



TUGAS AKHIR - TF 181801

**SIMULASI DAN UJI EKSPERIMENTAL KINERJA TURBIN
VORTEKS *OPEN FLUME* DENGAN VARIASI *INLET
NOTCH*, *LEVEL AIR* PADA *ROTATION TANK* DAN
GEOMETRI *DRAFT TUBE***

M. RIZAL RIZKI HANSYAH
NRP. 02311745000023

Dosen Pembimbing
Ir. SARWONO, M.M.
ERNA SEPTYANINGRUM, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2019



TUGAS AKHIR - TF 181801

**SIMULASI DAN UJI EKSPERIMENTAL KINERJA
TURBIN VORTEKS *OPEN FLUME* DENGAN VARIASI
INLET NOTCH, LEVEL AIR PADA *ROTATION TANK*
DAN GEOMETRI *DRAFT TUBE***

M. RIZAL RIZKI HANSYAH
NRP 02311745000023

Dosen Pembimbing
Ir. Sarwono, M.M.
Erna Septyaningrum, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



FINAL PROJECT - TF181801

***SIMULATION AND EXPERIMENTAL THE EFFECT
OF INLET NOTCH, WATER LEVEL IN ROTATION
TANK AND DRAFT TUBE GEOMETRY VARIATION
ON THE PERFORMANCE OF OPEN FLUME TURBINE
VORTEX***

*M Rizal Rizki Hansyah
NRP. 02311745000023*

SUPERVISOR
Ir. Sarwono, M.M.
Erna Septyaningrum, S.T., M.T.

*Departement of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2019*

PERNYATAAN BEBAS PLAGIRISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : M. Rizal Rizki Hansyah
NRP : 0231174500023
Departemen : Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Institusi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir saya yang berjudul “Simulasi dan Uji Ekperimental Kinerja Turbin *Vortex Open Flume* dengan Variasi *Inlet Notch*, Level Air pada *Rotation Tank* dan Geometri Draft Tube” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 24 Juli 2019
Yang membuat pernyataan,



M. Rizal Rizki Hansyah
NRP. 0231174500023

LEMBAR PENGESAHAN

**SIMULASI DAN UJI EKSPERIMENTAL KINERJA TURBIN
VORTEX OPEN FLUME DENGAN VARIASI INLET NOTCH,
LEVEL AIR PADA ROTATION TANK DAN GEOMETRI
DRAFT TUBE**

TUGAS AKHIR

Oleh :

**M. Rizal Rizki Hansyah
NRP : 0231174500023**

Surabaya, 24 Juli 2019

Mengetahui,

Pembimbing I,



**Ir. Sarwono, MM
NIP. 19560720 198503 1 003**

Pembimbing II



**Erna Septyaningrum, S.T., M.T
NPP. 1992201912073**

Menyetujui,

Kepala Departemen Teknik Fisika FTI-ITS



**Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIP. 19780902 200312 1 002**

**LEMBAR PENGESAHAN
SIMULASI DAN UJI EKSPERIMENTAL KINERJA TURBIN
VORTEX OPEN FLUME DENGAN VARIASI *INLET NOTCH*,
LEVEL AIR PADA *ROTATION TANK* DAN GEOMETRI
*DRAFT TUBE***

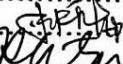
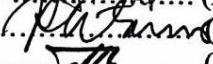
TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**M. RIZAL RIZKI HANSYAH
NRP. 0231174500023**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Ir. Sarwono, MM  (Pembimbing I)
2. Erna Septyaningrum, S.T., M.T.  (Pembimbing II)
3. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  (Penguji I)
4. Ir. Roekmono, M.T  (Penguji II)

**SURABAYA
JULI, 2019**

**SIMULASI DAN UJI EKSPERIMENTAL KINERJA TURBIN
VORTEX OPEN FLUME DENGAN VARIASI *INLET NOTCH*,
LEVEL AIR PADA *ROTATION TANK* DAN GEOMETRI
*DRAFT TUBE***

Nama : M. Rizal Rizki Hansyah
NRP : 023117400023
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Sarwono, MM
Erna Septyaningrum, S.T, M.T

ABSTRAK

Picohydro merupakan salah satu jenis alat yang digunakan untuk mengkonversi energi dari air menjadi energi listrik dengan daya keluaran kurang dari 5 kW. Salah satu turbin yang termasuk kedalam jenis *picohydro* adalah turbin vorteks *open flume*. Pada penelitian ini dilakukan penelitian mengenai turbin vorteks *open flume* dengan dua metode yaitu metode eksperimen dan metode simulasi. Metode eksperimen dilakukan untuk memperoleh data berupa kecepatan aliran, RPM dan torsi pada poros. Data eksperimen tersebut digunakan sebagai data *input-an* pada simulasi sehingga dari simulasi akan diperoleh hasil *streamline* kecepatan, tekanan, *isosurface* yang digunakan sebagai analisis pendukung untuk menjelaskan fenomena-fenomena yang tidak dapat dilihat ketika eksperimen. Berdasarkan eksperimen dan simulasi diperoleh hasil bahwa daya poros terbesar yaitu 4,06 W dengan konfigurasi sudut *inlet* sebesar 13°, ketinggian air didalam *rotation tank* 300 mm dan posisi *draft tube* 100 mm dibawah *tail race*, sedangkan daya poros terendah sebesar 1,56 W dengan konfigurasi sudut *inlet* 0°, ketinggian air 100 mm dan posisi *draft tube* 100 mm diatas *tail race*. Nilai efisiensi pada penelitian ini terdiri dari 3 macam berdasarkan debit alirannya, dari ketiga macam efisiensi diperoleh efisiensi tertinggi pada kondisi *draft tube* 100 mm dibawah *tail race*. Sehingga posisi dari *draft tube* memberikan pengaruh terhadap efisiensi turbin.

Kata kunci : Daya poros, efisiensi, ketinggian air, *Picohydro*, turbin vorteks *open flume*, posisi *draft tube*, sudut *inlet*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

***SIMULATION AND EXPERIMENTAL THE EFFECT OF
INLET NOTCH, WATER LEVEL IN ROTATION TANK AND
DRAFT TUBE GEOMETRY VARIATION ON THE
PERFORMANCE OF OPEN FLUME TURBINE VORTEX***

Name : M. Rizal Rizki Hansyah
NRP : 023117400023
Departement : Teknik Fisika FTI-ITS
Supervisor : Ir. Sarwono, MM
Erna Septyaningrum, S.T, M.T

ABSTRACT

Picohydro is one type to convert energy from water to electrical energy with an output power less than 5 kW. One of the pico hydro type is the open flume turbine vortex. In this study, research on open flume turbine vortex was conducted with two methods, the experimental and the simulation method. The experimental method is carried out to obtain data in the form of flow velocity, RPM and torque on the shaft. The experimental data is used as input data in the simulation so that the simulation results will be obtained streamlined speed, pressure, isosurface which is used as a support analyzer to explain phenomena that cannot be seen during experiments. Based on experiments and simulations the results showed that the largest shaft power was 4.06W with an inlet angle configuration 13°, water level 300 mm in rotation tank and draft tube position 100 mm below the tailrace, while the lowest shaft power was 1.56 W with configuration inlet angle 0°, water level 100 mm and position of the draft tube 100 mm above the tailrace. The efficiency value in this study consisted of 3 types based on flowrate, from the three types of efficiency the highest efficiency was obtained in the condition of a 100 mm draft tube under the tailrace. So that the position of the draft tube affects turbine efficiency.

Keywords : *Efficiency, inlet notch, open flume vortex turbine, picohydro, position of draft tube, shaft power, water level.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena dengan rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “**Simulasi dan Uji Eksperimental Kinerja Turbin Vorteks *Open Flume* Dengan Variasi *Inlet Notch*, Level Air Pada *Rotation Tank* dan Geometri *Draft Tube*”**. Selama pengerjaan tugas akhir dan penyusunan laporan ini tidak terlepas dari bantuan segala pihak. Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Agus M. Hatta, S.T, M.Si, Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS.
2. Bapak Ir. Sarwono, M.M selaku dosen pembimbing pertama yang telah memberikan ilmu serta mengarahkan didalam penulisan buku ini.
3. Ibu Erna Septyaningrum, S.T, M.T selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan pengarahan dalam proses simulasi serta penyusunan buku tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Ridho Hantoro, S.T, M.T yang telah memberikan ilmu, pengarahan didalam penyusunan buku serta motivasi untuk menyelesaikan tugas akhir.
5. Keluarga yang selalu memberikan doa dan dukungan sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Teman-teman Lintas Jalur Teknik Fisika yang telah membantu didalam proses pengambilan data.
7. Teman-teman Laboratorium Rekayasa Energi yang telah memberikan tempat serta mengatur jadwal untuk penggunaan komputer.

Saya menyadari bahwa laporan tugas akhir ini jauh dari kata sempurna, oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat diperlukan guna memperbaiki pada laporan tugas akhir ini. Akhir kata semoga laporan tugas akhir ini bermanfaat bagi kita semua.

Surabaya, 24 Juli 2019

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

PERNYATAAN BEBAS PLAGIRISME	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
LEMBAR PENGESAHAN.....	ix
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Sistematika Laporan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 PLTA Skalata <i>Picohydro</i>	5
2.2 Sistem Turbin <i>Open Flume</i>	6
2.3 Turbin Kaplan	8
2.4 Saluran Masuk.....	10
2.5 Sudu Pengarah.....	10
2.6 <i>Draft Tube</i>	11
2.7 Vorteks	15
2.8 Simulasi CFD.....	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1 Studi Literatur	24
3.2 Identifikasi dan Perumusan Masalah.....	25
3.3 Pembuatan Turbin Vorteks <i>Open Flume</i>	25
3.4 Pengujian Alat dan Pengambilan Data.....	28
3.5 Simulasi CFD.....	34
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Validasi Hasil Simulasi	41
4.2 Data Perbandingan Hasil Simulasi dengan Eksperimen ..	42
4.3 Pengaruh Variasi Sudut <i>Inlet</i> Terhadap RPM dan Torsi ..	44

4.4	Pengaruh Ketinggian Air di Rotation Tank Terhadap RPM dan Torsi	48
4.5	Pengaruh Perubahan Posisi dari <i>Draft Tube</i>	52
4.6	Kontur Vorteks yang Terjadi	59
4.7	Daya Poros Turbin	62
4.8	Effisiensi Turbin Vorteks <i>Open Flume</i>	63
4.9	Diskusi	66
BAB V	KESIMPULAN	69
5.1.	Kesimpulan	69
5.2.	Saran.....	69
DAFTAR PUSTAKA.....		71
LAMPIRAN		74

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Turbin <i>open flume</i>	7
Gambar 2.2	Turbin Kaplan	9
Gambar 2.3	Tipe saluran masuk dari turbin vorteks	10
Gambar 2.4	Tampilan dari sudut pengarah	11
Gambar 2.5	<i>Draft tube</i> pada Pembangkit Listrik Tenaga Air	12
Gambar 2.6	Tipe <i>straight draft tube</i>	13
Gambar 2.7	Tipe <i>bell mouth draft tube</i>	13
Gambar 2.8	<i>Curved draft tube</i> pada <i>Hydraulic Power Plant</i>	14
Gambar 2.9	Posisi eksperimen dari <i>draft tube</i> 100 mm dibawah <i>tail race</i>	15
Gambar 2.10	Aliran Vorteks	17
Gambar 2.11	Klasifikasi aliran vorteks	17
Gambar 2.12	Desain benda kerja.....	19
Gambar 2.13	<i>Displaying mesh</i> dari CFD.....	20
Gambar 2.14	<i>Displaying contours</i> dari <i>water volume fraction</i>	21
Gambar 2.15	<i>Displaying vectors</i> kecepatan air pada rotor	21
Gambar 2.16	<i>Displaying pathlines</i> dari <i>water volume fraction</i>	22
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	24
Gambar 3.2	Desain turbin vorteks <i>open flume</i>	26
Gambar 3.3	Pelat besi	27
Gambar 3.4	<i>Draft tube</i> dengan pipa PVC.....	27
Gambar 3.5	Hasil las <i>rotation tank</i> dan saluran masuk	28
Gambar 3.6	Tempat pengujian alat dan pengambilan data	28
Gambar 3.7	Dimensi dari sungai	29
Gambar 3.8	Data kecepatan dan debit sungai di Desa Sempur ...	30
Gambar 3.9	<i>Tachometer</i>	30
Gambar 3.10	Pengukuran gaya dengan neraca pegas	31
Gambar 3.11	<i>Current meter</i> pada saat proses pengukuran	31
Gambar 3.12	Busur untuk m.....	32
Gambar 3.13	Pengukuran ketinggian air dengan meteran	32
Gambar 3.14	<i>Runner</i> turbin	34
Gambar 3.15	Dimensi dari <i>Rotation tank</i>	35
Gambar 3.16	Dimensi dari <i>guide vanes</i>	36
Gambar 3.17	Hasil <i>mesh</i> (a) domain tangki, (b) domain <i>runner</i> ...	37

Gambar 3.18	Menentukan nilai torsi pada <i>result</i>	40
Gambar 4.1	Perbandingan torsi simulasi dengan eksperimen	43
Gambar 4.2	Pengaruh sudut <i>inlet</i> terhadap RPM pada data eksperimen	44
Gambar 4.3	Hasil <i>streamline</i> kecepatan pada (a) variasi 3, (b) variasi 12 dan (c) variasi 21	47
Gambar 4.4	Pengaruh sudut <i>inlet</i> terhadap torsi.....	47
Gambar 4.5	Grafik pengaruh ketinggian air terhadap RPM	48
Gambar 4.6	Grafik pengaruh ketinggian air terhadap torsi	50
Gambar 4.7	<i>Streamline</i> pada bagian rotor (a) ketinggian air 100 mm (b) ketinggian air 200 mm dan (c) ketinggian air 300 mm	51
Gambar 4.8	Grafik tekanan absolute pada <i>outlet draft tube</i> dengan variasi posisi <i>draft tube</i>	53
Gambar 4.9	Grafik kecepatan <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> pada variasi 25 (+100), variasi 26 (0) dan variasi 27 (-100).....	54
Gambar 4.10	Grafik kecepatan <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> pada variasi 13 (+100), variasi 14 (0) dan variasi 15 (-100).....	55
Gambar 4.11	Kontur kecepatan pada (a) variasi 25, (b) variasi 26 dan (c) variasi 27.....	57
Gambar 4.12	Pengaruh posisi <i>draft tube</i> terhadap torsi.....	58
Gambar 4.13	Tekanan <i>outlet runner</i> dan <i>outlet draft tube</i>	59
Gambar 4.14	Ketinggian air pada kondisi (a) 300 mm, (b) 200 mm dan (c) 100 mm	61
Gambar 4.15	Grafik batang daya pada beberapa variasi	62
Gambar 4.16	Effisiensi untuk debit 0,003 m ³ /detik.....	64
Gambar 4.17	Effisiensi untuk debit 0,0051 m ³ /detik.....	64
Gambar 4.18	Effisiensi untuk debit 0,0081 m ³ /detik.....	65

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Dimensi dari turbin vorteks	26
Tabel 3.2	Dimensi dari <i>runner</i>	35
Tabel 3.3	Dimensi dari <i>rotation tank</i> dan <i>draft tube</i>	36
Tabel 3.4	Pengaturan <i>meshing</i>	38
Tabel 3.5	Parameter <i>setup</i> CFX.....	39
Tabel 4.1	Hasil validasi simulasi dengan eksperimen	42
Tabel 4.2	Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen.....	43

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik dewasa ini bertumbuh sangat cepat, seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk. Oleh karena itu perlu adanya penelitian terhadap energi alternatif guna mencukupi kebutuhan listrik tersebut salah satunya yaitu energi air [1]. Potensi pembangkit energi air di Indonesia cukup besar, untuk pembangkit mini dan mikrohidro sendiri potensinya mencapai 460 MW dengan pemanfaatannya baru mencapai 228 MW [2].

