin Francis	$60 < n_s < 300$
Turbin Cross Flow	$40 < n_s < 200$
Turbin Propeller	$250 < n_s < 1000$

(Sumber : Faisal Hajj, 2013 : 11)

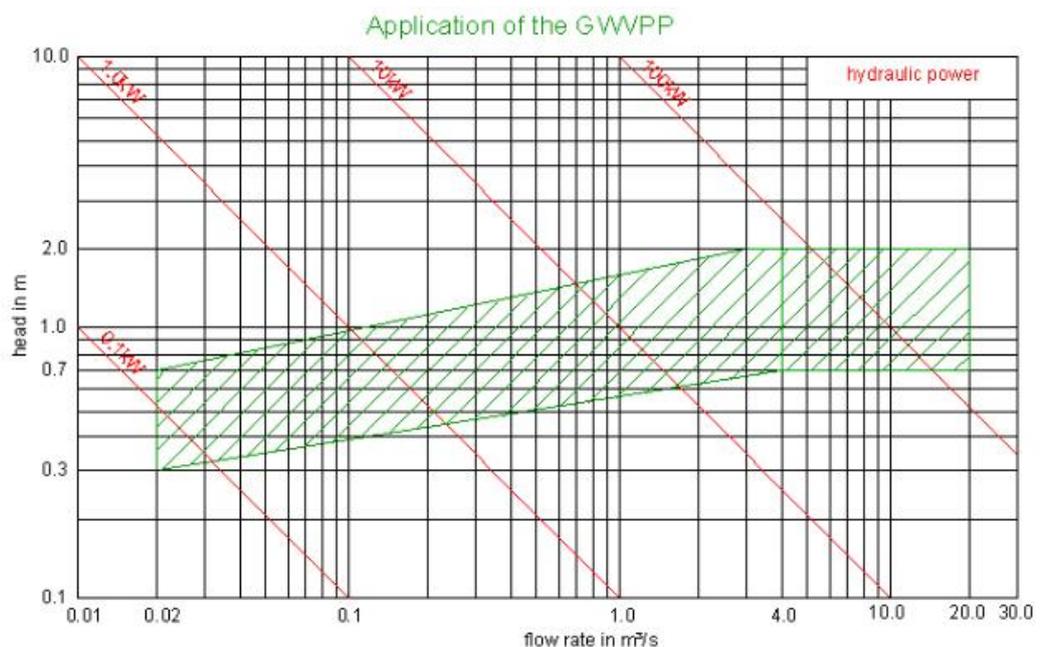
Kecepatan spesifik (n_s), menunjukkan bentuk dari turbin itu dan tidak berhubungan dengan ukurannya. Hal ini menyebabkan desain turbin baru yang diubah skalanya dari desain yang sudah ada dengan performa yang sudah diketahui. Kecepatan spesifik merupakan kriteria utama yang menunjukkan pemilihan jenis turbin yang tepat berdasarkan karakteristik sumber air. (Faisal Hajj, 2013 : 11)

Berdasarkan kecepatan spesifik turbin yang sudah diketahui, maka perencanaan dan pemilihan jenis turbin akan menjadi lebih mudah, bahkan dimensi dasar turbin dapat diperkirakan. (Faisal Hajj, 2013 : 11)



Gambar 2. Perbandingan Karakteristik Turbin Air
(Sumber :Sunyoto, dkk., 2008 : 432)

Dapat dilihat pada (*Gambar 2.*) turbin kaplan adalah turbin yang beroperasi pada *head* yang rendah dengan kapasitas aliran yang tinggi atau bahkan beroperasi pada kapasitas yang sangat rendah. Hal ini karena sudu – sudu turbin kaplan dapat diatur secara manual atau otomatis untuk merespon perubahan kapasitas. Sedangkan turbin pelton adalah turbin yang beroperasi pada *head* tinggi dengan kapasitas yang rendah. Untuk turbin francis mempunyai karakteristik yang berbeda dengan yang lainnya. Turbin Francis dapat beroperasi pada *head* yang rendah atau beroperasi pada *head* yang tinggi.



Gambar 3. Karakteristik *Water Vortex Turbine*

(Sumber : <http://www.zotloeterer.com/welcome/gravitation-water-vortex-power-plants/>)

Seperti yang terlihat pada (*Gambar 3.*) menunjukkan *Water Vortex Turbine* dapat beroperasi pada *head* sangat rendah dibandingkan turbin umumnya. Kerena *head* yang rendah maka energi listrik yang dihasilkan

sangat kecil berkisar 0,1 – 100 kW. Sedangkan Turbin air pada umumnya menghasilkan 10 – 10.000 kW. *Water Vortex Turbine* termasuk pembangkit energi listrik tenaga mikrohidro sebab kapasitas listrik yang dihasilkan kurang dari 100 kW.

B. Fluida

Definisi yang lebih tepat untuk membedakan zat padat dengan fluida adalah karakteristik deformasi bahan-bahan tersebut. Zat padat dianggap sebagai bahan yang menunjukkan reaksi deformasi yang terbatas ketika menerima atau mengalami suatu gaya geser (*shear*). Sedangkan fluida memperlihatkan fenomena sebagai zat yang terus menerus berubah bentuk apabila mengalami tekanan geser, dengan kata lain yang dikategorikan sebagai fluida adalah suatu zat yang tidak mampu menahan tekanan geser tanpa berubah bentuk. (Ridwan, 1999 : 1)

1. Beberapa Istilah Dalam Mekanika Fluida

Kerapatan (*density*) adalah jumlah/ kuantitas suatu zat pada suatu unit volume *density* dapat dinyatakan dalam tiga bentuk:

1. *Mass density* (ρ) satuan dalam SI adalah (kg/m^3);
2. Berat spesifik (*specific weight*) (γ) = $\rho \cdot g$ satuan dalam SI adalah N/m^3
dimana g = percepatan gravitasi ($\approx 9,81 \text{ m/s}^2$);
3. *Specific gravity* ($s.g$) merupakan perbandingan antara *density* dengan berat spesifik suatu zat terhadap *density* atau berat spesifik suatu standar

zat (umumnya terhadap air). Jadi $s.g$ tidak mempunyai satuan. (Ridwan, 1999 : 1)

Viskositas adalah suatu ukuran ketahanan suatu fluida terhadap deformasi atau perubahan bentuk. Dalam sistem SI tegangan (τ) = μ (du/dy), atau dengan kata lain tegangan geser diekspresikan dalam N/m^2 (Pa) dan gradien kecepatan (du/dy) yaitu dalam (m/s)/m, karena itu satuan SI untuk viskositas dinamik (μ) adalah $N.s/m^2$ atau $kg/m.s$. Sedangkan viskositas kinematik (ν) didefinisikan sebagai perbandingan viskositas dinamik terhadap kerapatan (*density*), $\nu = \mu / \rho$ dalam SI viskositas kinematik mempunyai satuan m^2/s . (Ridwan, 1999 : 2)

2. Klasifikasi Aliran Fluida

Banyak kriteria yang dapat digunakan untuk mengklasifikasikan fluida seperti aliran dapat digolongkan sebagai aliran *steady* atau *unsteady*, satu, dua atau tiga dimensi, seragam atau tidak seragam, laminar atau turbulen dan mampu mampat atau tidak mampu mampat. Selain itu, aliran gas ada yang subsonik, transonik, supersonik atau hipersonik, sedangkan zat cair yang mengalir di saluran terbuka ada yang subkritis, kritis atau superkritis. (Ridwan, 1999 : 25)

Namun secara garis besar dapat dibedakan atau dikelompokkan jenis aliran fluida adalah sebagai berikut:

- a. Aliran tunak (*steady*) : suatu aliran dimana kecepatannya tidak terpengaruh oleh perubahan waktu, sehingga kecepatan konstan pada setiap titik (tidak mempunyai percepatan).