Dengan melihat potensi pembangkit energi air yang cukup besar, maka dibuatlah suatu pembangkit listrik tenaga air. Jenis pembangkit listrik tenaga air ini sering disebut sebagai *picohydro*. *Picohydro* merupakan salah satu jenis alat untuk mengkonversi energi dari air menjadi energi listrik dengan daya skala kurang dari 5 kW [3]. Turbin *picohydro* yang digunakan pada tugas akhir ini adalah turbin *vortex* jenis *open flume* dan menggunakan turbin kaplan sebagai *runner*. Hal ini dikarenakan sudu pada turbin kaplan dapat diatur sesuai dengan beban. Turbin *vortex* adalah salah satu jenis turbin *picohydro* yang menggunakan pusaran air sebagai penggerak sudunya [4]. Selanjutnya hasil putaran dari sudu akan diteruskan menuju generator sehingga menghasilkan listrik. Didalam pembuatan turbin *vortex open flume* ini, terdapat salah satu komponen utama yaitu *draft tube* yang mempunyai fungsi utama untuk meningkatkan efisiensi turbin air dengan cara merubah energi kinetik menjadi energi potensial [5].

Draft tube adalah suatu komponen akhir lintasan air dari pembangkit listrik tenaga air. *Draft tube* ini diperlukan untuk membawa air keluar dari *runner* turbin dan menuju ke saluran bawah (*tail race*). *Draft tube* berperan penting untuk menciptakan tekanan hisap positif menggunakan energi kinetik yang dihasilkan pada saluran *runner* sehingga hal tersebut dapat meningkatkan keefektifan dalam menentukan *net head* [6]. Oleh karena itu, pemilihan dimensi dari *draft tube* merupakan salah satu cara yang digunakan untuk mengoptimalkan kinerja dari *draft tube*. Pemilihan dimensi merupakan salah satu cara yang dapat mengoptimalkan kinerja dari *draft tube*. Dimensi dari *draft tube* ini

dapat mencakup diameter dari *orifice draft tube*, geometri panjang dari *draft tube*. Pada penelitian ini, dilakukan variasi terhadap geometri panjang *draft tube*, yang mana ada 3 kondisi dari *draft tube* yaitu kondisi saat tercelup kedalam air yang ada di basin, kondisi saat berada di permukaan air dan kondisi saat berada di atas permukaan air. Selain itu juga dilakukan variasi terhadap ketinggian level air yang ada di *rotation tank* yang bertujuan untuk mengetahui volume air yang dapat menghasilkan performa turbin air yang baik. Untuk meningkatkan performa pada turbin air dapat melalui desain dari *inlet notch* dengan sudut tertentu. *Inlet notch* ini berfungsi untuk mengarahkan aliran air menuju turbin air, sehingga aliran air yang mengenai turbin dapat meningkatkan performa dari turbin [7].

Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan analisa pengaruh sudut *inlet* pada turbin reaksi aliran *vortex* terhadap daya dan juga efisiensi dari turbin air *vortex*. Pada penelitian tersebut sudut *inlet notch* yang diteliti adalah 0° , $7,26^\circ$, $13,32^\circ$, dan $17,82^\circ$. Pemilihan sudut pada *inlet notch* didasarkan pada kenaikan $\frac{1}{2}$ jari-jari dari diameter keluaran dari *rotation tank*. Selain itu, penelitian yang telah dilakukan oleh Yasuyuki Nishi dan Terumi Inagaki "Performance and Flow Field of a Gravitation Vortex Type Water Turbine" diperoleh hasil bahwa ketika kecepatan rotasi dari *runner* meningkat, maka torsi yang dihasilkan akan menurun dan *head* efektif meningkat [8].

Oleh karena itu dilakukanlah suatu penelitian mengenai turbin *vortex open flume* untuk mengetahui aliran *vortex* yang terbentuk dengan meninjau beberapa variabel yaitu geometri panjang dari *draft tube*, ketinggian level air didalam *rotation tank*, dan variasi sudut pada *inlet notch*. Selanjutnya dilakukan analisa menggunakan metode CFD dengan *software* CFD yang kemudian hasil dari simulasi akan di validasi dengan hasil dari uji eksperimental.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang masalah di atas, perumusan masalah dalam penelitian ini meliputi:

a. Bagaimana pengaruh dari sudut *inlet notch* terhadap daya

- pada turbin *vortex open flume*?
- b. Bagaimana pengaruh dari ketinggian level air di *rotation tank* terhadap daya pada turbin *vortex open flume*?
 - c. Bagaimana pengaruh ketinggian *draft tube* dari permukaan air pada *tail race* terhadap tekanan *outlet* yang terjadi?

1.3 Tujuan

Berdasarkan uraian latar belakang yang telah dipaparkan, tujuan dari penelitian yang dilakukan ini adalah sebagai berikut,

- a. Menganalisa pengaruh dari sudut *inlet notch* terhadap daya pada turbin *vortex open flume*.
- b. Menganalisa pengaruh dari ketinggian level air pada *rotation tank* terhadap daya pada turbin *vortex open flume*.
- c. Menganalisa pengaruh ketinggian *draft tube* dari permukaan air pada *tail race* terhadap tekanan *outlet* yang terjadi.

1.4 Batasan Masalah

Untuk menghindari meluasnya pembahasan, maka batasan masalah yang digunakan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- a. Variasi dari sudut *inlet notch* sebesar 0° , 7° , dan 13° .
- b. Variasi dari level air pada *rotation tank* sebesar 100 mm, 200 mm, dan 300 mm.
- c. Jenis *draft tube* yang digunakan pada rancang bangun turbin *vortex open flume* ini adalah jenis *straight*.
- d. Variasi ketinggian *draft tube* yaitu 100 mm diatas permukaan air *tail race* (+100), berada di permukaan air *tail race* (0), dan 100 mm dibawah permukaan air *tail race* (-100).
- e. Densitas air yang digunakan bernilai konstan, yaitu 1000 kg/m^3 .
- f. Nilai percepatan gravitasi yang digunakan bernilai konstan, yaitu $9,81 \text{ m/s}^2$.
- g. Jumlah sudu turbin yang digunakan sebanyak 3
- h. Jumlah sudu pengarah yang digunakan pada turbin *vortex* ini sebanyak 7 buah dengan sudut yang dibentuk sebesar 45°
- i. Penelitian ini tidak membahas mengenai kelistrikan.

1.5 Sistematika Laporan

Laporan tugas akhir ini disusun berdasarkan sistematika laporan sebagai berikut,

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan, lingkup kerja, dan sistematika laporan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang tinjauan pustaka yang digunakan dalam tugas akhir ini yang berupa teori dari turbin *open flume*, turbin Kaplan, *draft tube*, serta teori mengenai simulasi CFD.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tentang langkah-langkah yang dilakukan dalam pengerjaan tugas akhir ini yang terdiri dari studi literatur, penentuan parameter pengukuran serta geometri dari turbin *vortex* yang akan dibuat, pengujian dan pengambilan data secara eksperimen, proses simulasi dari hasil eksperimen dengan menggunakan *software* CFD.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas mengenai analisa hasil torsi serta daya yang diperoleh terhadap perubahan variabel bebas yaitu sudut *inlet notch*, ketinggian air di dalam *rotation tank* dan geometri dari *draft tube*.

BAB V PENUTUP

Bab ini menyediakan kesimpulan dari tujuan dilakukannya penelitian ini dan saran yang didapatkan setelah pengerjaan tugas akhir ini selesai.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 PLTA Skala *Pico*hydro

Pembangkit listrik tenaga air (PLTA) merupakan salah satu pembangkit listrik yang menggunakan energi terbarukan berupa air. PLTA sendiri mengandalkan energi potensial dan energi kinetik dari air untuk menghasilkan energi listrik. Energi listrik yang dibangkitkan ini biasa disebut sebagai hidroelektrik. Berdasarkan *output* yang dihasilkan, pembangkit listrik tenaga air dibedakan atas [9] :

- a. *Large-hydro* : daya lebih dari 100 MW
- b. *Medium-hydro* : daya antara 15 MW – 100 MW
- c. *Small-hydro* : daya antara 1 MW – 15 MW
- d. *Mini-hydro* : daya diatas 100 kW, namun dibawah 1 MW
- e. *Micro-hydro* : daya antara 5 kW – 100kW
- f. *Pico-hydro* : daya yang dikeluarkan kurang dari 5 kW

Pembangkit listrik tenaga air skala *pico* merupakan pembangkit listrik yang menghasilkan keluaran daya listrik yang tidak lebih dari 5 kW. Pembangkit listrik ini memiliki beberapa keunggulan seperti [10] :

- a. Biaya pembuatannya yang relatif lebih murah.
- b. Ramah lingkungan karena tidak menggunakan bahan bakar fosil
- c. Pembangunannya dapat dipadukan dengan pembangunan jaringan irigasi.
- d. Tidak membutuhkan perawatan yang rumit dan dapat digunakan cukup lama.
- e. Ukurannya yang kecil cocok digunakan untuk daerah pedesaan yang belum terjangkau listrik PLN.

2.1.1 Potensi Hidrolik

Potensi hidrolik adalah potensi energi yang dihasilkan oleh tekanan air akibat gaya gravitasi bumi [11]. Potensi energi air skala *pico* merupakan energi dalam bentuk energi potensial. Besarnya potensi hidrolik ditentukan oleh besarnya debit air (Q) serta

ketinggian kemiringan sungai atau *head* (h). Besarnya potensi hidrolik ini dapat dijelaskan dengan persamaan berikut ini :

$$P_h = \rho \times g \times Q \times h \quad (2.1)$$

dimana :

- P_h = potensi hidrolik, W
- ρ = kerapatan atau massa jenis air (1000 kg/m^3)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)
- Q = debit aliran air (m^3/detik)
- h = ketinggian sungai atau *head* (m)

2.1.2 Efisiensi Turbin

Secara umum, istilah efisiensi dapat didefinisikan sebagai rasio antara kerja turbin terhadap energi. Efisiensi turbin adalah perbandingan antara *input* (daya hidrolik) dengan daya *output* (daya poros) [12]. Pengertian tersebut dapat ditulis dalam persamaan sebagai berikut :

$$P_{\text{poros}} = T \times \omega \quad (2.2)$$

dimana,

- P_{poros} = daya poros (W)
- T = torsi (N.m)
- ω = kecepatan sudut (RPM)

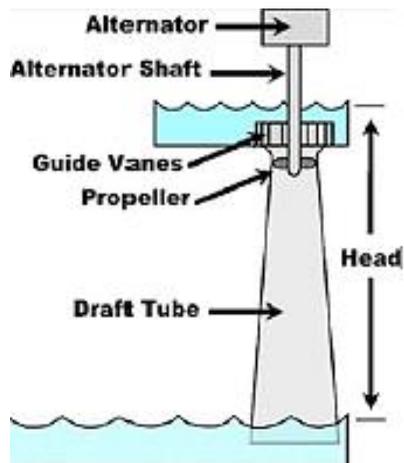
Berdasarkan persamaan 2.1 dan 2.2, maka dapat diperoleh persamaan dari efisiensi turbin sebagai berikut :

$$\text{Eff} = \frac{P_{\text{poros}}}{P_{\text{hidrolik}}} \times 100\% \quad (2.3)$$

2.2 Sistem Turbin *Open Flume*

Terdapat beberapa macam jenis turbin air yang termasuk kedalam kategori *pico-hydro*, diantaranya yaitu turbin *open flume* dan turbin *propeller*. Secara umum tidak terdapat perbedaan yang mendasar antara turbin jenis *open flume* dengan turbin *propeller* biasa, hanya saja pada sistem turbin ini *rotation tank* yang merupakan salah satu komponen utama yang berfungsi sebagai tempat terbentuknya aliran vorteks mempunyai bentuk terbuka sehingga untuk membedakan dengan sistem turbin *propeller* maka jenis turbin ini disebut sebagai *open flume* atau saluran terbuka. Turbin *open flume* merupakan salah satu jenis turbin reaksi dimana

perbedaan antara tekanan *inlet* dan *outlet* digunakan untuk memperoleh daya poros. Prinsip kerja turbin *open flume* sangat sederhana. Air yang memiliki energi potensial masuk ke dalam ruang turbin melalui *guide vane*, selanjutnya air akan memutar *propeller* sehingga menghasilkan daya turbin. Daya turbin ini kemudian diteruskan oleh poros menuju alternator untuk diubah ke dalam energi listrik, air yang telah memutar *propeller* keluar melalui *draft tube* menuju *tail race* [13].



Gambar 2.1 Turbin *open flume* [13]

Sistem turbin *open flume* atau saluran terbuka ini memiliki beberapa keunggulan apabila dibandingkan dengan turbin *propeller* pada umumnya, antara lain yaitu [2]:

- Proses perawatan dari turbin jenis ini cukup mudah. Hal ini dikarenakan posisi dari sudu dan *guide vane* berada diatas air sehingga mudah untuk dijangkau.
- Instalasi dan pengoperasian turbin jenis *open flume* sangat mudah karena operator hanya butuh untuk meletakkannya diatas *rotation tank*.
- Bentuk dan ukuran geometri dari turbin *open flume* yang praktis dan *compact* sehingga tidak memakan tempat yang besar.

Untuk dapat memanfaatkan sistem turbin *open flume* ini, setidaknya dibutuhkan empat buah komponen utama untuk merancang turbin *open flume*, antara lain yaitu :

- a. *Rotation tank* terbuka
- b. Sudu pengarah atau *guide vanes*
- c. Sudu jalan
- d. Pipa hisap atau *draft tube*

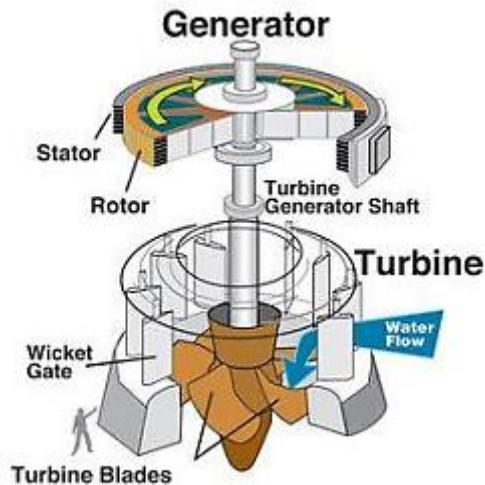
Sistem turbin *open flume* yang memanfaatkan pusaran air ini merupakan sebuah teknologi baru yang memanfaatkan energi yang terkandung dalam pusaran air yang dibuat dengan menciptakan melalui perbedaan *head* rendah di sungai. Adapun cara kerja dari sistem turbin vorteks *open flume* adalah :

- a. Air sungai dari tepi sungai disalurkan dan diarahkan ke saluran masuk yang menuju *rotation tank*. *Rotation tank* ini memiliki suatu lubang lingkaran pada bagian dasarnya.
- b. Tekanan rendah pada lubang dasar tangki dan kecepatan air pada titik masuk *rotation tank* mempengaruhi kekuatan dari aliran vorteks yang terbentuk
- c. Energi potensial seluruhnya diubah menjadi energi kinetik rotasi pada inti vorteks yang selanjutnya diekstraksi melalui turbin.
- d. Air yang telah memutarakan turbin kemudian kembali lagi ke *tail race* melalui saluran keluar yang disebut dengan *draft tube*.

2.3 Turbin Kaplan

Turbin Kaplan merupakan evolusi dari turbin *Francis*. Tidak berbeda halnya dengan turbin *Francis*, cara kerja dari turbin Kaplan menggunakan prinsip reaksi. Turbin jenis ini mempunyai roda jalan yang mirip dengan baling-baling pesawat terbang. Apabila baling-baling dari pesawat terbang berfungsi untuk menghasilkan gaya dorong, berbeda halnya dengan roda jalan pada turbin Kaplan yang berfungsi untuk mendapatkan gaya yaitu gaya putar yang digunakan untuk memutarakan poros turbin sehingga nantinya akan dihasilkan torsi. Berbeda halnya dengan roda jalan pada turbin *Francis*, keistimewaan dari turbin Kaplan adalah sudut sudu pada roda jalan dapat diputar dan diatur posisinya untuk

menyesuaikan kondisi dari beban turbin yaitu perubahan debit air [1]. Turbin Kaplan ini banyak digunakan pada instalasi pembangkit listrik tenaga air sungai, hal ini dikarenakan turbin Kaplan memiliki kelebihan yaitu dapat menyesuaikan *head* yang berubah-ubah.



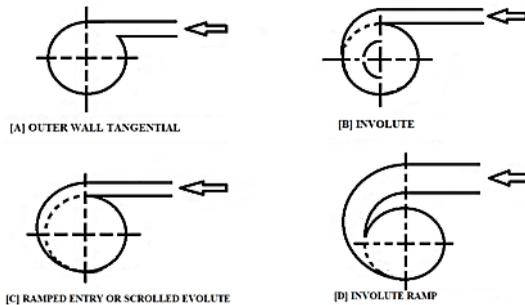
Gambar 2.2 Turbin Kaplan [14]

Apabila pemilihan turbin didasarkan pada kecepatan spesifiknya, turbin Kaplan ini memiliki kecepatan spesifik yang tinggi (*high spesific speed*) sehingga ukuran roda turbin lebih kecil dan dapat *dicouple* langsung dengan generator. Turbin Kaplan bekerja pada kondisi tinggi jatuh air (*head*) yang rendah dengan debit air yang besar. Pada kondisi beban yang tidak penuh, turbin Kaplan ini memiliki efisiensi paling tinggi, hal ini dikarenakan sudu-sudu pada turbin Kaplan dapat diatur menyesuaikan dengan beban yang ada. Adapun keuntungan dari turbin Kaplan apabila dibandingkan dengan turbin *Francis* adalah kecepatan putarnya bisa dipilih lebih tinggi, dengan demikian roda turbin dapat *dicouple* langsung dengan generator dan ukurannya pun lebih kecil. Pada penelitian ini penggunaan turbin kaplan sebagai *runner*

terletak pada bagian bawah setelah *outlet* dari *rotation tank*. Hal ini didasarkan pada penelitian yang pernah dilakukan oleh Subash Dhakal yang menyatakan bahwa posisi terbaik untuk penempatan *runner* terletak di bagian bawah dari *rotation tank* [15].

2.4 Saluran Masuk

Terdapat beberapa tipe dari saluran masuk dari turbin vorteks, antara lain yaitu saluran masuk tipe *involute*, saluran masuk tipe *ramp*, saluran masuk tipe *scroll* dan juga saluran masuk tipe *outer wall tangential*. Berbagai tipe tersebut dimaksudkan untuk lebih memaksimalkan kinerja dari turbin yang dioperasikan. Dengan konstruksi lubang masuk dengan tipe *outer wall tangential* dapat mengurangi efek dari turbulensi yang terjadi di sekitar dinding saluran masuk [16]. Tipe-tipe saluran masuk tersebut dapat dilihat pada gambar 2.5.



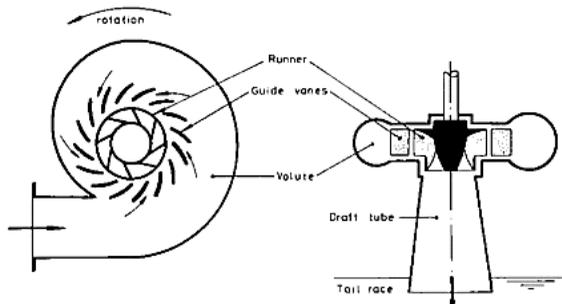
Gambar 2.3 Tipe saluran masuk dari turbin vorteks [16]

2.5 Sudu Pengarah

Sudu pengarah atau dikenal sebagai *guide vanes* merupakan salah satu komponen utama dari sistem turbin vorteks *open flume*. Sudu pengarah berfungsi sebagai pengarah utama aliran air yang telah melewati *rotation tank* sehingga sudut kecepatan yang dibutuhkan dalam perencanaan sudu jalan dapat terpenuhi [2].

Selain itu, sudu pengarah atau *guide vanes* ini juga memiliki fungsi tambahan yaitu sebagai gerbang yang mengatur debit air yang akan masuk ke sudu jalan. Dengan mengatur debit air yang masuk,

maka kecepatan dari sudu jalan dapat diatur, sehingga mempengaruhi nilai torsi yang dihasilkan, dimana nilai torsi ini memiliki peranan penting di dalam menggerakkan poros generator. Didalam perencanaanya, terdapat parameter penting yang harus diperhatikan yaitu jumlah sudu yang terpasang pada *guide vanes*, jumlah sudu merupakan pertimbangan yang sangat penting karena dengan menggunakan jumlah sudu yang sesuai maka aliran air yang masuk ke dalam *runner* dapat terdistribusi secara menyeluruh, sehingga *runner* dapat berputar secara maksimal.



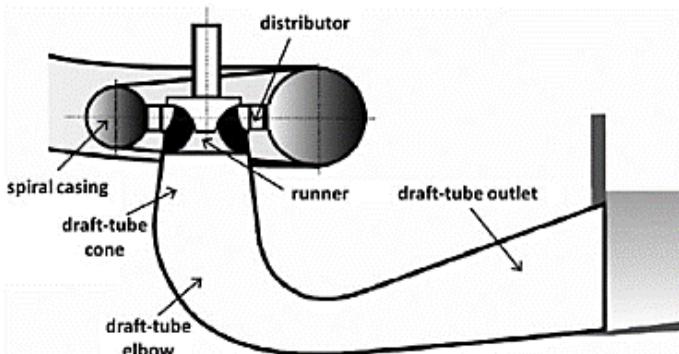
Gambar 2.4 Tampilan dari sudu pengarah [17]

2.6 Draft Tube

Draft tube atau dikenal sebagai saluran buang merupakan salah satu bagian penting dari sistem turbin air. *Draft tube* diperlukan untuk membawa air keluar dari *runner* turbin menuju saluran bawah (*tail race*). *Draft tube* ini memainkan peran didalam mengendalikan perbedaan tekanan dan kecepatan pada sisi *inlet* dan sisi *outlet* dari *draft tube* [18]. Fungsi utama dari *draft tube* adalah untuk meningkatkan efisiensi dari turbin dengan cara merubah energi kinetik menjadi energi tekanan dengan cara menurunkan kecepatan aliran yang keluar pada sisi *runner*. Selain itu, *draft tube* juga berfungsi untuk membuat kondisi yang memungkinkan agar turbin dapat diletakkan di atas level muka air bawah (*tail race*).

Rancang bangun *draft tube* yang sesuai akan meningkatkan sebagian dari *head* kecepatan pada saat meninggalkan *runner*. Hal ini dapat meningkatkan energi dan efisiensi dari suatu turbin.

Pemilihan dimensi merupakan salah satu cara yang digunakan untuk mengoptimalkan kinerja dari *draft tube* [5]. Pada turbin air, aliran fluida akan diteruskan menuju *runner*, didalam *runner* terjadi perubahan energi potensial menjadi energi kinetik yang akan memutarakan *runner*, aliran fluida yang mencapai *runner* memiliki kecepatan rata-rata sebesar V_s dan energi kinetik sebesar $V_s^2 / 2g$. Apabila *runner* diposisikan diatas *tail race*, maka energi potensial yang terjadi akan sebanding dengan tinggi dari *draft tube*.



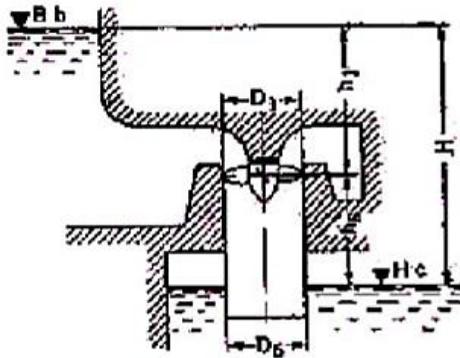
Gambar 2.5 *Draft tube* pada Pembangkit Listrik Tenaga Air [19]

Perbedaan tekanan yang melalui *runner* menjadi besar dengan adanya *draft tube*, hal ini dikarenakan kondisi vakum yang mengakibatkan efek hisap sehingga akan meningkatkan efisiensi dari turbin. *Draft tube* dapat dirancang dengan berbagai cara yang berbeda, namun beberapa variasi desain dipandang kurang penting dibandingkan dengan beberapa hal lain, seperti bentuk dari *outlet* yang berupa lingkaran atau segi empat yang dipandang kurang penting jika dibandingkan dengan luas penampang luas. Pada dasarnya *draft tube* terdiri atas 3 tipe yaitu *straight conical draft tube*, *bell mouth draft tube* dan *curve (elbow) draft tube* [12].

2.6.1 *Straight Conical Draft Tube*

Straight conical draft tube dibatasi pada diameter *runner* yang kecil hingga menengah (sampai 2,5 meter) karena mempertimbangkan biaya yang besar dari konstruksi *diffuser*

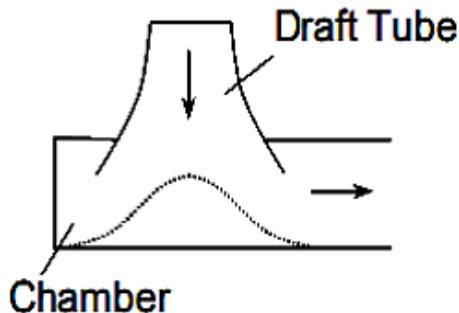
vertikal yang panjang. *Straight conical draft tube* ini terdiri atas tiga bagian utama yaitu bagian awal dimulai dari poros *runner blade*, *cone proper*, dan ruangan *exhaust* (keluaran).



Gambar 2.6 Tipe *straight draft tube* [12]

2.6.2 Bell Mouth Draft Tube

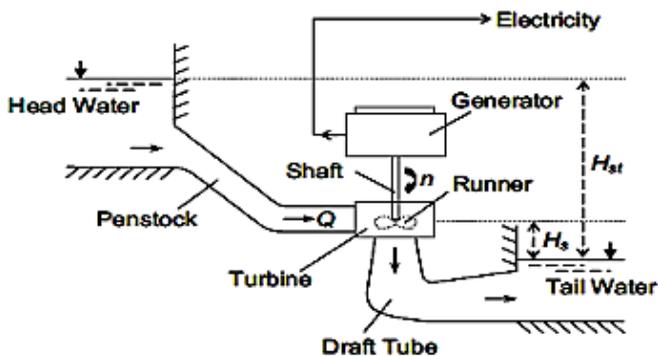
Bell mouth draft tube ini mulai dikembangkan pada tahun 1920 di Amerika Serikat. Tipe *draft tube* ini merupakan sebuah tabung lurus yang sesumbu dengan *runner* namun berbeda dengan *straight conical draft tube*, *draft tube* ini pada umumnya terbuat dari metal atau beton yang kuat untuk digunakan pada diameter *runner* yang besar. Berikut ini merupakan gambar dari *draft tube* tipe *bell mouth*.



Gambar 2.7 Tipe *bell mouth draft tube* [12]

2.6.3 Curved Draft Tube

Curver draft tube merupakan tipe dasar yang digunakan pada kapasitas turbin menengah hingga sangat besar. Kaplan merupakan orang yang mengembangkan *elbow draft tube* untuk diameter *runner* yang sangat besar hingga mencapai 10 meter. Kekurangan utama dari *curved draft tube* ini adalah performannya sedikit berkurang dari pada *straight draft tube* khususnya pada kondisi operasi yang tidak optimum yaitu aliran yang rendah.

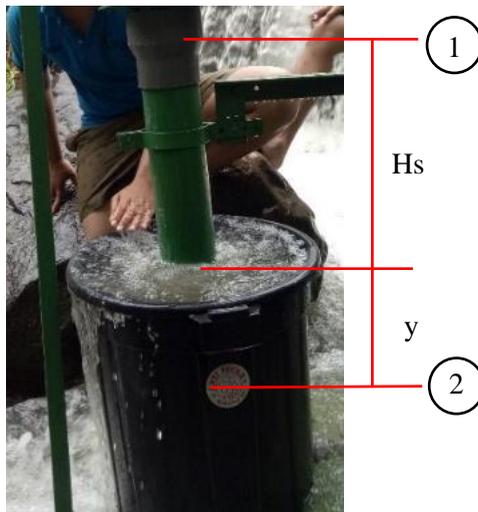


Gambar 2.8 *Curved draft tube* pada *Hydraulic Power Plant* [12]

Curver draft tube memiliki tiga bagian utama yaitu *initial cone*, *elbow*, dan *diffuser* akhir. *Initial cone* merupakan tabung lurus yang berfungsi untuk menghubungkan ruang turbin dengan *elbow tube*. Pada bagian *elbow*, aliran air akan dibelokkan dari arah vertikal menjadi arah horizontal. Aliran air nantinya akan dikembalikan menuju *tail race* oleh *diffuser* akhir setelah melewati *elbow*. Pada head yang rendah dan laju aliran yang cukup tinggi tipe *draft tube* ini memiliki kerugian yang cukup besar (hingga 50%) [12]. Tujuan utama dari peletakan *draft tube* pada *Hydraulic Power Plant* yaitu untuk memulihkan beberapa energi kinetik yang meninggalkan *runner* menjadi energi tekanan, apabila tanpa *draft tube* maka dapat mengakibatkan kerugian yang sangat signifikan. Oleh karena itu, diperlukan komponen *draft tube* pada turbin air guna meningkatkan efisiensi dari turbin.

2.7 Prinsip Hukum Bernoulli

Asas Bernoulli adalah tekanan fluida di tempat yang kecepatannya tinggi lebih kecil daripada di tempat yang kecepatannya lebih rendah. Jadi semakin besar kecepatan fluida dalam suatu pipa maka tekanannya makin kecil dan sebaliknya makin kecil kecepatan fluida dalam suatu pipa maka semakin besar tekanannya. Didalam penerapannya, prinsip dari hukum Bernoulli ini digunakan untuk menghitung tekanan yang ada didalam *draft tube*.



Gambar 2.9 Posisi eksperimen dari *draft tube* 100 mm dibawah *tail race*

Persamaan Bernoulli :

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + H_s + y = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} \quad (2.4)$$

$$\frac{P_2}{\rho \cdot g} = \frac{P_a}{\rho \cdot g} + y \quad (2.5)$$

dengan mensubstitusikan persamaan 2.5 kedalam persamaan 2.4 maka diperoleh persamaan tekanan absolut (persamaan 2.6)

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} = \frac{P_a}{\rho \cdot g} \left(\frac{V_1^2}{2 \cdot g} - \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + H_s \right) \quad (2.6)$$

Keterangan,

titik 1 : *outlet runner*

titik 2 : *outlet draft tube*

P_1 : tekanan absolute di titik 1 (Pa)

P_2 : tekanan absolute di titik 2 (Pa)

P_a : tekanan atmosfer (101325 Pa)

V_1 : kecepatan di titik 1 (m/s)

V_2 : kecepatan di titik 2 (m/s)

ρ : massa jenis air (1000 kg/m³)

g : percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

H_s : ketinggian *draft tube* dari titik 1 ke permukaan *tail race*

y : ketinggian *draft tube* yang tercelup

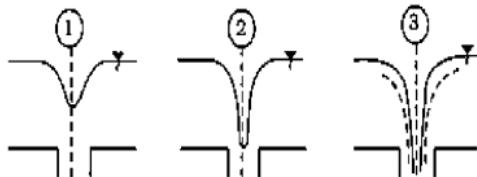
2.8 Vorteks

Dalam dinamika fluida, vorteks merupakan sebuah daerah di dalam fluida dimana aliran sebagian besar bergerak memutar terhadap sumbu yang imajiner [1]. Vorteks dapat terbentuk oleh aliran fluida termasuk cairan, gas dan plasma. Vorteks merupakan komponen utama yang ada di dalam aliran turbulen. Didalam pusaran vorteks, kecepatan fluida yang terbesar berada di samping sumbu imajiner dan penurunan kecepatan berbanding terbalik terhadap jarak dari sumbu imajinernya. Kecepatan fluida yang tinggi akan memberikan momentum yang besar pada turbin untuk mulai berputar, sehingga hal ini akan berdampak pada performa dari turbin [20]. Pusaran yang sangat tinggi terbentuk di wilayah inti sekitar sumbu dan hampir nol ketika di wilayah ujung dari pusaran, sementara tekanan yang terjadi akan semakin turun saat mendekati wilayah ujung dari pusaran.