- b. Aliran tidak tunak (*transient*) : suatu aliran dimana terjadi perubahan kecepatan terhadap waktu.
- c. Aliran seragam (*uniform*) : suatu aliran yang tidak terjadi perubahan baik besar maupun arah, dengan kata lain tidak terjadi perubahan kecepatan dan penampang lintasan.
- d. Aliran tidak seragam (*non uniform*): suatu aliran yang dalam kondisi berubah baik kecepatan maupun penampang lintasan berubah. (Ridwan, 1999 : 25)

Adapun tipe-tipe aliran fluida, yaitu aliran laminar; aliran turbulen; aliran transisi; berdasarkan koordinatnya: aliran satu, dua dan tiga dimensi; aliran subsonik: suatu aliran yang lebih kecil dari kecepatan suara; aliran transonik: suatu aliran yang sama dengan kecepatan suara; aliran supersonik: suatu aliran yang melebihi kecepatan suara; aliran hipersonik: suatu aliran yang sangat tinggi (sangat besar dibanding kecepatan suara). (Ridwan, 1999 : 25)

3. Aliran Laminar dan Turbulen

Suatu aliran kental dapat berupa aliran laminar atau aliran turbulen. Di dalam *aliran turbulen* terjadi pencampuran partikel-partikel fluida sehingga pergerakan suatu partikel tertentu terjadi secara acak dan sangat tidak teratur; perata-rataan statistika dipakai untuk menetapkan kecepatan, tekanan dan kuantitas-kuantitas lainnya yang ingin diketahui. Perata-rataan yang demikian dapat bersifat “tunak” yang berarti independen terhadap waktu, atau dapat juga tak-tunak dan bergantung pada waktu. (*Gambar 4.*) menunjukkan aliran-

aliran turbulen tunak dan tak-tunak. Perhatikan aliran turbulen yang berisik yang keluar dari keran pada saat kita mengambil air. (Potter, Merle C. & Wiggert, David C., 2011 : 47)

Di dalam *aliran laminar* tidak terjadi pencampuran partikel-partikel yang signifikan; pergerakannya halus dan tenang, seperti aliran air yang mengalir pelan dari sebuah keran. Jika zat pewarna dimasukkan ke dalam aliran laminar, zat tersebut akan tetap terlihat jelas untuk jangka waktu yang lama. Zat tersebut akan cepat tersebar jika alirannya turbulen. (*Gambar 5.*) menunjukkan aliran laminar tunak dan tak-tunak. Aliran laminar dapat dibuat terlihat menjadi turbulen dengan secara acak mengontrol katup di dalam suatu aliran madu di dalam pipa sehingga kecepatannya tampak seperti dalam (*Gambar 4.*). Walaupun demikian, alirannya tetap laminar karena tidak terjadi pencampuran partikel-partikel fluida. Jadi, kita tidak dapat menentukan apakah suatu aliran tertentu adalah turbulen atau laminar hanya dari tampilan $V(t)$ saja. Untuk menjadi turbulen, pergerakannya harus acak, seperti dalam gambar 2.4, tapi harus juga terjadi pencampuran partikel-partikel fluida. (Potter, Merle C. & Wiggert, David C., 2011 : 47)

Ketika suatu aliran mulai bergerak, seperti misalnya di dalam sebuah pipa, awalnya aliran tersebut bersifat laminar, akan tetapi dengan meningkatnya kecepatan rata-ratanya, aliran laminar tersebut menjadi tidak stabil dan terjadilah aliran turbulen. Dalam beberapa kasus, seperti misalnya dalam aliran di antara silinder-silinder yang berputar, aliran laminar yang tidak stabil berubah menjadi aliran vorteks-vorteks laminar sekunder dan kemudian

menjadi aliran laminar ketiga dan akhirnya aliran turbulen pada kecepatan yang lebih tinggi. (Potter, Merle C. & Wiggert, David C., 2011 : 47)

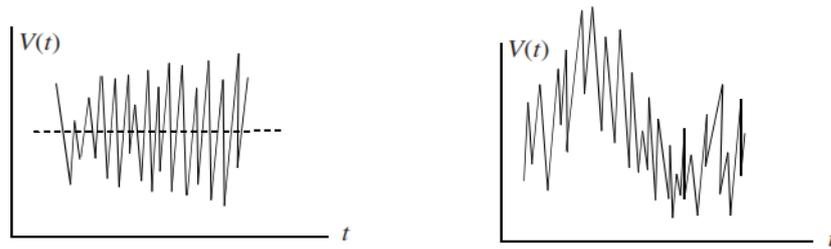
Terdapat suatu kuantitas, yang disebut *bilangan Reynolds*, yang digunakan untuk menentukan apakah sebuah aliran adalah laminar atau turbulen.

Bilangan tersebut adalah

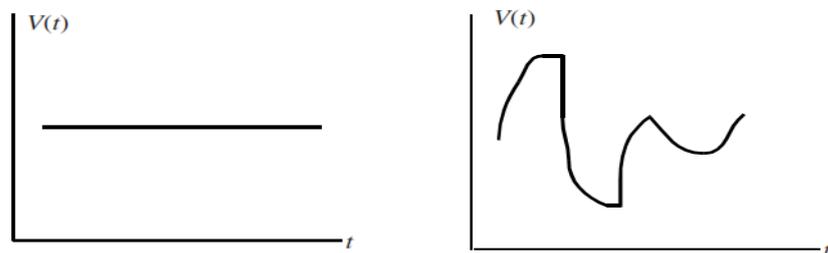
$$Re = \frac{VL}{\nu} \dots\dots\dots(1.)$$

(Sumber : Potter, Merle C. & Wiggert, David C., 2011 : 48)

di mana V adalah suatu kecepatan karakteristik (kecepatan rata-rata di dalam pipa atau kecepatan *airfoil*), L adalah suatu kecepatan karakteristik (diameter pipa atau jarak dari ujung depan pelat datar) dan ν adalah viskositas kinematik. Jika bilangan *Reynolds*-nya lebih besar dari suatu bilangan *Reynolds* kritis, aliran menjadi turbulen; jika lebih kecil dari bilangan *Reynolds* kritis, alirannya laminar. Untuk aliran di dalam sebuah pipa, dengan asumsi bahwa dinding pipa biasanya kasar, bilangan *Reynolds* kritis biasanya ditetapkan sebesar 2000; jika dindingnya halus dan bebas getaran, dan aliran yang masuk bebas dari gangguan, bilangan *Reynolds* kritisnya dapat mencapai 40.000. Bilangan *Reynolds* kritis memiliki nilai yang berbeda untuk geometri yang berbeda. Untuk aliran di antara pelat paralel, nilainya ditetapkan 1500 dengan menggunakan kecepatan rata-rata dan jarak di antara pelat. Untuk lapisan batas di permukaan pelat datar dengan gradien tekanan nol, nilainya berkisar di antara 3×10^5 dan 10^6 , dengan menggunakan jarak dari ujung depan pelat. (Potter, Merle C. & Wiggert, David C., 2011 : 48)

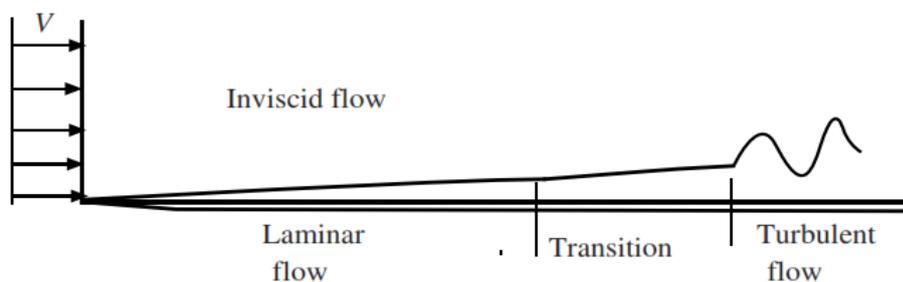


Gambar 4. Aliran turbulen tunak dan tak-tunak
(Sumber : Potter, Merle C. & Wiggert, David C., 2011 : 47)