Gambar 2.10 Aliran Vorteks [1]

Dalam klasifikasi vorteks, terdapat tiga tipe kekuatan vorteks dengan melihat bentuk dari pusaran air, seperti pada gambar 2.11 berikut ini.



Gambar 2.11 Klasifikasi aliran vorteks [1]

Secara umum, fenomena terbentuknya aliran vorteks terbagi atas dua bagian yaitu :

a. Vorteks paksa / vorteks berotasi

Vorteks paksa atau biasa dikenal juga sebagai *vortex flywheel*. Apabila suatu fluida berputar seperti benda kaku, yaitu jika kecepatan naik secara proporsional terhadap jari-jari bola kecil yang dibawa oleh arus air dan akan berputar pada pusatnya. Contoh aplikasi dari vorteks paksa adalah pada saat proses pengadukan air the pada sebuah cangkir.

b. Vorteks bebas / vorteks tak berotasi

Vorteks bebas adalah vorteks yang terbentuk karena fenomena natural, tidak terpengaruh oleh gaya luar dari sistem fluida. Pada aliran inkompresibel, umumnya terjadi karena adanya lubang

keluar. Ketika massa fluida bergerak secara alami (karena pengaruh dari gaya internal) maka gerakan vorteks akan muncul, dalam kasus ini tidak ada torsi ataupun gaya eksternal yang mempengaruhi fluida. Vorteks bebas ini juga dikenal sebagai *potential vortex*. Contoh dari gerakan vorteks bebas adalah aliran air yang keluar dari lubang yang berada di dasar tangki, aliran pipa yang melengkung, aliran di pinggiran rumah keong pompa tepat setelah keluar dari *impeller* pada pompa sentrifugal.

Berdasarkan penemuan-penemuan fundamental dari penelitian *Institute of Technology Sligo in Civil Engineering* diperoleh hasil bahwa efisiensi daya pusaran air yang maksimal dapat terjadi dalam jangkauan rasio antara diameter lubang dan diameter tangki adalah sekitar 14 % - 18 % masing-masing untuk tempat *head* rendah dan tinggi dan efisiensi hidrolis maksimum meningkat saat kecepatan *impeller* setengah dari kecepatan fluida.

2.9 Simulasi CFD

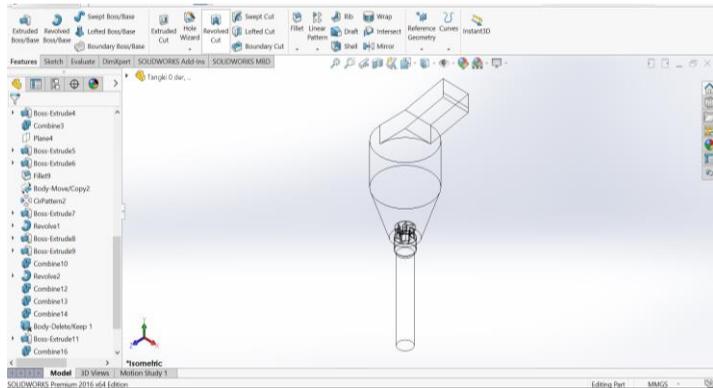
Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan sebuah *software* yang digunakan untuk menganalisa sistem yang melibatkan aliran suatu fluida, *heat transfer*, serta fenomena-fenomena tertentu seperti reaksi kimia dengan menggunakan perangkat keras berupa komputer. Tujuan utama dari pengembangan CFD adalah untuk menyediakan kemampuan yang dapat dibandingkan dengan peralatan CAE (*Computer Aided Engineering*) yang lain seperti *code analysis stress*. Pada umumnya pada *software* CFD terdapat tiga tahapan yang harus dilakukan ketika melakukan simulasi menggunakan CFD, ketiga tahapan tersebut yaitu :

a. *Pre-Processing*

Tahapan *pre-processing* merupakan tahapan awal dari proses simulasi pada CFD, pada tahap ini akan dilakukan beberapa proses yaitu :

Definisi geometri dari benda kerja : Pada proses ini dilakukan proses pemodelan dari benda kerja. Proses pemodelan pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *software* CAD

yang kemudian dilakukan proses *save as* dalam bentuk format STEP sehingga pemodelan yang telah dilakukan dapat dibaca pada CFD.



Gambar 2.12 Desain benda kerja

Pembuatan *grid (mesh)* : Proses ini disebut juga sebagai proses *meshing* yaitu proses membagi komponen yang akan dianalisis menjadi elemen-elemen kecil atau diskrit. Semakin baik kualitas dari *meshing* maka akan berdampak semakin tinggi tingkat konvergensinya.

b. *Processing*

Processing merupakan proses kedua dari CFD, didalam tahap ini dilakukan penentuan kondisi batas dan pemilihan metode inisiasi. Dalam penentuan kondisi batas akan dimasukkan nilai dari parameter-parameter yang dibutuhkan antara lain *inlet velocity*, RPM, dinding (*wall*), *cell zone fluid*, *cell zone solid*. Proses selanjutnya yaitu melakukan pemilihan metode inisiasi, dalam metode inisiasi memiliki beberapa metode solusi yang digunakan antara lain :

SIMPLE

Merupakan metode yang menggunakan hubungan antara kecepatan dan tekanan untuk memperoleh nilai konservasi massa dan nilai bidang tekan.

SIMPLEC

Pada metode ini pada dasarnya merupakan modifikasi dari metode SIMPLE, dimana dilakukan variasi terhadap persamaan momentum.

PISO

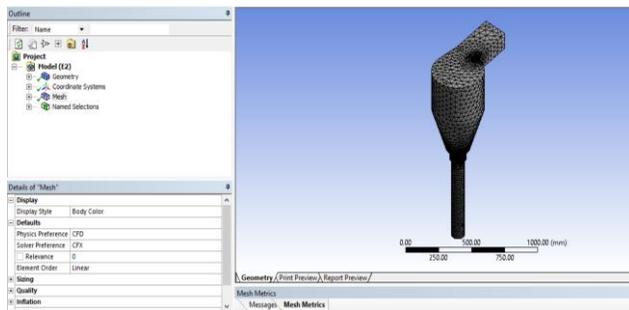
Pada metode ini digunakan untuk meningkatkan efisiensi dari perhitungan, metode PISO menggunakan dua faktor koreksi tambahan yaitu *neighbor correction* dan *skewness correction*.

c. *Post-processing*

Pada tahapan ini akan ditampilkan hasil dari proses perhitungan dengan kondisi batas dan metode *solver* yang digunakan. Dalam *post-processing* ini dapat memberikan tampilan grafis yang akan menunjukkan hasil dari *meshing*, kontur, vektor dan *pathline*.

Displaying mesh

Displaying mesh digunakan untuk menampilkan *mesh* pada model yang sedang dikerjakan pada saat *setup* kondisi batas atau pada saat memeriksa *solution*.

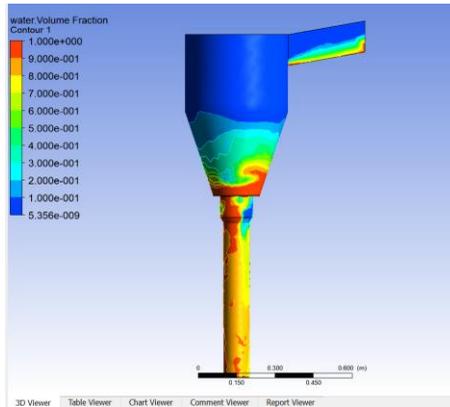


Gambar 2.13 *Displaying mesh* dari CFD

Displaying contours dan *profiles*

Pada menu *display* ini akan ditampilkan bentuk dari kontur dan profil model yang sedang diteliti. Kontur dan profil yang ditampilkan ini dapat berupa tekanan, temperatur maupun kecepatan suatu aliran. Dengan adanya *displaying contours* maka dapat dilihat distribusi tekanan, temperatur maupun

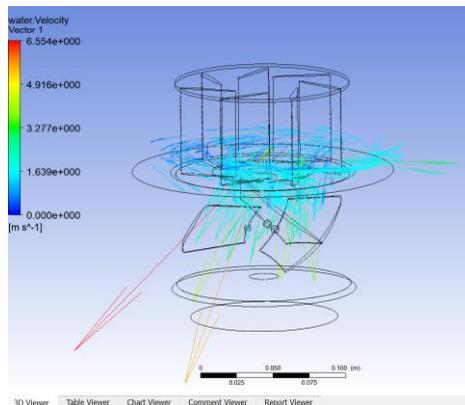
kecepatan pada model yang diteliti. Hal ini memudahkan untuk dilakukannya penganalisaan terhadap aliran yang terjadi pada model.



Gambar 2.14 *Displaying contours* dari water volume fraction

Displaying vectors

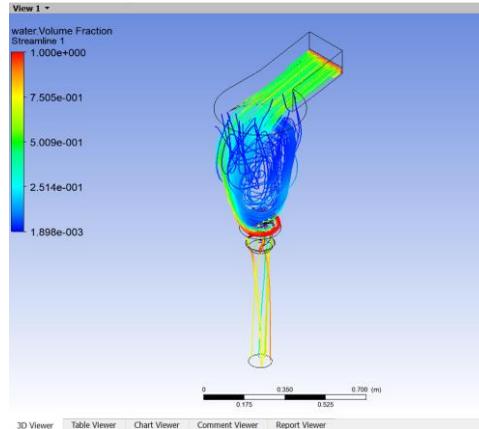
Pada tampilan ini menampilkan vektor dari model yang sedang diteliti, tampilan ini dapat berupa tekanan, temperatur maupun kecepatan. Dengan *displaying vectors* ini dapat dilihat arah aliran dari fluida ketika mengenai suatu *wall*.



Gambar 2.15 *Displaying vectors* kecepatan air pada rotor

Displaying pathlines

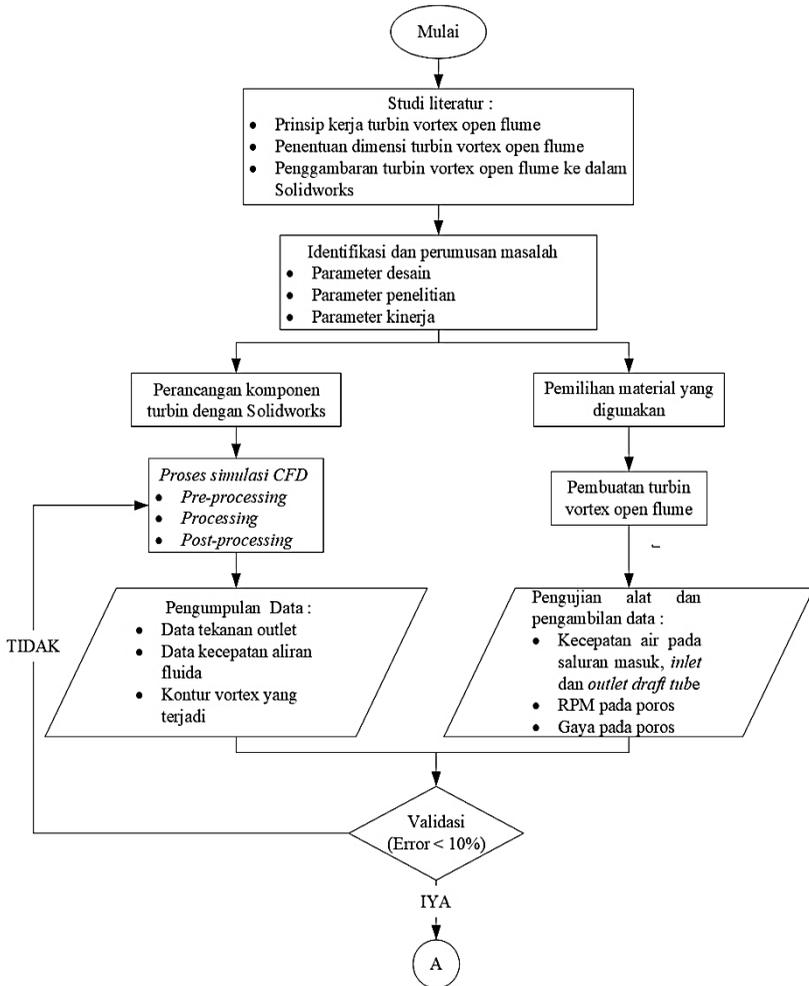
Tampilan *pathlines* digunakan untuk memvisualisasikan aliran dari partikel tak bermassa yang menjadi dominan dari permasalahan.

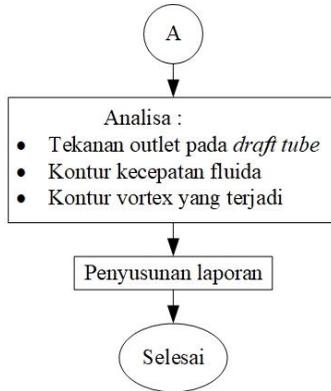


Gambar 2.16 *Displaying pathlines* dari water volume fraction

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Adapun metodologi penelitian yang digunakan dalam pembuatan tugas akhir ini ditunjukkan pada diagram alir sebagai berikut,





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.1 Studi Literatur

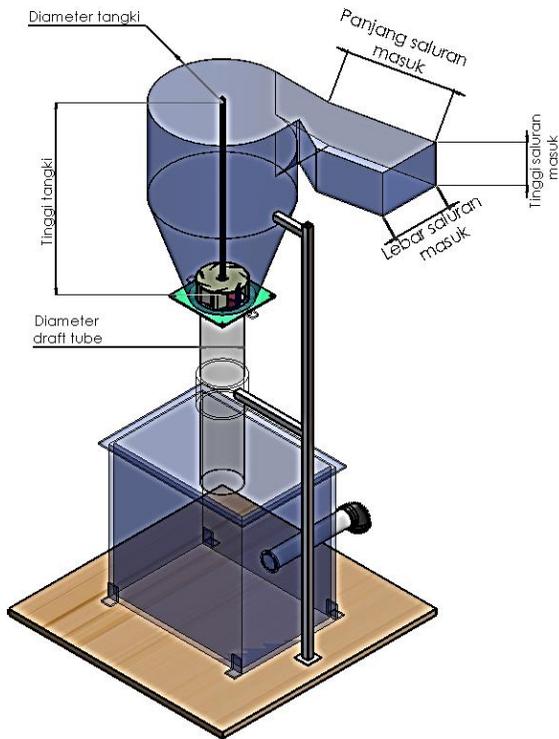
Pada penelitian tugas akhir ini, hal pertama yang dilakukan adalah melakukan studi literatur mengenai pemahaman konsep mengenai turbin vorteks *open flume*. Oleh karena itu, diperlukan suatu pemahaman yang lebih dengan cara *me-review* jurnal-jurnal pendukung didalam pengerjaan tugas akhir ini. Adapun jurnal-jurnal tersebut berkenaan dengan prinsip kerja dari turbin vorteks *open flume*, penentuan dimensi dari komponen yang digunakan untuk merancang turbin vorteks *open flume*, penggambaran desain dari turbin vorteks *open flume* dengan menggunakan *software* CAD, pemahaman mengenai aspek rasio pada perencanaan turbin, pemahaman mengenai debit sungai yang sesuai untuk kebutuhan turbin vorteks yang dirancang, pengambilan data pada sungai yang akan digunakan untuk melakukan eksperimen, dimana data tersebut meliputi kecepatan aliran sungai, ketinggian (*head*) sungai serta kedalaman dari sungai. Selain itu, diperlukan pula pemahaman mengenai CFD untuk proses simulasi sehingga hasil dari simulasi sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai yaitu mengetahui kontur aliran pada turbin vorteks *open flume*, mengetahui torsi yang dihasilkan oleh simulasi yang nantinya akan dibandingkan dengan torsi pada eksperimen untuk proses validasi.