Gambar 5. Aliran laminar tunak dan tak-tunak
(Sumber : Potter, Merle C. & Wiggert, David C., 2011 : 47)

Untuk aliran tak-kental, tidak menggunakan istilah laminar atau turbulen. Dalam sebuah aliran eksternal, aliran tak-kental disebut *aliran arus-bebas* (*free-stream*). Suatu arus bebas memiliki gangguan-gangguan akan tetapi gangguan-gangguan tersebut tidak diikuti oleh tegangan geser, yang merupakan persyaratan lainnya untuk aliran laminar dan turbulen. Arus bebas juga dapat bersifat irrotasional atau dapat juga memiliki *vortisitas*. (Potter, Merle C. & Wiggert, David C., 2011 : 48)



Gambar 6. Aliran lapisan batas di pelat datar
(Sumber : Potter, Merle C. & Wiggert, David C., 2011 : 48)

Lapisan batas adalah sebuah lapisan fluida yang tipis yang terbentuk pada sebuah benda karena adanya viskositas yang menyebabkan fluida melekat ke permukaan (batas); ini menyebabkan kecepatan menjadi nol di permukaan tersebut. Efek-efek viskositas di dalam lapisan tersebut pada kenyataannya bahkan dapat membakar satelit ketika masuk kembali. (*Gambar 6.*) menunjukkan permukaan batas yang biasanya terdapat pada sebuah pelat datar. Lapisan tersebut bersifat laminar di dekat ujung depan dan mengalami transisi ke aliran turbulen pada jarak yang mencukupi. Untuk sebuah pelat kaku yang halus dengan tingkat fluktuasi arus bebas yang rendah, lapisan laminar dapat terjadi hingga $Re = 10^6$, di mana $Re = VL / \nu$, di mana L adalah jarak di sepanjang pelat; untuk pelat kasar, atau pelat yang bergetar, atau fluktuasi arus bebas yang tinggi, aliran laminar terjadi hingga $Re = 3 \times 10^5$. (Potter, Merle C. & Wiggert, David C., 2011 : 48)

4. Aliran *Vortex*

Dalam dinamika fluida, *vortex* adalah sebuah daerah di dalam fluida dimana aliran sebagian besar bergerak memutar terhadap sumbu yang imajiner, baik bergerak lurus atau melengkung. Pola gerakannya disebut aliran *vortex*. *Vortex* terbentuk oleh fluida termasuk cairan, gas dan plasma. (Stefanus L., 2014 : 6)

Vortex adalah sebuah komponen utama dalam aliran turbulen. Dengan tidak adanya gaya luar, gerakan viskos dalam cairan cenderung memuat aliran menjadi kumpulan yang disebut *vortisitas irrotasional*. Dalam pusaran tersebut, kecepatan fluida yang terbesar berada di samping sumbu imajiner,

dan penurunan kecepatan berbanding terbalik terhadap jarak dari sumbu imajiner. Pusaran sangat tinggi di wilayah inti sekitar sumbu, dan hampir nol di ujung pusaran; sementara tekanan turun tajam saat mendekati wilayah itu. Setelah terbentuk, *vortex* dapat berpindah, meregang, berputar dan berintegrasi secara kompleks. Sebuah *vortex* bergerak membawa momentum sudut dan linear, energi dan massa di dalamnya. (Stefanus L., 2014 : 6)



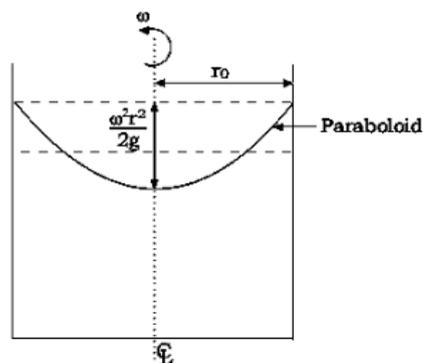
Gambar 7. Aliran *vortex*
(Sumber : Stefanus L., 2014 : 6)

Adapun jenis-jenis dari aliran vortex yaitu *forced vortex*, *free vortex* dan *compound vortex*.

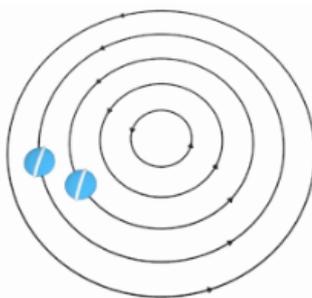
a. *Forced Vortex*

Forced vortex dikenal juga sebagai *vortex flywheel*. Jika fluida berputar seperti benda kaku-yaitu, jika v naik secara proporsional terhadap r – bola kecil yang dibawa oleh arus juga akan berputar pada pusatnya seolah-olah itu adalah bagian dari benda kaku. Dalam hal ini, vektor omega adalah sama di

mana-mana. Arahnya sejajar dengan sumbu putar, dan besarnya adalah dua kali kecepatan sudut untuk seluruh fluida. (Stefanus L., 2014 : 10)



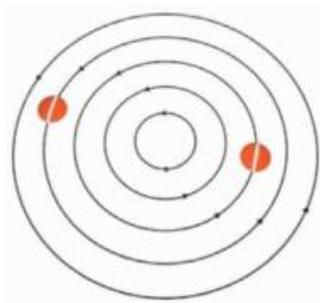
Gambar 8. Teh di cangkir yang di aduk adalah sebuah aplikasi *forced vortex*
(Sumber : Stefanus L., 2014 : 10)



Gambar 9. *Rotational (rigid-body) vortex*
(Sumber : Stefanus L., 2014 : 11)

b. *Free Vortex*

Free vortex dikenal juga sebagai *potential vortex*. Jika kecepatan partikel v berbanding terbalik dengan jarak r , maka percobaan bola hayalan tidak akan berputar terhadap dirinya sendiri; ini akan mempertahankan arah yang sama sambil bergerak dalam lingkaran di sekitar garis *vortex*. Dalam hal ini *vortisitas* vektor omega adalah nol pada setiap titik tidak pada baris tersebut, dan aliran dikatakan *irrotasional*. (Stefanus L., 2014 : 11)



Gambar 10. *Irrotational vortex*
(Sumber : Stefanus L., 2014 : 11)

c. *Compound/ Gabungan Vortex*

Compound/ gabungan vortex, gabungan dari *free* dan *forced vortex* dikenal juga sebagai *rankine vortex*. Pada kasus di lapangan, sulit ditemukan aliran *free vortex* secara tunggal, namun aliran *free vortex* akan diikuti oleh aliran *forced vortex* di inti tengah pada saat mendekati sumbunya. (Stefanus L., 2014 : 12)

C. *Water Vortex Turbine*

Water Vortex Turbine adalah turbin air yang mengubah energi kinetik dari *water vortex* (pusaran air) menjadi torsi. *Vortex* atau pusaran didefinisikan sebagai aliran fluida yang bergerak disepanjang lintasan melengkung atau aliran massa fluida yang bergerak melingkar. (Gibran, 2014 : 18)

Water Vortex Turbine merupakan turbin yang memanfaatkan pusaran air sebagai media perantara energi terhadap sumbu vertikal sehingga terjadi perbedaan tekanan antara bagian sumbu dan sekelilingnya. *Water Vortex Turbine* dioperasikan pada daerah sungai yang memiliki *head* yang rendah dan memanfaatkan pusaran gravitasi air sehingga akan menimbulkan perbedaan tekanan air dengan bagian sumbu. Hal ini ditemukan oleh insinyur Austria,

Franz Zotloeterer ketika mencoba untuk menemukan cara untuk mengalirkan air tanpa sumber daya eksternal. (Gibran, 2014 : 18)

Komponen utama pada *Water Vortex Turbine* sama dengan turbin-turbin air lainnya hanya saja *Water Vortex Turbine* lebih mudah dalam pemasangannya dan pemeliharannya. *Water Vortex Turbine* terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu : rumah turbin (*casing*); poros; sudu (*moving blades*) dan bantalan (*bearing*). (Gibran, 2014 : 20)



Gambar 11. Aliran *vortex* pada Rumah *Water Vortex Turbine*

(Sumber : <http://www.zotloeterer.com/welcome/gravitation-water-vortex-power-plants/>)



Gambar 12. Pengaplikasian pertama *Water Vortex Turbine* *Zotloeterer*

(Sumber : <http://www.zotloeterer.com/welcome/gravitation-water-vortex-power-plants/>)

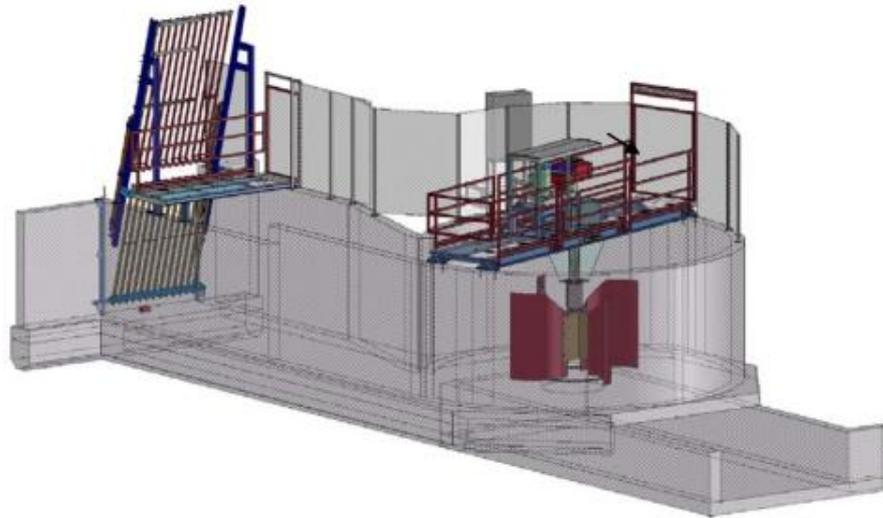
Franz Zotloeterer mendapatkan hak paten pertama pada tahun 2004 atas penemuan *Gravitational Water Vortex Power Plant* (GWVPP) atau *Water*

Vortex Turbine. Pada tahun 2005 pengaplikasian pertama *Water Vortex Turbine Zotloeterer* dibuat di Obergrafendorf, Austria. Proyek pertama ini menghasilkan energi listrik 55.000 kWh dalam satu tahun. Proyek ini dibuat dengan *head* air 1,5 m ; debit air 0,9 m³/s dan efisiensi turbin 80 %. *Water Vortex Turbine* tersebut dapat diaplikasikan pada aliran air dengan *head* yang rendah berkisar sebesar 0,7 m sampai 2 m dan debit aliran air berkisar sebesar 0,02 m³/s sampai 20 m³/s. (<http://www.zotloeterer.com/welcome/gravitation-water-vortex-power-plants/>)

1. Prinsip Kerja *Water Vortex Turbine*

Adapun cara kerja *Water Vortex Turbine*, sebagai berikut:

- a. Air sungai dari tepi sungai disalurkan dan dibawa ke tangki sirkulasi (*water vortex tank*). Tangki sirkulasi ini memiliki suatu lubang lingkaran pada dasarnya.
- b. Tekanan rendah pada lubang dasar tangki dan kecepatan air pada titik masuk tangki sirkulasi mempengaruhi kekuatan aliran *vortex*.
- c. Energi potensial seluruhnya diubah menjadi energi kinetik rotasi diinti *vortex* yang selanjutnya diekstraksi melalui sudu turbin sumbu vertikal.
- d. Air kemudian kembali ke sungai dari saluran keluar. (Gibran, 2014 : 19)



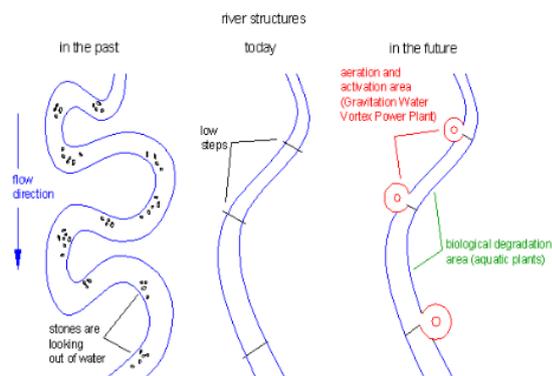
Gambar 13. *Water Vortex Turbine*
(Sumber : Gibran, 2014 : 15)

2. Keunggulan *Water Vortex Turbine*

Adapun keunggulan dari *Water Vortex Turbine*, sebagai berikut:

- a. Baik dikembangkan pada daerah yang memiliki sumber air dengan debit yang cukup besar namun hanya memiliki *head* yang rendah.
- b. Tidak memerlukan sistem kontrol yang sangat rumit seperti turbin lainnya.
- c. Tekanan air yang terjadi tidak merusak ekologi, dalam hal ini dampak terhadap kehidupan air (ikan) dan mikro-organisme lainnya tetap terjaga.
- d. Tidak membutuhkan *draft tube*, sehingga dapat mengurangi pengeluaran untuk penggalan pemasangan *draft tube*.
- e. Memiliki efisiensi yang tinggi, dengan variasi debit yang besar dan sangat baik untuk debit air yang kecil.
- f. Tidak memerlukan jaring-jaring halus sebagai pencegah masuknya puing-puing ke dalam turbin, sehingga dapat mengurangi biaya perawatan.

(Gibran, 2014 : 20)



Gambar 14. Pengembangan *Water Vortex Turbine* di aliran sungai
(Sumber : Gibran, 2014 : 23)

Zotloeterer Installations on Major Natural Rivers

12kW-GWVPP on AYUNG River in Ubud (Bali/Indonesia)



4kW-GWVPP on HILLE River in Winterberg (Germany)



8kW(2x4kW)-GWVPP on HILLE River in Niedersfeld (Germany)



6kW(2x 3kW)-GWVPP on WIMITZ River in Wimitz (Austria)



Gambar 15. Pengaplikasian *Water Vortex Turbine* di beberapa negara
(Sumber : <http://llandysul-ponttyweli.co.uk/Hydro/HydroPresentationNRWWithReplies.pdf>)

D. Perhitungan Dinamika Fluida

1. Hukum Konservasi Massa

Konsep dasar dari hukum konservasi massa adalah bahwa jumlah pertambahan massa pada *volume control* adalah sama dengan jumlah aliran massa yang masuk dan keluar elemen. Berikut persamaan konservasi massa pada elemen fluida 3 dimensi. (Budiman yudha, 2015 : 21)

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

(Sumber : Budiman Yudha, 2015 : 22)

2. Hukum Konservasi Momentum

Tingkat kenaikan momentum partikel fluida sama dengan jumlah gaya-gaya pada partikel atau resultan gaya yang bekerja pada sebuah benda sama dengan percepatan dikalikan dengan massa benda tersebut. Berikut persamaan konservasi momentum (persamaan Navier-Stokes) pada elemen 3 dimensi.