3.2 Identifikasi dan Perumusan Masalah

Pada tahap ini bertujuan untuk mendefinisikan *problem* atau masalah yang ada didalam mendesain dan merancang turbin vorteks *open flume*. Identifikasi masalah dari penelitian ini berkaitan mengenai parameter untuk desain dari turbin vorteks *open flume*. Untuk penentuan desain geometri dari turbin vorteks ini, hal pertama yang perlu dilakukan yaitu mengetahui aspek rasio pada geometri yang akan dibuat. Seperti halnya untuk rasio optimal antara diameter *rotation tank* dengan diameter *outlet* yang memiliki nilai antara 0,14 hingga 0,18 [21]. Selain itu diperlukan pemilihan mengenai jenis dari *draft tube* yang akan digunakan. Untuk penggunaan dari *draft tube* jenis *staright conical* dibatasi pada diameter *runner* yang kecil hingga menengah yaitu mencapai 2,5 m hal ini dikarenakan apabila digunakan untuk *runner* berdiameter besar maka biaya konstruksi untuk jenis *draft tube* ini memakan biaya yang besar.^[12] Selanjutnya untuk parameter penelitian yang digunakan untuk penelitian tugas akhir ini yaitu berkenaan mengenai sudut inlet dari saluran masuk, ketinggian vorteks yang ada didalam *rotation tank* serta geometri ketinggian dari *draft tube* terhadap permukaan *tail race*.

3.3 Pembuatan Turbin Vorteks *Open Flume*

Tahapan pertama pada proses pembuatan turbin vorteks *open flume* yaitu membuat desain dari turbin vorteks yang akan dibuat. Proses pembuatan desain bertujuan untuk mengetahui bentuk dari turbin vorteks yang akan dibuat dengan dimensi yang sudah direncanakan. Proses desain ini dilakukan dengan menggunakan *CAD*.



Gambar 3.2 Desain turbin vorteks *open flume*

Tabel 3.1 Dimensi dari turbin vorteks

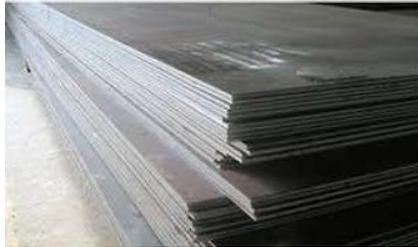
Nama Bagian	Dimensi [m]
Diameter tangki	0,4
Tinggi tangki	0,625
Diameter <i>draft tube</i>	0,0254
Lebar saluran masuk	0,2
Tinggi saluran masuk	0,14
Panjang saluran masuk	0,3

Setelah proses desain selesai, proses selanjutnya yaitu pemilihan material sekaligus pembuatan turbin vorteks *open flume* di bengkel.

Adapun alat dan bahan-bahan utama yang digunakan pada proses pembuatan turbin vorteks *open flume* ini adalah :

a. Pelat besi

Pelat ini digunakan untuk bahan pembuatan *rotation tank*, yang mana pada proses pembuatannya sendiri diperlukan mesin *rolling* agar pelat besi dapat membentuk kerucut serta digunakan juga untuk pembuatan saluran masuk



Gambar 3.3 Pelat besi [14]

b. Pipa PVC

Pipa PVC ini digunakan sebagai bahan pembuatan komponen *draft tube*, pemilihan material PVC untuk bahan dari *draft tube* ini agar memudahkan untuk proses bongkar pasang sehingga tujuan dari penelitian dapat tercapai. Pipa PVC yang digunakan untuk pembuatan *draft tube* ini memiliki diameter sebesar 4 in.



Gambar 3.4 *Draft tube* dengan pipa PVC

- c. Mesin las listrik : mesin las dan elektroda ini digunakan sebagai alat penyambung antar komponen, seperti halnya untuk proses penyambungan antara *rotation tank* dengan saluran masuk.



Gambar 3.5 Hasil las *rotation tank* dan saluran masuk

3.4 Pengujian Alat dan Pengambilan Data

Turbin vorteks yang telah selesai dibuat, selanjutnya dibawa ke tempat/site pengujian. Pada penelitian tugas akhir ini, proses pengujian serta pengambilan data dilakukan di daerah Mojokerto, tepatnya yaitu di Dusun Sempur, Desa Seloliman, Trawas, Kabupaten Mojokerto Jawa Timur.



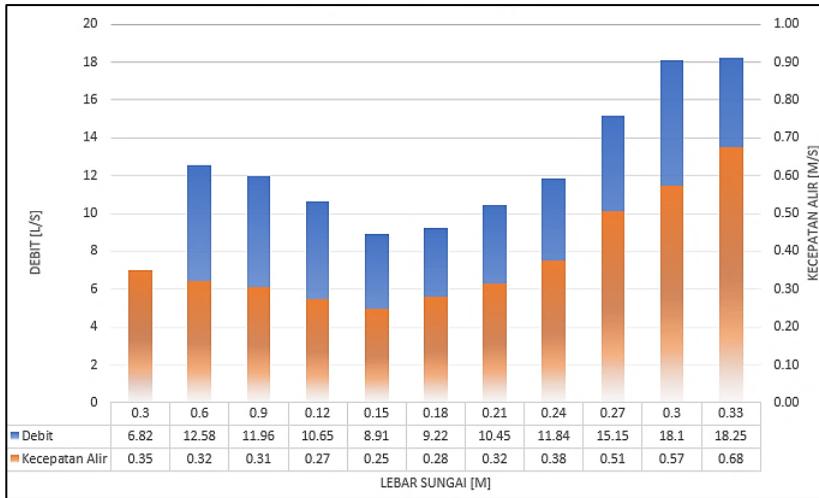
Gambar 3.6 Tempat pengujian alat dan pengambilan data

Pada lokasi ini dilakukan pengambilan data ketinggian sungai (*head*) kecepatan aliran sungai dan debit sungai. Hal ini dilakukan untuk mengetahui potensi dari sungai tersebut. Berdasarkan data yang telah diambil, sungai memiliki *head* 2 meter sehingga sungai di Dusun Sempur ini memiliki potensi untuk dimanfaatkan dalam aplikasi tubrin vorteks *open flume* [21]. Pengambilan data dilakukan dengan mengambil dua titik referensi yang berjarak 50 cm. Kedua titik tersebut digunakan untuk menghitung kecepatan aliran dengan menggunakan pelampung yang kemudian jarak antar titi dibagi dengan waktu tempuh pelampung. Selanjutnya untuk mengetahui debit dari aliran sungai, maka dilakukan pengukuran terhadap kedalaman sungai setiap 30 cm.



Gambar 3.7 Dimensi dari sungai

Dari hasil data berupa kecepatan dan juga kedalaman sungai maka dapat dilakukan perkalian antara kecepatan, kedalaman dan lebar sungai tiap 30 cm sehingga diperoleh debit sungai tiap 30 cm. Berikut ini merupakan hasil pengukuran dari kecepatan dan juga debit sungai di Desa Sempur



Gambar 3.8 Data kecepatan dan debit sungai di Desa Sempur

Didalam proses pengambilan data diperlukan beberapa alat ukur yang digunakan untuk mengukur kecepatan aliran, gaya yang dihasilkan poros *runner* serta RPM dari *runner*. Pada penelitian ini menggunakan alat ukur seperti :

a. *Tachometer*

Tachometer ini digunakan sebagai alat ukur untuk kecepatan putaran dari *runner*. Pada penggunaan alat ukur *tachometer* ini, satuan yang digunakan yaitu RPM.



Gambar 3.9 *Tachometer*

b. Neraca pegas

Neraca pegas pada penelitian ini digunakan sebagai alat untuk mengukur gaya yang dihasilkan dari putaran poros *runner*. Hasil dari neraca pegas ini berupa gaya yang nantinya akan dikalikan dengan jari-jari dari *pulley* pada poros *runner* sehingga diperoleh torsi yang dihasilkan dari putaran poros *runner*.



Gambar 3.10 Pengukuran gaya dengan neraca pegas

c. *Current meter*

Pada penelitian tugas akhir ini, *current meter* digunakan sebagai alat ukur kecepatan aliran air pada saluran masuk dan juga pada bagian *inlet* dan *outlet* dari *draft tube*.



Gambar 3.11 *Current meter* pada saat proses pengukuran

d. Busur

Penggunaan busur pada saat pengujian alat digunakan untuk mengukur besar sudut *inlet*. Pada penelitian ini sudut *inlet* divariasikan sebesar 0° , 7° dan 13° .



Gambar 3.12 Busur untuk mengukur besar sudut *inlet*

e. Meteran

Alat ukur meteran ini digunakan untuk mengukur ketinggian dari air yang masuk ke dalam pipa pesat (*penstock*) sehingga dapat mengontrol ketinggian air yang ada didalam *rotation tank*. *Penstock* ini berfungsi sebagai komponen yang menyalurkan air dari sungai menuju ke saluran masuk.



Gambar 3.13 Pengukuran ketinggian air dengan meteran

Beberapa data yang bisa diperoleh dalam pengujian ini yaitu gaya dari poros turbin dengan menggunakan neraca pegas, kecepatan putaran (RPM) dari poros turbin dengan menggunakan alat ukur *tachometer* serta kecepatan aliran menggunakan *current meter*. Adapun prosedur eksperimen untuk mendapatkan data dari penelitian ini adalah :

- Pengukuran gaya pada poros turbin.
 - a. Air sungai dialirkan menuju saluran masuk dengan menggunakan pipa PVC yang berfungsi sebagai *penstock*.
 - b. Debit air yang masuk kedalam pipa PVC diatur sehingga variasi ketinggian air didalam *rotation tank* tercapai.
 - c. Ujung dari neraca pegas dikaitkan pada bagian sisi *rotation tank* sedangkan ujung pengait lainnya dikaitkan pada baut yang telah terpasang pada bagian sisi *pulley*.
 - d. Gaya yang ditunjukkan pada neraca pegas dicatat.
 - e. Lepas ujung neraca pegas yang dikaitkan pada sisi *pulley*.
 - f. Ulangi langkah a hingga d sebanyak 3 kali.

- Pengukuran RPM pada poros turbin.
 - a. Selotip bening ditempelkan pada poros turbin agar *tachometer* dapat membaca putaran poros turbin.
 - b. Air sungai dialirkan menuju saluran masuk dengan menggunakan pipa PVC yang berfungsi sebagai *penstock*.
 - c. Debit air yang masuk kedalam pipa PVC diatur sehingga variasi ketinggian air didalam *rotation tank* tercapai.
 - d. *Infrared* yang dihasilkan *tachometer* diarahkan pada bagian poros yang tertempel selotip bening.
 - e. Data RPM pada layar *tachometer* dicatat sebanyak tiga data.

- Pengukuran kecepatan aliran dengan *current meter*.
 - a. Air sungai dialirkan menuju saluran masuk dengan menggunakan pipa PVC yang berfungsi sebagai *penstock*.
 - b. Debit air yang masuk kedalam pipa PVC diatur sehingga variasi ketinggian air didalam *rotation tank* tercapai.
 - c. Baling-baling dipasang pada ujung dari *current meter*.

- d. Baling-baling dicelupkan kedalam air di saluran masuk serta pada bagian *inlet* dan *outlet* dari *draft tube*.
- e. Data kecepatan pada layar *current meter* dicatat, masing-masing sebanyak tiga data.

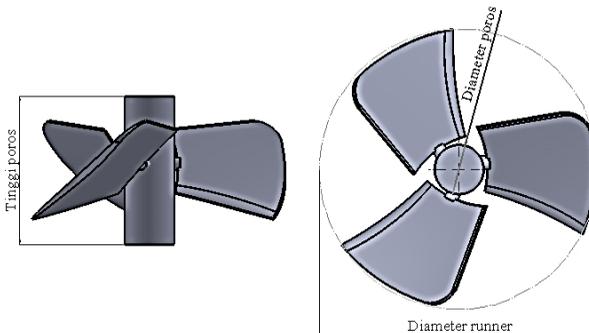
3.5 Simulasi CFD

3.5.1 Pre-processing

Pembuatan geometri dari turbin vortex ini diawali dengan mendesain geometri turbin pada CAD yang kemudian hasil desainnya diimport ke dalam CFD dalam format STEP. Pembuatan desain turbin vorteks ini terdiri dari beberapa domain yaitu domain *runner*, *rotation tank*, *guide vanes*, dan *draft tube*. Turbin vorteks yang disimulasikan memiliki ukuran seperti ditunjukkan pada tabel berikut ini.

a. Desain *runner*

Pembuatan *runner* untuk proses simulasi ini dilakukan dengan jumlah sudu sebanyak 3 buah. Hal ini didasarkan pada penelitian yang telah dilakukan oleh Subash Dhakal yang menyatakan bahwa efisiensi dari turbin akan menurun ketika jumlah sudu *runner* yang digunakan naik dikarenakan dengan bertambahnya jumlah sudu *runner* menyebabkan distorsi pada vorteks [15]. Pada penelitian ini *runner* merupakan variabel kontrol yang mana sudut sudu dari *runner* sebesar 40° . Besar sudut yang dibentuk oleh tiap sudu merupakan sudut antara sumbu poros turbin dengan sudu.



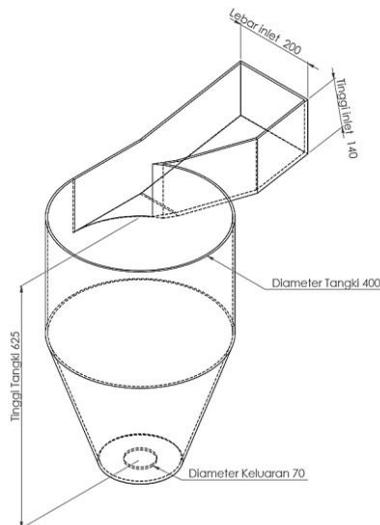
Gambar 3.14 *Runner* turbin

Tabel 3.2 Dimensi dari *runner*

No.	Parameter	Dimensi (m)
1.	Diameter poros	0,02
2.	Tinggi poros	0,07
3.	Diameter <i>runner</i>	0,12

b. Desain *rotation tank*

Untuk desain tangki yang digunakan berupa tangki berpenampang kerucut dengan lubang *outlet* berada di tengah dari permukaan bawah. Desain berpenampang kerucut atau *conical* ini memiliki daya *output* dan efisiensi yang lebih tinggi apabila dibandingkan dengan desain tangki berbentuk silinder [21]. Selain bentuk dari tangki, rasio antara diameter *outlet* dan diameter tangki memiliki nilai sebesar 0,175. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian dari *Institute of Technology Sligo in Civil Engineering* yang menyebutkan bahwa efisiensi daya pusara air yang maksimal terjadi pada rasio antara diameter *outlet* dan diameter tangki sebesar 14% – 18% [1].