(Budiman yudha, 2015 : 23)

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \dots\dots\dots(3.)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v V) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \dots\dots\dots(4.)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w V) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \rho f_z \dots\dots\dots(5.)$$

(Sumber : Budiman Yudha, 2015 : 25-26)

3. Hukum Konservasi Energi

Konsep dari hukum konservasi energi adalah laju perubahan energi dalam suatu elemen sama dengan jumlah fluks panas yang masuk ke elemen itu dan laju kerja yang bekerja pada elemen oleh gaya yang ada pada bodi dan permukaannya. Berikut persamaan konservasi energi pada elemen fluida 3 dimensi. (Budiman Yudha, 2015 : 27)

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho c v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho c w T)}{\partial z} = & -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \rho q - p(\nabla \cdot V) + \Phi \dots\dots\dots(6.) \end{aligned}$$

(Sumber : Budiman Yudha, 2015 : 29)

E. *Computational Fluid Dynamic (CFD)*

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

Pada dasarnya, persamaan-persamaan pada fluida dibangun dan dianalisis berdasarkan persamaan-persamaan diferensial parsial ($PDE = \textit{Partial Differential Equation}$) yang mengaplikasikan hukum-hukum konservasi massa, momentum dan energi. (Firman Tuakia, 2008 : 2)

CFD memprediksi aliran berdasarkan:

- model matematika (persamaan diferensial parsial), khususnya memecahkan persamaan Navier-Stokes;
- metode numerik (teknik solusi dan diskritisasi);
- tools perangkat lunak (*solvers, tools pre- dan post processing*). (Firman Tuakia, 2008 : 2)

CFD dapat dipergunakan bagi:

- Arsitek untuk mendesain ruang atau lingkungan yang aman dan nyaman.
- Desainer kendaraan untuk meningkatkan karakter aerodinamiknya.
- Analisis kimia untuk memaksimalkan hasil dari reaksi kimia dalam peralatan mereka.
- Insinyur petrokimia untuk strategi optimal dari *oil recovery*.
- Ahli biomekanik untuk mencari rahasia dari gerakan burung sampai dengan ikan lumba-lumba.

- Pelatih atau analis sport, misalnya untuk mencari rahasia tendangan melengkung pada sepak bola.
- Dokter atau ahli bedah untuk mengobati penyakit arterial (*computational hemodynamics*).
- Meteorologis (ahli cuaca) untuk meramalkan cuaca dan memperingatkan akan terjadinya bencana alam.
- Ahli *safety* untuk mengurangi resiko kesehatan akibat radiasi dan zat berbahaya lainnya.
- Analisis *failure* untuk mencari sumber-sumber kegagalan misalnya pada suatu sistem pembakaran atau aliran uap panas.
- Organisasi militer untuk mengembangkan senjata dan mengestimasi seberapa besar kerusakan yang diakibatkannya. (Firman Tuakia, 2008 : 3)



Hasil percobaan

Hasil CFD

Gambar 16. Perbandingan hasil percobaan dengan hasil CFD

(Sumber : Firman Tuakia, 2008 : 3)

Penggunaan CFD umumnya berhubungan dengan keempat hal berikut:

- Studi konsep dari desain baru
- Pengembangan produk secara detail
- Analisis kegagalan atau troubleshooting

- Desain ulang

Analisis CFD membantu percobaan/ testing, bahkan bisa jadi tidak perlu lagi dilakukan percobaan/ testing.

1. Manfaat *Computational Fluid Dynamic* (CFD)

Terdapat tiga alasan kuat dalam menggunakan CFD, antara lain:

a. *Insight* – Pemahaman Mendalam

Jika mendesain sebuah sistem atau alat yang sulit untuk dibuat prototipenya atau sulit untuk dilakukan pengujian, analisis CFD memungkinkan untuk merangkak, merayap dan menyelinap masuk secara virtual kedalam alat/ sistem, disaksikan melalui CFD yang tidak dapat dilihat lewat cara yang lainnya.

b. *Foresight* – Prediksi Menejelajah

Dikarenakan CFD adalah alat untuk memprediksi apa yang akan terjadi pada alat/ sistem yang desain dengan satu atau lebih kondisi batas, CFD dapat menjawab dengan cepat pertanyaan tipikal, “Bagaimana jika?”. Dengan mengubah-ubah kondisi batas (variasi kondisi batas), bisa segera menentukan mana desain yang optimal.

c. *Efficiency* – Efisiensi Waktu dan Biaya

Foresight yang diperoleh dari CFD membantu untuk mendesain lebih cepat dan hemat biaya. Analisis/ analisis *numerical* CFD akan memperpendek waktu riset dan desain sehingga juga akan mempercepat produk untuk sampai ke pasaran. (Firman Tuakia, 2008 : 4-5)

2. Proses Analisis *Numerical* CFD

Pada umumnya terdapat tiga tahapan yang harus dilakukan ketika melakukan analisis *numerical* CFD, yaitu *pre-processing*, *solving* dan *post-processing*.

a. *Pre-processing*

Pre-processing merupakan langkah pertama dalam membangun dan menganalisis sebuah model CFD. Teknisnya adalah membuat model dalam paket CAD (*Computer Aided Design*), membuat *mesh* yang sesuai, kemudian menerapkan kondisi batas dan sifat-sifat fluidanya.

b. *Solving*

Solvers (program inti pencari solusi) CFD menghitung kondisi-kondisi yang diterapkan pada saat *pre-processing*.

c. *Post-processing*

Post-processing adalah langkah terakhir dalam analisis CFD. Hal yang dilakukan pada langkah ini adalah mengorganisasi dan menginterpretasi data hasil analisis *numerical* CFD yang bisa berupa gambar, kurva, dan animasi. (Firman Tuakia, 2008 : 6)

Beberapa prosedur yang digunakan pada semua pendekatan program CFD, yaitu sebagai berikut:

- a. Pembuatan geometri dari model/ *problem*.
- b. Bidang atau *volume* yang diisi fluida dibagi menjadi sel-sel kecil (*meshing*).

- c. Pendefinisian model fisiknya, misalnya: persamaan-persamaan gerak + entalpi + konversi *species* (zat-zat yang kita definisikan, biasanya berupa komponen dari suatu reaktan).
- d. Pendefinisian kondisi-kondisi batas, termasuk didalamnya sifat-sifat dan perilaku dari batas-batas model/ problem. Untuk kasus transient, kondisi awal juga didefinisikan.
- e. Persamaan-persamaan matematika yang membangun CFD diselesaikan secara iterasi, bisa dalam kondisi tunak (*steady state*) atau *transient*.
- f. Analisis dan visualisasi dari solusi CFD. (Firman Tuakia, 2008 : 7)

3. Metode Diskritisasi CFD

CFD sebenarnya mengganti persamaan-persamaan diferensial parsial dari kontinuitas, momentum, dan energi menjadi persamaan-persamaan aljabar. CFD merupakan pendekatan dari persoalan yang asalnya kontinum (memiliki jumlah sel tak terhingga) menjadi model yang diskrit (jumlah sel terhingga).

Perhitungan/ komputasi aljabar untuk memecahkan persamaan-persamaan diferensial parsial ini, ada beberapa metode (metode diskritisasi), diantaranya adalah:

- Metode beda hingga (*finite difference method*)
- Metode elemen hingga (*finite elements method*)
- Metode volume hingga (*finite volume method*)
- Metode elemen batas (*boundary element method*)
- Metode skema resolusi tinggi (*high resolution scheme method*). (Firman Tuakia, 2008 : 7)

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

F. Metode CFD Menggunakan Perangkat Lunak Ansys Fluent

CFD memungkinkan penyelesaian persamaan pembentuk aliran dengan menggunakan suatu perhitungan numerik yang disebut dengan metode *volume* hingga (*finite volume methods*). Untuk memudahkan perhitungan numerik, telah tersedia banyak perangkat lunak komputer. Salah satu perangkat lunak yang terkenal dalam perhitungan dan analisis *numerical* CFD adalah Ansys Fluent. (Faisal Hajj, 2013 : 30)

1. Ansys Fluent

Ansys Fluent adalah salah satu jenis Ansys Fluent program CFD yang menggunakan metode *volume* hingga. Ansys Fluent menyediakan fleksibilitas *mesh* yang lengkap, sehingga dapat menyelesaikan kasus aliran fluida dengan *mesh (grid)* yang tidak terstruktur sekalipun dengan cara yang relatif mudah. (Firman Tuakia, 2008 : 133)

Ansys Fluent menggunakan teknik kontrol *volume* untuk mengubah persamaan pembentuk aliran menjadi persamaan aljabar sehingga dapat diselesaikan secara numerik. Teknik berbasis *volume control* ini mengandung pengintegralan setiap persamaan pembentuk aliran pada tiap-tiap *volume control*, menghasiskan persamaan-persamaan diskrit yang mengkonservasikan tiap jumlah yang ada pada *volume control*. (Faisal Hajj, 2013 : 30)

Secara lengkap langkah-langkah Ansys Fluent dalam menyelesaikan suatu analisis *numerical*/ masalah adalah sebagai berikut:

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

(Firman Tuakia, 2008 : 138)

2. Skema Numerik

Ansys Fluent memberikan dua pilihan metode numerik, yaitu metode *segregated* dan *coupled*. Kedua metode tersebut dapat digunakan untuk memecahkan persamaan integral kekekalan momentum, massa, dan energi (*governing integral equation*), serta besaran skalar lainnya seperti turbulensi. Dalam proses pemecahan masalah, baik metode *segregated* dan

coupled memiliki persamaan yaitu menggunakan teknik berbasis *volume control*. Teknik berbasis *volume control* sendiri terdiri dari:

- a. Pembagian daerah asal (*domain*) ke dalam kontrol *volume* diskrit dengan menggunakan grid komputasi.
- b. Integrasi persamaan umum kontrol *volume* untuk membuat persamaan aljabar dari variabel tak-bebas yang berlainan (*discrete dependent variables*) seperti kecepatan, tekanan, suhu, dan sebagainya.
- c. Linearisasi persamaan dan solusi diskritisasi dari resultan sistem persamaan linear untuk menghasilkan nilai taksiran variabel tak-bebas.

Pada dasarnya metode *segregated* dan *coupled* memiliki persamaan dalam proses diskritisasi yaitu *volume* hingga (*finite volume*), tetapi memiliki perbedaan pada cara pendekatan yang digunakan untuk melinearisasi dan memecahkan suatu permasalahan. (Budiman Yudha, 2015 : 31)

a. Metode Solusi *Segregated*

Metode ini menyelesaikan persamaan kekekalan massa, momentum, dan energi secara bertahap atau terpisah satu sama lain. Karena persamaan kekekalan massa, momentum, dan energi merupakan persamaan non-linear, beberapa iterasi harus dilakukan secara berulang-ulang sebelum solusi yang konvergen diperoleh. Dalam iterasi terdiri dari beberapa langkah, yaitu:

- 1) Sifat-sifat fluida diperbaharui berdasarkan solusi yang telah dilakukan.

Untuk perhitungan awal, sifat-sifat fluida diperbaharui berdasarkan solusi awal (*initialized solution*).

- 2) Persamaan momentum u , v , dan w dipecahkan dengan menggunakan nilai-nilai tekanan dan fluks massa permukaan, supaya medan kecepatan diperbaharui.
- 3) Karena kecepatan yang diperoleh dalam tahap yang pertama tidak mungkin memenuhi persamaan kontinuitas secara lokal, persamaan “*Poisson-type*” untuk koreksi tekanan diturunkan dari persamaan kontinuitas dan persamaan momentum linear. Persamaan koreksi tekanan ini kemudian dipecahkan untuk memperoleh koreksi yang dibutuhkan untuk medan tekanan dan kecepatan serta fluks massa permukaan sampai kontinuitas dipenuhi.
- 4) Menyelesaikan persamaan-persamaan untuk besaran skalar seperti turbulensi, energi, radiasi dengan menggunakan nilai-nilai variabel lain yang telah diperbaharui.
- 5) Mengecek konvergensi persamaan. (Budiman Yudha, 2015 : 31-32)

b. Metode Solusi *Coupled*

Metode ini menyelesaikan persamaan kekekalan massa, momentum, dan energi secara serempak atau bersamaan (*simultaneously*). Karena persamaan kekekalan massa, momentum, dan energi merupakan persamaan non-linear, beberapa iterasi harus dilakukan secara berulang-ulang sebelum solusi yang konvergen diperoleh. Dalam iterasi terdiri dari beberapa langkah, yaitu :

- 1) Sifat-sifat fluida diperbaharui berdasarkan solusi yang telah dilakukan. Untuk perhitungan awal, sifat-sifat fluida diperbaharui berdasarkan solusi awal (*initialized solution*).

- 2) Persamaan kontinuitas, momentum, dan energi jika ada serta besaran-besaran tertentu lainnya dipecahkan secara bersamaan.
- 3) Jika ada, persamaan-persamaan skalar seperti turbulensi dan radiasi dipecahkan dengan menggunakan nilai yang diperbaharui sebelumnya berdasarkan variabel yang lain.
- 4) Mengecek konvergensi persamaan. (Budiman Yudha, 2015 : 32)

3. Diskritisasi (*Discretization*)

Ansys Fluent menggunakan suatu teknik berbasis *volume control* untuk mengubah bentuk persamaan umum (*governing equation*) ke bentuk persamaan aljabar (*algebraic equation*) agar dapat dipecahkan secara numerik. Teknik berbasis *volume control* adalah pengintegralan persamaan diferensial umum untuk setiap *volume control*, sehingga menghasilkan suatu persamaan diskrit yang menetapkan setiap besaran pada suatu basis *volume control*.

a. *First-Order Upwind*

Ketika menginginkan keakuratan (*accuracy*) orde-pertama, besaran-besaran sisi sel ditentukan dengan cara mengasumsikan bahwa nilai-nilai pusat-sel pada beberapa variabel medan menggambarkan nilai rata-rata sel dan berlaku untuk seluruh sel; besaran-besaran sisi identik dengan besaran-besaran sel. Oleh karena itu, ketika *first-order upwind* dipilih, nilai sisi diatur sama dengan nilai- pusat pada sel *upstream*. (Faisal Hajj, 2013 : 35)

b. *Second-Order Upwind*

Ketika menginginkan keakuratan (*accuracy*) orde-kedua, besaran-besaran pada sisi sel ditentukan dengan menggunakan suatu pendekatan *rekonstruksi linear multidimensi*. Dalam pendekatan ini, keakuratan orde yang lebih tinggi diperoleh pada sisi-sisi sel melalui *ekspansi deret Taylor* berdasarkan solusi pusat sel di sekitar *sentroid* sel. (Sumber : Faisal Hajj, 2013 : 35)

4. Model *Volume of Fluid* (VOF)

Volume of Fluid (VOF) dapat memodelkan dua atau lebih cairan/ fase yang tak dapat dicampur dengan memecahkan satu rangkaian persamaan momentum dan menelusuri pecahan *volume* masing-masing cairan di seluruh domain. (Budiman Yudha, 2015 : 35)

Pembatasan berikut berlaku untuk model *Volume of Fluid* (VOF) di Ansys Fluent:

- a. Harus menggunakan *solver* berbasis tekanan. Model *Volume of Fluid* (VOF) tidak tersedia dengan *solver* berbasis-*density*.
- b. Semua *volume control* harus diisi baik dengan *fphase* cairan tunggal atau kombinasi dari *fphase*. Model *Volume of Fluid* (VOF) tidak memungkinkan untuk daerah dimana tidak ada kekosongan cairan jenis apa pun hadir.
- c. Hanya satu dari *fphase* dapat didefinisikan sebagai gas ideal kompresibel. Tidak ada batasan untuk menggunakan cairan kompresibel menggunakan fungsi *user-defined*.