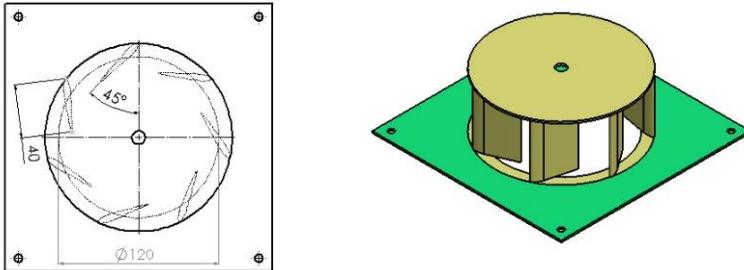
**Gambar 3.15** Dimensi dari *Rotation tank*

Tabel 3.3 Dimensi dari *rotation tank* dan *draft tube*

No.	Parameter	Dimensi (mm)
1.	Diameter <i>rotation tank</i>	0,4
2.	Tinggi <i>rotation tank</i>	0,625
3.	Diameter <i>outlet</i>	0,07
4.	Lebar saluran masuk	0,2
5.	Tinggi saluran masuk	0,14

c. Desain *guide vanes*

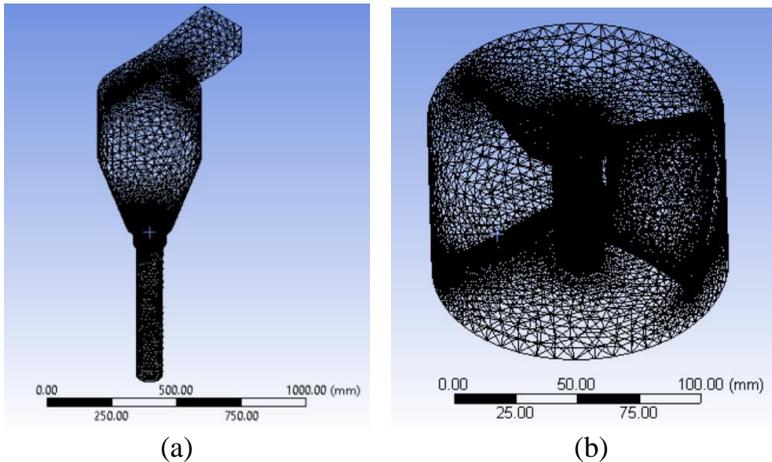
Guide vanes atau dikenal dengan sebutan sudu pengarah berfungsi sebagai pengarah utama dari aliran fluida yang telah melewati *rotational tank* sehingga sudut kecepatan yang dibutuhkan dalam perencanaan sudu jalan dapat terpenuhi [2]. Pada penelitian ini, *guide vanes* termasuk kedalam variabel terkontrol dimana jumlah sudu yang digunakan sebanyak 7 buah dengan sudut 45° .

**Gambar 3.16** Dimensi dari *guide vanes*

d. *Meshing*

Meshing merupakan proses membagi geometri yang telah dibuat menjadi bagian-bagian kecil yang disebut sebagai *control volume* [22]. *Meshing* memiliki peranan penting didalam kevalidan hasil simulasi yang diperoleh. Semakin kecil *mesh* yang digunakan pada tiap domain, maka semakin baik pula tingkat keakurasiannya. Namun hal tersebut harus didukung dengan performa komputer yang tinggi pula. Pada penelitian proses *meshing* dilakukan pada dua domain, yaitu domain tangki dan domain *runner*. Untuk *mesh* pada domain tangki menggunakan *mesh* jenis tetrahedrons. Untuk

memperoleh hasil simulasi yang valid namun tidak memerlukan performa komputer yang tinggi, maka pada domain tangki ini menggunakan ukuran *mesh* yang berbeda dengan domain *runner* yang lebih kecil. Hal ini dikarenakan hasil simulasi yang diinginkan adalah torsi pada *runner* sehingga dibutuhkan kualitas *mesh* yang baik. Tahapan selanjutnya yaitu menentukan konfigurasi pada *sizing* di kedua domain yang bertujuan untuk menentukan seberapa besar proses *meshing* yang dilakukan sehingga akan berpengaruh pada jumlah *element*. Untuk domain *runner*, jenis *mesh control* yang digunakan adalah *inflation*. *Inflation* ini diperlukan pada domain *runner* karena *inflation* menentukan *boundary layer*. *Boundary layer* ini merupakan daerah terbentuknya momentum sehingga memiliki pengaruh terhadap torsi yang dihasilkan oleh *runner*.



Gambar 3.17 Hasil *mesh* (a) domain tangki, (b) domain *runner*

Tabel 3.4 Pengaturan *meshing*

Parameter Meshing	Domain tangki	Domain <i>runner</i>
Min size	0,06 m	0,03 m
Max face size	0,07 m	0,008 m
Inflation : e. First layer height f. Maximum layers g. Grow rate	-	2.e-005 m 10 1.2
<i>Skewness</i>	Max. 0,86931	Max. 0,8869
Jumlah element	987.832	2.018.095

3.5.2 *Processing*

Tahapan selanjutnya adalah tahapan *processing*, didalam tahap ini dilakukan penentuan kondisi batas dan pemilihan metode inisiasi. Pada tahap ini, metode *multiphase* antara air dan udara dipilih karena turbin vorteks *open flume* ini merupakan turbin saluran terbuka artinya bahwa terdapat interaksi antara udara dengan air. Untuk aliran *multiphase*, perbedaan variasi dari fraksi massa tiap *phase* akan menyebabkan perubahan *density* dikarenakan tiap *phase* memiliki *density* yang berbeda sehingga untuk memodelkannya diperlukan *bouyancy* [23]. Selain itu juga dilakukan proses pendefinisian *boundary* pada domain tangki dan pemberian nilai yang sesuai dengan data eksperimen. Berikut ini merupakan kondisi *boundary* pada domain tangki.

- Tinggi 30 mm di saluran masuk : *inlet*
- Permukaan atas saluran masuk dan *rotation tank* : *opening*
- Guide vanes* : *wall*
- Permukaan bawah *draft tube* : *opening*

Pada penelitian ini *turbulence option* yang dipilih adalah *k-ε*. Berdasarkan penelitian Nauman Hanif Khan yang dikutip dari CFD *Solver Medeling Guide* menyatakan bahwa model turbulensi *k-ε* memberikan prediksi yang akurat pada aliran terpisah [24]. Oleh karena

itu, pada penelitian ini model turbulensi yang digunakan adalah model k- ϵ *setup* yang digunakan.

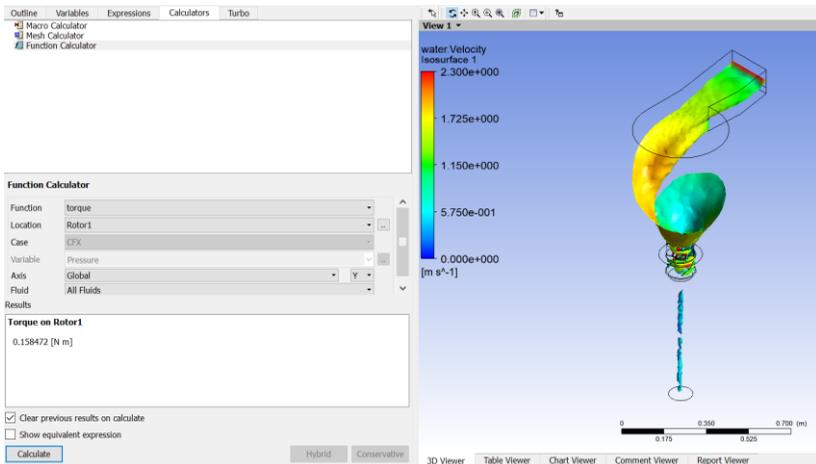
Tabel 3.5 Parameter *setup* CFX

Parameter inisialisasi	Kondisi
Tipe analisis	<i>Steady state</i>
Definisi fluida	<i>Air at 25° C dan water</i>
Tekanan referensi	1 atm
<i>Bouyancy :</i> <i>Gravity X</i> <i>Gravity Y</i> <i>Gravity Z</i> <i>Bouy. Ref. Density</i>	0 -9.81 m/s ² 0 1.21 kg/m ³
<i>Fluid Model :</i> <i>homogeneous model</i> <i>turbulence option</i>	<i>Standart</i> k- ω
<i>Boundary pada domain tangki :</i> <i>inlet</i> <i>opening</i> <i>wall</i> <i>outlet</i>	1,1 m/s ² (sesuai eksperimen) <i>relative pressure : 1 atm</i> <i>no slip wall</i> <i>relative pressure : 1 atm</i>
<i>Domain rotor :</i> <i>domain motion</i> <i>angular velocity</i> <i>rotation axis</i>	<i>rotating</i> 265.67 RPM (sesuai eksperimen) <i>Global Y</i>
<i>Solver control :</i> <i>advection scheme</i> <i>max. iterations</i> RMS	<i>Upwind</i> 300 0.001

3.5.3 *Post-processing*

Tahap akhir dari simulasi adalah *result* atau hasil. Pada tahap ini penulis dapat menentukan hasil apa yang ingin diketahui seperti visualisasi *isosurface*, *streamline* dari aliran dan juga tekanan. Untuk penelitian ini, diperlukan data berupa torsi dari domain *runner*, yang mana hasil torsi tersebut digunakan untuk proses validasi dengan data

torsi pada eksperimen. Proses pengambilan data torsi pada simulasi menggunakan menu *function calculator*. Pada menu ini dipilih jenis *function* yaitu *torque*, lokasi pada Rotor dan jenis fluida yaitu *all fluid*. Pengambilan jenis fluida *all fluid* berdasarkan teori dari *CFD guide* yang menyatakan bahwa nilai momentum dari kondisi *mixture* atau *multiphase* dapat diperoleh dengan menjumlahkan momentum dari masing-masing *phase*[23].



Gambar 3.18 Menentukan nilai torsi pada *result*

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab IV ini berisi tentang validasi simulasi, analisis data dan juga pembahasan. Analisa data yang dilakukan yaitu mengetahui pengaruh dari variasi sudut *inlet*, ketinggian air pada *rotation tank*, serta geometri dari *draft tube* terhadap RPM, torsi, daya serta tekanan pada *draft tube*. Selain itu, pada bab ini juga akan dibahas mengenai efisiensi dari turbin vorteks *open flume* terhadap beberapa variasi.

4.1 Validasi Hasil Simulasi

Validasi hasil pengukuran merupakan salah satu cara yang dilakukan untuk memperoleh hasil simulasi yang dianggap paling mendekati dengan hasil eksperimen. Data variasi yang digunakan untuk proses validasi ini yaitu variasi 27 pada kondisi sudut *inlet* dari saluran masuk sebesar 13°, ketinggian air didalam *rotation tank* sebesar 300 mm, serta kondisi *draft tube* berada 100 mm dibawah permukaan *tail race* (-100). Variasi ini dipilih karena nilai torsi yang dihasilkan merupakan torsi tertinggi apabila dibandingkan dengan variasi lainnya. Proses validasi yang dilakukan yaitu dengan cara memasukkan kecepatan *inlet* dan juga RPM *runner* yang sesuai dengan data yang diperoleh pada saat eksperimen. Pada validasi ini variabel yang digunakan sebagai pembanding adalah torsi antara simulasi dan eksperimen, dimana nilai prosentase error kurang dari 10%. Variabel torsi dijadikan pembanding dikarenakan geometri dari turbin vorteks pada simulasi disesuaikan dengan geometri dari turbin vorteks eksperimen. Perbandingan hasil validasi simulasi dengan eksperimen dapat dilihat pada tabel 4.1

Proses validasi pada penelitian ini dilakukan dengan cara melakukan perubahan terhadap ukuran *mesh* pada masing-masing domain yaitu domain tangki dan domain *runner*, hal ini dikarenakan *meshing* merupakan proses membagi geometri menjadi bagian-bagian kecil sehingga hasil dari *meshing* memiliki pengaruh terhadap nilai torsi yang didapatkan.

Tabel 4.1 Hasil validasi simulasi dengan eksperimen

Min. size (mm)		Jumlah elemen <i>mesh</i>		Torsi (N.m)		
<i>Tank</i>	<i>Runner</i>	<i>Tank</i>	<i>Runner</i>	Ekspe- -rimen	Simu- -lasi	<i>error</i> (%)
4	1,5	194135	3882490	0,146	0,261	78,8
4	0,8	194135	3885017		0,273	86
0,8	0,5	739795	498179		0,1885	29,1
0,6	0,3	987832	2018095		0,1585	8,5

Proses simulasi ini dilakukan dengan memasukkan data pada variasi 27 yaitu berupa kecepatan inlet sebesar $1,1 \text{ m/s}^2$ serta RPM dari *runner* sebesar 265,67. Berdasarkan tabel 4.1 diatas, dapat dilihat bahwa perubahan *mesh* pada masing-masing domain akan berpengaruh terhadap jumlah elemen *mesh*nya sehingga dapat dilihat pula hasil torsi yang diperoleh pada masing-masing perubahan *mesh*.

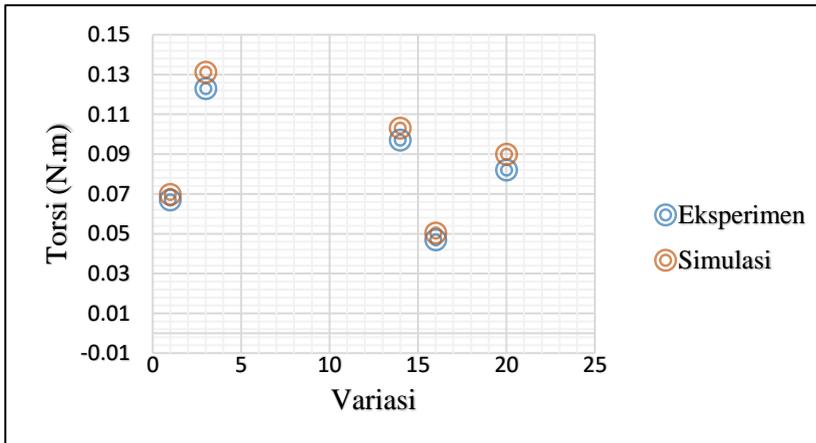
4.2 Data Perbandingan Hasil Simulasi dengan Eksperimen

Pada proses validasi telah diperoleh hasil bahwa pengaturan *mesh* yang mendekati dengan nilai torsi pada eksperimen terdapat pada percobaan 4 yaitu dengan kondisi minimal *size* pada domain tangki dan *runner* sebesar 0,6 mm dan 0,3 mm dengan prosentase *error* yang diperoleh sebesar 8,5%. Untuk memastikan bahwa pengaturan *mesh* pada percobaan 4 telah sesuai, maka dilakukan proses simulasi untuk beberapa variasi sehingga nantinya dapat dilihat nilai *error* yang terjadi pada masing-masing variasi. Berikut ini merupakan tabel perbandingan yang dilakukan pada beberapa variasi.

Nilai torsi yang diperoleh pada eksperimen ini merupakan hasil perkalian antara gaya pada *pulley* dengan jari-jari dari *pulley* sebesar 0,05 m. Data perbandingan antara torsi simulasi dengan eksperimen dapat dilihat pada gambar 4.1. Berdasarkan grafik pada gambar 4.1 dapat dilihat bahwa hasil torsi antara simulasi dengan eksperimen memiliki grafik yang sama, selain itu nilai torsi yang diperoleh untuk masing-masing variasi memiliki prosentasi *error* dibawah 10%. Untuk kondisi dari beberapa variasi dapat dilihat pada bagian lampiran A-1.

Tabel 4.2 Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen

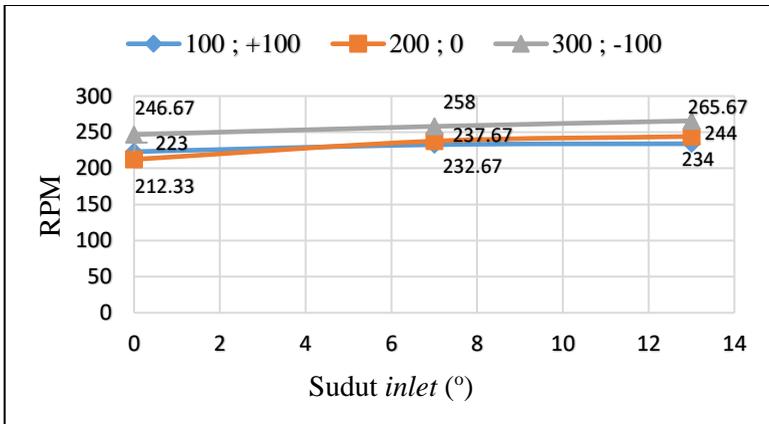
Variasi	Kecepatan (m/s^2)	RPM	Torsi (N.m)		error (%)
			Eksperimen	Simulasi	
1	0,767	223	0,067	0,0697	4
3	0,767	129,67	0,123	0,1311	6,5
14	0,833	237,67	0,097	0,103	6,1
16	0,967	336,67	0,047	0,0503	7
20	0,767	219,67	0,082	0,09	9,7

**Gambar 4.1** Perbandingan torsi simulasi dengan eksperimen

Hal ini dapat disimpulkan bahwa pengaturan *mesh* pada percobaan 4 dapat digunakan untuk beberapa variasi lainnya. Langkah selanjutnya yaitu melakukan simulasi pada variasi yang telah dilakukan ketika eksperimen. Dari hasil simulasi tersebut, dapat dilakukan analisa terhadap kontur aliran atau *streamline*, kontur tekanan pada *draft tube* yang mana hasil analisa tersebut dapat digunakan sebagai analisa pendukung untuk menjelaskan fenomena-fenomena yang tidak dapat dilihat pada saat melakukan eksperimen.