- d. Searah aliran secara periodik (baik laju aliran massa tertentu atau penurunan tekanan tertentu) tidak dapat dimodelkan ketika model *Volume of Fluid* (VOF) digunakan.
- e. Formulasi *time-stepping* secara *implicit second-order* tidak dapat digunakan dengan skema *eksplicit Volume of Fluid* (VOF).
- f. Ketika menelusuri partikel bersamaan (*dispersed*), model DPM tidak dapat digunakan dengan model *Volume of Fluid* (VOF) jika opsi memori yang digunakan bersama diaktifkan. (Budiman Yudha, 2015 : 35-36)

Perumusan *Volume of Fluid* (VOF) di Ansys Fluent umumnya digunakan untuk menghitung solusi tergantung waktu (*transient*), tetapi untuk masalah di mana hanya fokus dengan solusi *steady-state*, memungkinkan untuk melakukan perhitungan *steady-state*. Perhitungan *Volume of Fluid* (VOF) *steady-state* adalah masuk akal hanya jika solusi bebas dari kondisi awal dan ada batas *inflow* yang berbeda untuk *individual phase*. Sebagai contoh, karena bentuk permukaan bebas di dalam cangkir berputar tergantung pada tingkat awal cairan, masalah tersebut harus diselesaikan dengan menggunakan formulasi tergantung waktu (*transient*). Di sisi lain, aliran air dalam saluran dengan wilayah udara di atas dan saluran masuk udara yang terpisah dapat diselesaikan dengan formulasi *steady-state*. (Budiman Yudha, 2015 : 36)

Perumusan *Volume of Fluid* (VOF) bergantung pada kenyataan bahwa dua atau lebih cairan (*phase*) yang tidak saling bercampur. Untuk setiap penambahan *phase* yang ditambahkan ke model, variabel diberitahu: pecahan *volume* dari *phase* dalam sel komputasi. Dalam setiap *volume control*,

pecahan *volume* semua jumlah *phase* menjadi satu. Bidang untuk semua variabel dan properti dibagi oleh *phase* dan mewakili nilai-nilai *volume* rata-rata, sepanjang pecahan *volume* setiap *phase* dikenal di setiap lokasi. Dengan demikian variabel dan properti di setiap sel yang diberikan adalah juga murni mewakili dari salah satu *phase*, atau mewakili dari campuran *phase*, tergantung pada nilai pecahan *volume*. (Budiman Yudha, 2015 : 36)

5. Model Turbulen (*Turbulence Modelling*)

Aliran turbulen adalah suatu karakteristik yang terjadi karena adanya peningkatan kecepatan aliran. Peningkatan ini mengakibatkan perubahan momentum, energi, dan massa tentunya. Karena terlalu mahal untuk melakukan analisa secara langsung dari aliran turbulen yang memiliki skala kecil dengan frekuensi yang tinggi, maka diperlukan suatu manipulasi agar menjadi lebih mudah dan murah. Salah satunya adalah dengan permodelan turbulen (*turbulence model*). Meskipun demikian, modifikasi persamaan yang meliputi penambahan variabel yang tidak diketahui, dan permodelan turbulen perlu untuk menentukan variabel yang diketahui. Fluent sendiri menyediakan beberapa permodelan, diantaranya adalah $k-\varepsilon$ dan $k-\omega$. (Budiman Yudha, 2013 : 37-38)

a. Model k-epsilon ($k-\varepsilon$)

1) k-epsilon ($k-\varepsilon$) Standard

Model *k-epsilon* standar 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 (*independent*). Model ini dikembangkan oleh Launder dan Spalding. Kestabilan, ekonomis (dari segi komputasi), dan akurasi yang memadai untuk berbagai jenis aliran turbulen membuat model *k-epsilon* standar sering digunakan pada analisis *numerical* fluida dan perpindahan panas. Untuk meningkatkan keandalan model *k-epsilon* standar telah terdapat beberapa varian dari model ini, dua diantaranya terdapat pada Ansys Fluent, yaitu: model *k-epsilon* RNG dan model *k-epsilon* Realizable. (Firman Tuakia, 2008 : 151)

2) **k-epsilon ($k-\varepsilon$) RNG**

Model ini diturunkan dengan menggunakan metode statistik yang diteliti (teori renormalisasi kelompok). Bentuk persamaan yang digunakan sama dengan model *k-epsilon* standar tetapi melibatkan beberapa perbaikan, sebagai berikut:

- 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*).
- Model RNG menyediakan formulasi analitis untuk bilangan *Prandtl* turbulen, sementara model *k-epsilon standard* menggunakan nilai bilangan *Prandtl* yang konstan (ditentukan oleh pengguna).

- Model RNG menyediakan formulasi untuk bilangan *Reynolds* rendah, sedangkan model *k-epsilon standard* merupakan model untuk kasus dengan bilangan *Reynolds* tinggi. (Firman Tuakia, 2008 : 151-152)

3) **k-epsilon ($k-\epsilon$) Realizable**

Merupakan model pengembangan yang relatif baru dan berbeda dengan model *k-epsilon standard* dalam dua hal, yaitu:

- Terdapat formulasi baru untuk memodelkan viskositas turbulen.
- Sebuah persamaan untuk epsilon telah diturunkan dari persamaan yang digunakan untuk menghitung fluktuasi vortisitas rata-rata. (Firman Tuakia, 2008 : 152)

Istilah *realizable* memiliki arti bahwa model tersebut memenuhi beberapa batasan matematis pada bilangan *Reynolds*, konsisten dengan bentuk fisik aliran turbulen. Kelebihannya adalah lebih akurat untuk memprediksi laju penyebaran fluida dari pancaran jet/ nosel. Model ini memberikan performa yang bagus untuk aliran yang melibatkan putaran, lapisan batas yang memiliki gradien tekanan yang besar, separasi, dan resirkulasi. (Firman Tuakia, 2008 : 152)

Salah satu keterbatasan model *realizable k-epsilon* adalah terbentuknya viskositas turbulen non-fisik pada kasus dimana domain perhitungan mengandung zona fluida yang diam dan berputar (*multiple reference frame, sliding mesh*). Oleh karena itu, penggunaan model ini pada kasus *multiple reference frame* dan *sliding mesh* harus lebih hati-hati. (Firman Tuakia, 2008 : 152)

b. Model k-omega ($k-\omega$)

1) k-omega Standard

Model *k-omega* standar yang terdapat dalam Ansys Fluent merupakan model berdasarkan model *Wilcox k-omega* yang memasukkan beberapa modifikasi untuk menghitung efek aliran pada bilangan *Reynolds* rendah, kompresibilitas dan penyebaran aliran geser (*shear flow*). Selain itu, model ini juga mampu diaplikasikan untuk aliran dalam saluran maupun aliran bebas geseran (*free shear flow*). (Firman Tuakia, 2008 : 152)

2) k-omega SST

Model ini dikembangkan oleh *Menter* untuk memadukan formulasi model *k-omega standard* yang stabil dan akurat pada daerah dekat ke dinding dengan model *k-epsilon* yang memiliki kelebihan pada aliran *free stream*. Untuk mencapai hal tersebut, model *k-epsilon* diubah menjadi *k-omega SST*. Model *k-omega SST* mirip dengan *k-omega standard*, tetapi dengan beberapa perbaikan, yaitu:

- Model *k-omega standard* dan *k-epsilon* yang telah diubah dikalikan dengan suatu fungsi pencampuran dan kedua model digunakan bersama-sama, sehingga lebih akurat untuk daerah dekat dinding maupun untuk aliran yang jauh dari dinding dan *free stream flow*.
- Definisi viskositas turbulen dimodifikasi untuk menghitung perubahan tegangan geser turbulen.
- Konstanta model berbeda dengan model *k-omega standard*.

- Melibatkan sebuah besaran dari penurunan *damped cross diffusion* pada persamaan *omega*. (Firman Tuakia, 2008 : 153)

Dengan adanya fitur-fitur tersebut membuat model *k-omega* SST lebih akurat dan reliabel untuk cakupan jenis aliran yang lebih luas daripada model *k-omega* standar. (Firman Tuakia, 2008 : 153)

c. Model Reynold Stress (RSM)

Model Reynold Stress (RSM) merupakan model turbulensi yang paling teliti pada Ansys Fluent. RSM mendekati persamaan *Navier Stokes (Reynold-averaged)* dengan menyelesaikan persamaan *transport* untuk tegangan Reynolds bersama-sama dengan persamaan laju disipasi. Hal ini berarti dibutuhkan 4 persamaan *transport* tambahan pada aliran 2D dan 7 persamaan *transport* tambahan pada aliran 3D yang berarti proses komputasi yang terjadi juga lebih panjang dan berat. (Firman Tuakia, 2008 : 153)

Karena RSM menghitung efek dari kurva *streamline*, pusaran (*swirl*), putaran, dan perubahan tiba-tiba pada aliran dengan lebih teliti daripada model dengan satu dan dua persamaan, maka RSM dapat memberikan prediksi yang lebih akurat untuk aliran yang kompleks. Bagaimanapun juga, kebenaran dari prediksi RSM masih dibatasi oleh asumsi yang diterapkan pada model. (Firman Tuakia, 2008 : 153)

RSM tidak selalu memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan model yang lebih sederhana (dengan 1 atau 2 persamaan) pada semua jenis aliran dengan komputasi yang lebih berat. Tetapi RSM harus digunakan ketika pada aliran terdapat anisotropi dari tegangan *Reynolds*, seperti aliran dalam

siklon, aliran yang berpusar dalam *combustor*, aliran yang melewati lintasan yang berputar, tegangan pada aliran yang disebabkan aliran sekunder dalam saluran. (Firman Tuakia, 2008 : 154)

RSM membutuhkan memori (RAM), daya komputasi tambahan dan waktu komputasi yang lebih lama dibandingkan model *k-epsilon* dan *k-omega* karena persamaan yang harus diselesaikan lebih banyak. Rata-rata RSM membutuhkan waktu komputasi 50 – 60 % lebih lama (per iterasi) jika dibandingkan dengan model *k-epsilon* dan model *k-omega*. Selain daya dan waktu komputasi, pemilihan model turbulensi dapat mempengaruhi *Ansys Fluent* untuk memperoleh solusi yang konvergen. (Firman Tuakia, 2008 : 157)

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, penulis mendapat beberapa kesimpulan, sebagai berikut:

1. Hasil analisis *numerical* paling maksimal yang diperoleh penulis adalah pada analisis *numerical* RNG k-e.06 dengan *Outlet Velocity* 1.52 m/s dan yang paling minimum adalah pada analisis *numerical* RNG k-e.01 dengan *Outlet Velocity* 1.20 m/s.
2. *Output Velocity* yang diperoleh penulis dari hasil analisis *numerical* RNG k-e.01 (1.20 m/s), RNG k-e.03 (1.31 m/s) dan RNG k-e.04 (1.36 m/s) lebih kecil dari 1.45 m/s , kemudian dari hasil analisis *numerical* RNG k-e.02 (1.47 m/s), RNG k-e.05 (1.48 m/s) dan RNG k-e.06 (1.52 m/s) lebih besar dari 1.45 m/s. Dimana 1.45 m/s itu adalah *Output Velocity* hasil analisis *numerical* pada penelitian O. B. Yakoob, dkk.
3. Nilai *difference* 7 % antara *Experimental Outlet Velocity* dengan *Fluent Outlet Velocity* hasil penelitian O. B. Yakoob, dkk. pada Rumah *Water Vortex Turbine* dengan *water depth* 200 mm dan *inlet velocity* 0.20 m/s, dapat dikurangi oleh penulis menjadi 2.6 % , dimana *Experimental Output Velocity* hasil penelitian O. B. Yakoob, dkk. sebesar 1.56 m/s dan *Fluent Outlet Velocity* yang diperoleh penulis dari hasil analisis *numerical* RNG k-e.06 sebesar 1.52 m/s.

4. Dalam penelitian ini ada 3 hal yang dapat meningkatkan *Output Velocity* hasil analisis *numerical* menggunakan aplikasi Ansys Fluent, yaitu:
 - a. *Output Velocity* pada Rumah Water Vortex Turbine dengan *water depth* 200 mm dan *inlet velocity* 0.20 m/s, dapat dinaikkan dengan cara menggunakan *spatial discretization volume fraction Modified HRIC*.
 - b. *Output Velocity* pada Rumah Water Vortex Turbine dengan *water depth* 200 mm dan *inlet velocity* 0.20 m/s, dapat dinaikkan dengan cara menggunakan *Hybrid Initialization*.
 - c. *Output Velocity* pada Rumah Water Vortex Turbine dengan *water depth* 200 mm dan *inlet velocity* 0.20 m/s, dapat dinaikkan dengan cara menggunakan nilai *U-RF Pressure* 0.3, nilai *U-RF Turbulent Kinetic Energy* 0.7, dan nilai *U-RF Turbulent Dissipation Rate* 0.7 .
5. Hasil analisis *numerical* aplikasi Ansys Fluent versi 16.2 dapat dijadikan menjadi bahan pertimbangan sebelum melakukan pengujian eksperimental dan hasil analisis *numerical* aplikasi Ansys Fluent versi 16.2 dapat digunakan tanpa melakukan pengujian eksperimental.

B. Saran

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penelitian yang telah dilakukan, berdasarkan hal tersebut ada beberapa saran yang dapat penulis berikan kepada peneliti selanjutnya, yaitu:

1. Menjadikan Rumah Water Vortex Turbine dengan *water depth* 100 mm dan *water depth* 150 mm sebagai objek penelitian, karena nilai *difference* yang tinggi.

2. Melakukan analisis *numerical* aliran fluida menggunakan model turbulen *k-omega SST* dan *RSM*, dengan tujuan untuk mengetahui perbedaan hasil analisis *numerical* antara *k-epsilon RNG*, *k-omega SST* dan *RSM*.
3. Melakukan analisis *numerical* aliran fluida dengan *Multiphase Model Volume of Fluid* menggunakan *residual monitor* 0.000001 atau 1e-06, karena nilai *Volume Fraction Cutoff* 1e-06, dengan tujuan agar hasil *Iso-Surface Phase-2 Volume Fraction* lebih maksimal, tetapi membutuhkan waktu penghitungan iterasi yang lebih lama dibandingkan menggunakan *residual monitor* 0.001 atau 1e-03.
4. Dalam melakukan analisis *numerical* aliran fluida menggunakan Ansys Fluent versi 16.2 membutuhkan jenis *Processor* dan RAM komputer/ laptop yang *high-end* seperti Intel Core i3, Intel Core i5 dan Intel Core i7, sedangkan untuk RAM DDR3 minimal 4 Gb. Analisis *numerical* yang telah dilakukan penulis membutuhkan waktu penghitungan iterasi ± 6 jam dalam satu kali analisis *numerical*, dimana jenis *Processor* dan RAM yang digunakan adalah Intel Core i3 dan RAM DDR3 10 Gb.