4.3 Pengaruh Variasi Sudut *Inlet* Terhadap RPM dan Torsi

Sudut *inlet* merupakan sudut yang terdapat pada saluran masuk dan berfungsi untuk mengarahkan aliran air yang berasal dari *penstock* menuju *rotation tank* yang selanjutnya akan memutar *runner* sehingga aliran air yang mengenai *runner* dapat menghasilkan daya poros. Pada penelitian ini dilakukan variasi terhadap sudut *inlet* sebesar 0° , 7° dan 13° . Pengambilan variasi sudut tersebut berdasarkan jurnal dari Hudan Achmad yang meneliti pengaruh sudut *inlet* pada turbin vorteks dengan variasi sudut sebesar 0° , $7,26^\circ$, $13,32^\circ$ dan $17,82^\circ$. Berikut ini merupakan grafik hasil eksperimen dari variasi sudut *inlet*.



Gambar 4.2 Pengaruh sudut *inlet* terhadap RPM pada data eksperimen

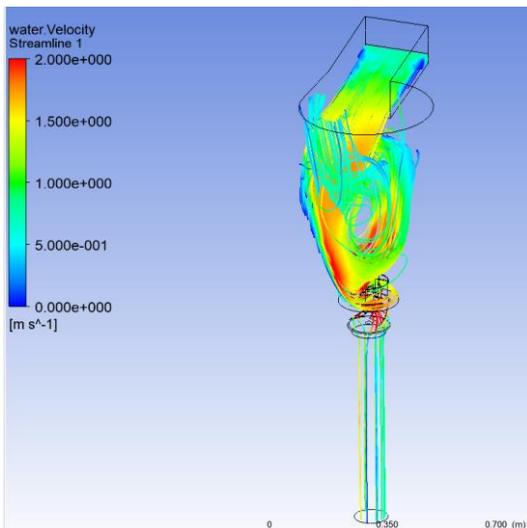
Berdasarkan grafik pada gambar 4.2 dapat dilihat bahwa semakin besar sudut *inlet* yang dibentuk maka nilai RPM dari poros turbin akan semakin naik. Pada gambar 4.2 terdapat 3 jenis grafik berdasarkan kondisi ketinggian air dan posisi dari *draft tube*. Untuk grafik berwarna biru merupakan grafik dengan kondisi ketinggian air didalam *rotation tank* sebesar 100 mm dengan posisi *draft tube* berada diatas permukaan *tail race* setinggi 100 mm (+100), grafik berwarna jingga memiliki kondisi yaitu ketinggian air di *rotation tank* sebesar 200 mm dan posisi *draft tube* berada pada permukaan *tail race* (0),

dan untuk grafik berwarna abu-abu berada pada kondisi ketinggian air di *rotation tank* sebesar 300 mm serta posisi dari *draft tube* berada dibawah permukaan *tail race* setinggi 100 mm (-100). Ketiga grafik tersebut memiliki pola yang sama yaitu setiap kenaikan sudut pada saluran masuk maka nilai RPM yang dihasilkan oleh poros turbin akan semakin naik. Untuk grafik biru RPM naik mulai dari 223 untuk sudut *inlet* 0° , 232,67 untuk sudut *inlet* 7° dan 234 untuk sudut *inlet* 13° . Hal ini dikarenakan semakin besar sudut *inlet* yang dibentuk maka akan terjadi kenaikan kecepatan aliran saat air masuk ke dalam *rotation tank*. Sehingga aliran air yang masuk kedalam tangki memiliki kecepatan yang lebih besar apabila dibandingkan ketika kecepatan aliran masih berada di saluran masuk.

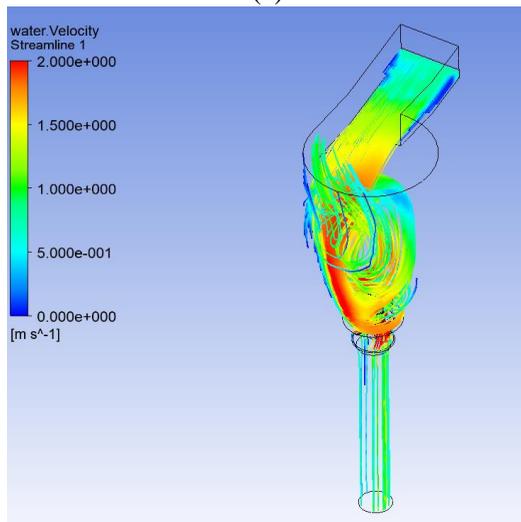
Berdasarkan hasil *streamline* kecepatan pada gambar 4.3 dapat dilihat bahwa untuk variasi 21 (13° , 100, -100) yaitu sudut *inlet* 13° , *streamline* yang berwarna jingga saat masuk kedalam *rotation tank* lebih banyak dibandingkan dengan variasi 12 (7° , 100, -100) yaitu sudut *inlet* 7° dan variasi 3 yaitu sudut 0° (0° , 100, -100). *Streamline* berwarna jingga ini mengindikasikan bahwa kecepatan aliran air sebesar 1,5 m/s hingga 2 m/s. Apabila dibandingkan dengan variasi 3 (gambar 4.3 a), *streamline* yang berwarna jingga pekat berada saat didalam *rotation tank* artinya perubahan kecepatan air terjadi karena pengaruh air bergerak ke bawah sehingga kecepatannya naik, sedangkan untuk variasi 21 (gambar 4.3 c) *streamline* yang berwarna jingga pekat sudah terbentuk saat *streamline* mulai memasuki tangki, hal ini mengindikasikan bahwa terjadi perubahan kecepatan akibat adanya perubahan sudut *inlet* pada saluran masuk. Meningkatnya kecepatan aliran didalam *rotation tank* menghasilkan energi kinetik yang besar sehingga energi kinetik yang mengenai *runner* akan menghasilkan RPM yang besar pula. Hal ini dibuktikan dengan data yang diperoleh dimana untuk variasi 3 memiliki RPM sebesar 129,67, variasi 12 sebesar 137,67 dan untuk variasi 21 sebesar 159,33.

Selain itu, nilai perubahan pada sudut *inlet* ini juga memiliki pengaruh terhadap torsi yang dihasilkan. Torsi eksperimen ini diperoleh dengan cara mengukur gaya yang dihasilkan dari RPM poros dengan menggunakan neraca pegas yang dikaitkan pada *pulley*, nilai gaya yang diperoleh kemudian dikalikan dengan jari-jari *pulley*

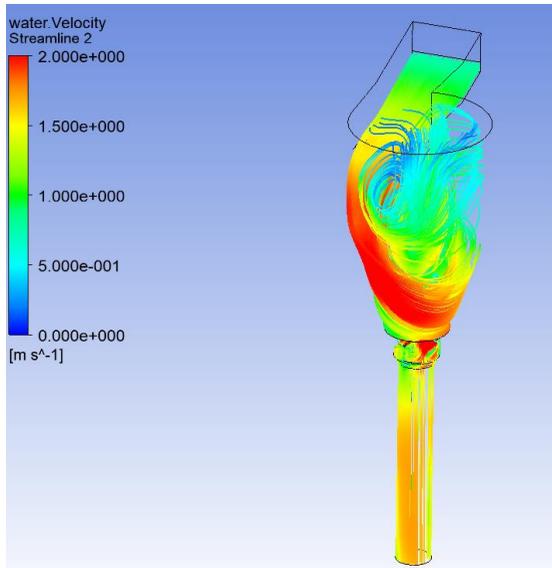
sehingga akan diperoleh nilai torsi eksperimen. Berikut ini merupakan grafik torsi antara hasil eksperimen dengan torsi simulasi pada variasi sudut *inlet*.



(a)

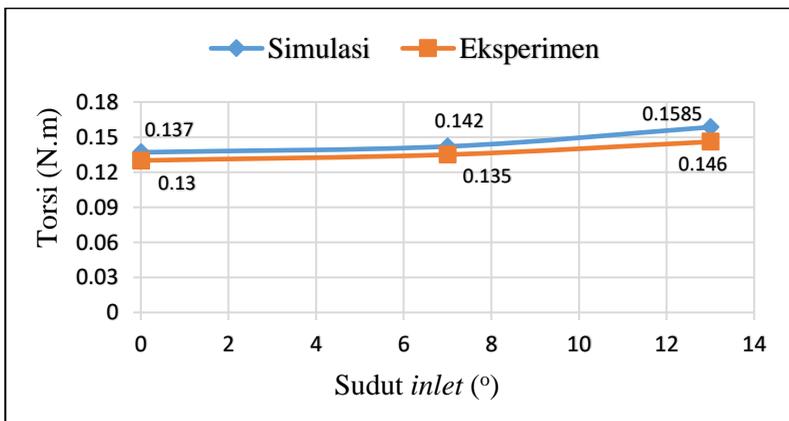


(b)



(c)

Gambar 4.3 Hasil *streamline* kecepatan pada (a) variasi 3, (b) variasi 12 dan (c) variasi 21



Gambar 4.4 Pengaruh sudut *inlet* terhadap torsi

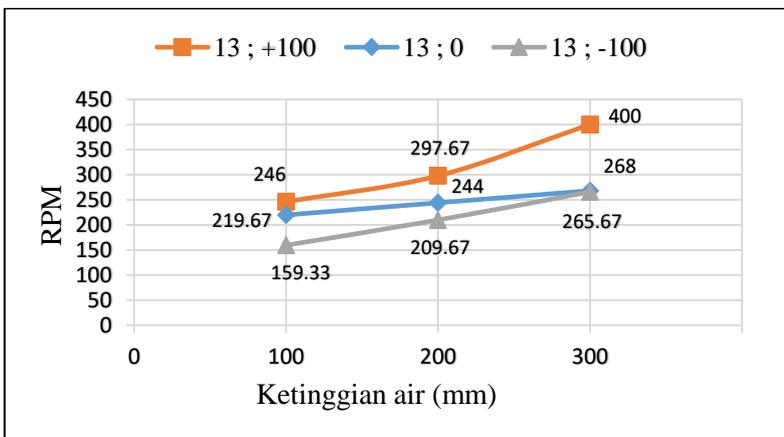
Pada gambar 4.4 merupakan grafik dari torsi simulasi dengan torsi eksperimen dengan kondisi ketinggian air didalam *rotation tank* sebesar 300 mm dan posisi dari *draft tube* berada dibawah *tail race* 100 mm (-100). Berdasarkan hasil dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa torsi maksimal terjadi pada variasi sudut *inlet* sebesar 13° yaitu sebesar 0,146 N.m, seperti yang telah dijelaskan bahwasannya ketika sudut *inlet* semakin besar maka luas permukaan dari saluran masuk akan semakin kecil. Dengan menurunnya luas permukaan maka kecepatan aliran akan semakin naik, hal ini sesuai dengan persamaan dari kontinuitas.

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad (4.1)$$

Kecepatan aliran didalam *rotation tank* yang tinggi akan meningkatkan gaya yang dihasilkan, semakin tinggi kecepatan aliran maka energi kinetik yang dimiliki oleh aliran tersebut semakin besar sehingga torsi yang dihasilkan oleh *runner* juga semakin besar.

4.4 Pengaruh Ketinggian Air di Rotation Tank Terhadap RPM dan Torsi

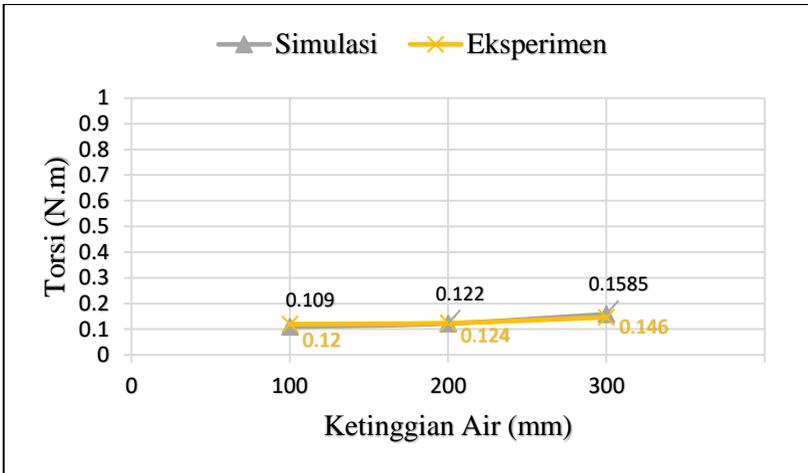
Pada penelitian ini, ketinggian air di dalam *rotation tank* termasuk kedalam variabel bebas yang mana variasi dari ketinggian air sebesar 100 mm, 200 mm, dan 300 mm. Variasi tersebut dipilih berdasarkan debit maksimal sungai yang masuk kedalam *penstock*.



Gambar 4.5 Grafik pengaruh ketinggian air terhadap RPM

Gambar 4.5 merupakan grafik pengaruh dari ketinggian air didalam *rotation tank* terhadap RPM yang dihasilkan. Terdapat tiga grafik dengan kondisi *draft tube* yang berbeda, dari ketiga grafik tersebut memiliki kondisi yang sama pada sudut *inlet* yang dibentuk yaitu sebesar 13° . Untuk grafik berwarna jingga memiliki posisi *draft tube* diatas permukaan *tail race* sebesar 100 mm (+100), grafik berwarna biru memiliki posisi *draft tube* di permukaan *tail race* (0) dan untuk grafik abu-abu memiliki posisi *draft tube* dibawah permukaan dari *tail race* sebesar 100 mm (-100). Dari ketiga grafik tersebut dapat dilihat bahwa seiring dengan menaiknya ketinggian air didalam *rotation tank*, maka RPM yang dihasilkan oleh poros semakin naik. Seperti terlihat pada grafi berwarna abu-abu yang mana ketika ketinggian air 100 mm maka RPM yang dihasilkan sebesar 159,33, ketika ketinggian air 200 mm RPM menjadi 209,67 dan ketika ketinggian air 300 mm nilai RPM naik menjadi 265,67. Hal ini dikarenakan pada variasi ketinggian air 300 mm memiliki nilai debit yang lebih tinggi yaitu $0,0081 \text{ m}^3/\text{detik}$ sedangkan untuk ketinggian air 200 mm dan 100 mm memiliki debit sebesar $0,0051 \text{ m}^3/\text{detik}$ dan $0,003 \text{ m}^3/\text{detik}$. Debit sendiri merupakan perkalian antara kecepatan aliran dengan luas penampang, grafik pada gambar 4.5 memiliki nilai sudut *inlet* yang sama yaitu 13° sehingga luas permukaan saluran masuk sama. Semakin besar nilai dari ketinggian air didalam *rotation tank* maka massa air yang menumbuk permukaan dari *runner* semakin besar, sehingga hal tersebut akan memberikan RPM dari *runner* semakin naik.

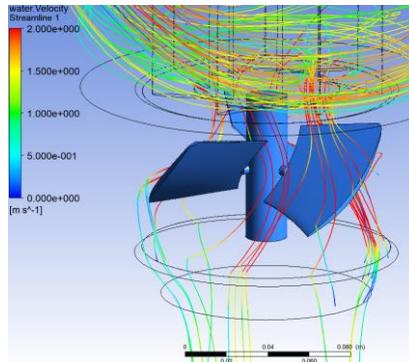
Selain memiliki pengaruh terhadap nilai RPM yang dihasilkan, ketinggian air didalam *rotation tank* juga berpengaruh terhadap torsi yang dihasilkan. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.6 yang berisi mengenai pengaruh ketinggian air terhadap torsi dengan sudut *inlet* 13° dan posisi *draft tube* 100 mm dibawah permukaan *tail race*. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai torsi terbesar terletak pada ketinggian air 300 mm yaitu sebesar 0,146 N.m sedangkan nilai torsi terendah terdapat pada ketinggian air 100 mm yaitu sebesar 0,12 N.m



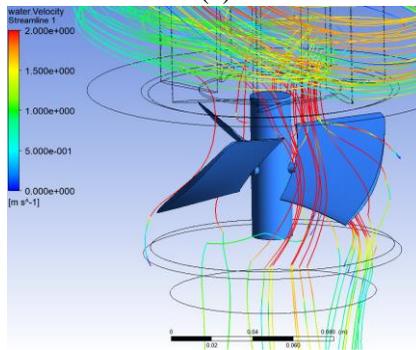
Gambar 4.6 Grafik pengaruh ketinggian air terhadap torsi

Berbeda dengan nilai RPM yang semakin naik seiring dengan kenaikan air didalam *rotation tank*, namun pada gambar 4.6 nilai torsi tidak mengalami penurunan seiring dengan naiknya nilai RPM, hal ini terjadi karena pengukuran torsi dilakukan pada keadaan torsi maksimum yaitu ketika kondisi dari *pulley* berhenti berputar. Selain itu, *pulley* yang digunakan untuk pengukuran torsi ini memiliki diameter yang sama sehingga tidak terjadi perubahan lengan gaya saat pengukuran torsi. Torsi tertinggi terdapat pada saat ketinggian air sebesar 300 mm, hal ini dikarenakan semakin tinggi posisi air di *rotation tank* maka debit yang masuk juga besar. Dengan meningkatnya debit aliran yang masuk maka massa aliran air yang menumbuk ke permukaan *runner* akan besar, sehingga energi kinetik yang mengenai *runner* akan besar pula. Energi kinetik ini akan terkonversi menjadi torsi sehingga torsi yang dihasilkan oleh *runner* juga semakin besar.

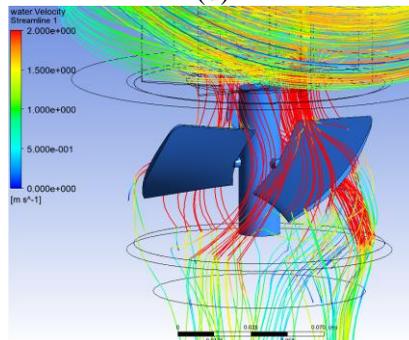
Gambar 4.7 merupakan hasil *streamline* yang diambil dari simulasi dengan pengaturan jumlah *streamline* sebesar 300. Gambar 4.7 ini merupakan variasi 20 (gambar a), variasi 23 (gambar b) dan variasi 26 (gambar c).



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.7 *Streamline* pada bagian rotor (a) ketinggian air 100 mm (b) ketinggian air 200 mm dan (c) ketinggian air 300 mm

Berdasarkan gambar 4.7 dapat dilihat bahwa *streamline* yang mengenai permukaan dari *runner* pada kondisi ketinggian air sebesar 300 mm lebih banyak apabila dibandingkan dengan *streamline* pada kondisi ketinggian air sebesar 100 mm dan 200 mm. Dengan banyaknya *streamline* yang mengenai permukaan *runner* maka semakin besar massa air yang mengenai *runner* sehingga dengan meningkatnya massa maka energi kinetik yang diberikan oleh air kepada *runner* semakin besar sehingga torsi yang dihasilkan akan besar pula.

4.5 Pengaruh Perubahan Posisi dari *Draft Tube*

Posisi dari *draft tube* memiliki pengaruh terhadap beberapa parameter pengukuran, diantaranya yaitu tekanan dan kecepatan pada sisi *inlet* dan *outlet* dari *draft tube*. Analisa dari *draft tube* ini dilakukan dengan tiga kondisi yaitu sisi *outlet* dari *draft tube* berada 100 mm diatas permukaan *tail race*, sisi *outlet* berada di permukaan *tail race* dan sisi *outlet* berada 100 mm dibawah permukaan *tail race*.

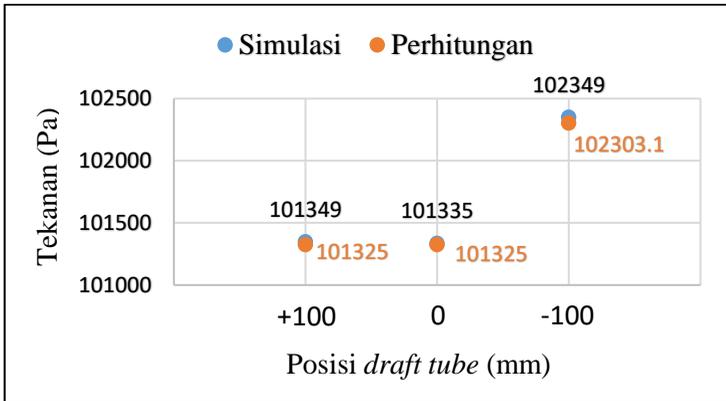
4.5.1 Pengaruh Posisi *Draft Tube* Terhadap Tekanan Absolute *Outlet Draft Tube*

Draft tube merupakan komponen yang ada pada turbin vorteks, dimana fungsi dari *draft tube* adalah mengurangi kecepatan aliran air pada bagian *outlet runner* yang kemudian akan diubah menjadi energi tekanan pada sisi *outlet draft tube* sehingga dapat mengurangi kerugian energi kinetik pada sisi *outlet runner*. Fungsi utama dari *draft tube* adalah untuk meningkatkan efisiensi dari turbin dengan cara merubah energi kinetik menjadi energi tekanan dengan cara menurunkan kecepatan aliran yang keluar pada sisi *runner*.^[18]

Pada penelitian ini proses validasi mengenai tekanan pada *draft tube* dilakukan dengan cara membandingkan hasil simulasi dengan hasil secara perhitungan. Secara perhitungan, persamaan Bernoulli digunakan untuk menentukan tekanan pada *draft tube* (persamaan 2.4).

Gambar 4.8 merupakan grafik dari tekanan absolute pada sisi *outlet draft tube* dari variasi 25 dengan posisi *draft tube* 100 mm diatas *tail race* (+100), variasi 26 kondisi *draft tube* berada dipermukaan *tail race* (0) dan variasi 27 yaitu kondisi *draft tube* berada 100 mm

dibawah permukaan *tail race* (-100). Grafik diatas terdiri dari grafik secara perhitungan dan simulasi. Dari kedua grafik tersebut dapat dilihat bahwa pola yang dihasilkan sama, hal ini mengindikasikan bahwa hasil antara simulasi dengan perhitungan sudah sesuai.



Gambar 4.8 Grafik tekanan absolute pada *outlet draft tube* dengan variasi posisi *draft tube*

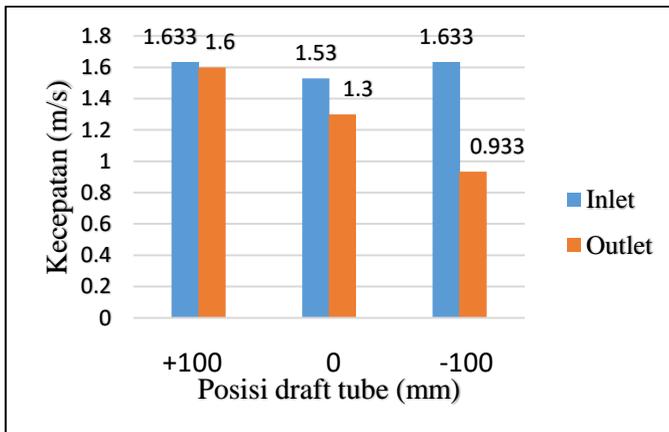
Berdasarkan grafik pada gambar 4.8 dapat dilihat bahwa tekanan *outlet draft tube* diatas *tail race* (+100) dan kondisi *draft tube* dipermukaan *tail race* (0) memiliki grafik yang sejajar yaitu 101325 Pa untuk *draft tube* diatas *tail race* dan 101325 Pa untuk *draft tube* dipermukaan *tail race*. Hal ini memberikan arti bahwa tidak terjadi perubahan tekanan absolute yang besar ketika posisi *draft tube* diatas *tail race* maupun dipermukaan *tail race*. Pada kedua kondisi tersebut sisi *outlet* tidak tercelup ke dalam air sehingga tekanan yang terjadi pada sisi *outlet* hanya terpengaruh oleh tekanan atmosfer, seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.4 dimana tekanan absolute pada sisi *outlet* dipengaruhi oleh kedalaman dari *draft tube* yang tercelup ke dalam air. Berbeda halnya dengan kondisi *draft tube* yang berada 100 mm dibawah permukaan *tail race*. Berdasarkan grafik, tekanan yang dimiliki oleh kondisi *draft tube* dibawah permukaan *tail race* memiliki nilai tekanan absolute yang lebih besar dibandingkan dengan kedua kondisi lainnya yaitu sebesar 102303,1 Pa, hal ini dikarenakan pada kondisi ini *draft tube* dalam keadaan vakum yang mana sisi *outlet*

tercelup kedalam air setinggi 100 mm, sehingga apabila dilihat secara perhitungan nilai tekanan absolute pada sisi *outlet draft tube* (gambar 2.9) akan dipengaruhi oleh ketinggian dari bagian *draft tube* yang tercelup kedalam air.

4.5.2 Pengaruh Posisi *Draft Tube* Terhadap Kecepatan *Inlet* dan *Outlet Draft Tube*

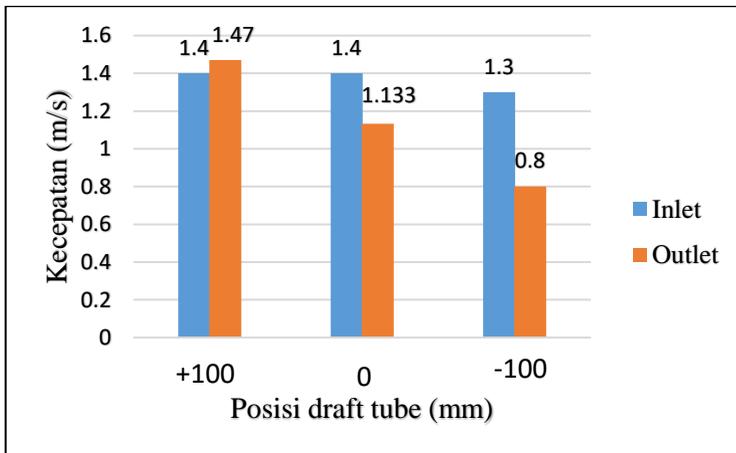
Berdasarkan fungsi utama dari *draft tube* yaitu mengubah energi kinetik yang telah melewati *runner* menjadi energi tekanan pada sisi *outlet draft tube*. Proses perubahan energi kinetik menjadi energi tekanan dilakukan dengan cara menurunkan kecepatan pada sisi *outlet runner* (gambar 2.9)

Berdasarkan dua grafik batang pada gambar 4.9 dan gambar 4.10 dapat dilihat bahwa terjadi penurunan kecepatan ketika sisi *outlet draft tube* dipermukaan *tail race*, dan 100 mm dibawah permukaan *tail race*. Pada gambar 4.9 nilai kecepatan *inlet* pada posisi *draft tube* 0 sebesar 1,53 m/s sedangkan kecepatan *outlet*nya menjadi 1,13 m/s dan untuk posisi *draft tube* -100 nilai kecepatan *inlet* sebesar 1,633 m/s menjadi 0,933 m/s pada sisi *outlet*. Penurunan kecepatan ini sesuai dengan persamaan 2.4 dimana ketika tekanan semakin besar, maka nilai kecepatannya semakin menurun.



Gambar 4.9 Grafik kecepatan *inlet* dan *outlet* pada variasi 25 (+100), variasi 26 (0) dan variasi 27 (-100)

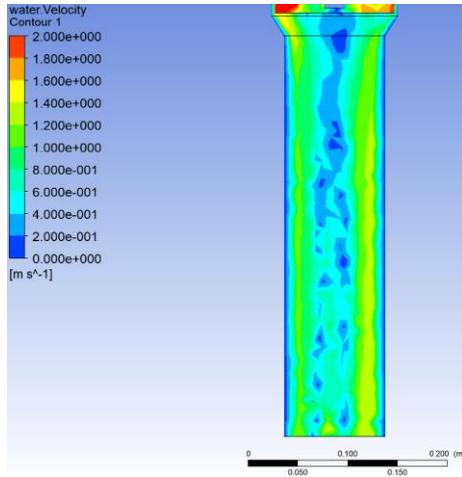
Berbeda halnya dengan posisi *draft tube* yang berada di atas permukaan *tail race*, pada kondisi ini sisi *outlet draft tube* berada di kondisi atmosfer sehingga fungsi utama dari *draft tube* yaitu menurunkan kecepatan pada sisi *outlet* tidak berlaku. Nilai kecepatan pada sisi *outlet* memiliki nilai yang sama dengan nilai kecepatan pada sisi *outlet runner*. Terlihat pada gambar 4.10 dengan posisi *draft tube* +100 nilai kecepatan *inlet* sebesar 1,4 m/s dan *outlet* sebesar 1,47 m/s. Pada posisi *draft tube* diatas permukaan *tail race* energi kinetik aliran setelah melewati *runner* tidak diubah menjadi energi tekanan, sehingga pada kondisi ini terjadi kehilangan energi kinetik.



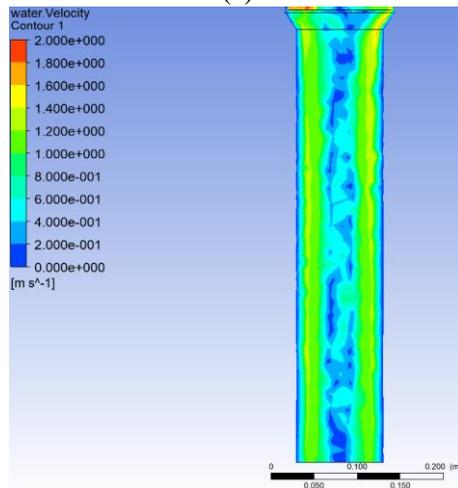
Gambar 4.10 Grafik kecepatan *inlet* dan *outlet* pada variasi 13 (+100), variasi 14 (0) dan variasi 15 (-100)

Berdasarkan gambar 4.11 dapat dilihat hasil kontur kecepatan pada masing-masing variasi dengan posisi *draft tube* yang berbeda. Pada variasi 27 (gambar 4.11 c) terlihat bahwa pada bagian sisi *outlet runner*, kontur berwarna kuning kemerahan, warna ini mengindikasikan bahwa pada *streamline* tersebut kecepatannya besar berkisar antara 1,4 hingga 2 m/s, sedangkan pada bagian sisi *outlet draft tube* kontur yang dihasilkan dominan berwarna hijau yang mana warna ini mengindikasikan bahwa aliran memiliki kecepatan didaerah 1 m/s. Berbeda halnya pada variasi 25 (gambar 4.11 a), pada sisi *outlet*

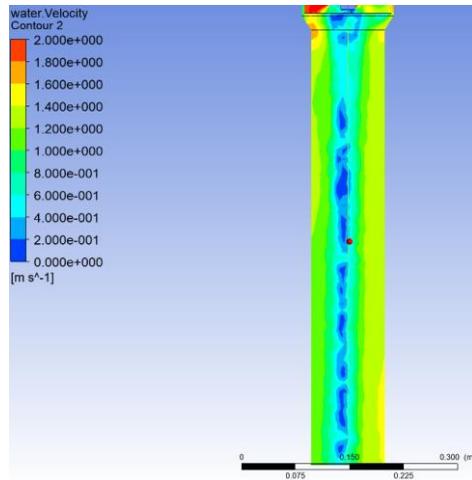
runner dapat dilihat bahwa warna dominan dari *streamline* yaitu berwarna hijau-kuning sedangkan pada sisi *outlet draft tube*, kontur yang dihasilkan berwarna hijau-kuning, hal ini mengindikasikan bahwa pada kondisi *draft tube* diatas *tail race* kecepatan antara *inlet* dan *outlet* tidak terjadi perubahan kecepatan yang besar.



(a)



(b)



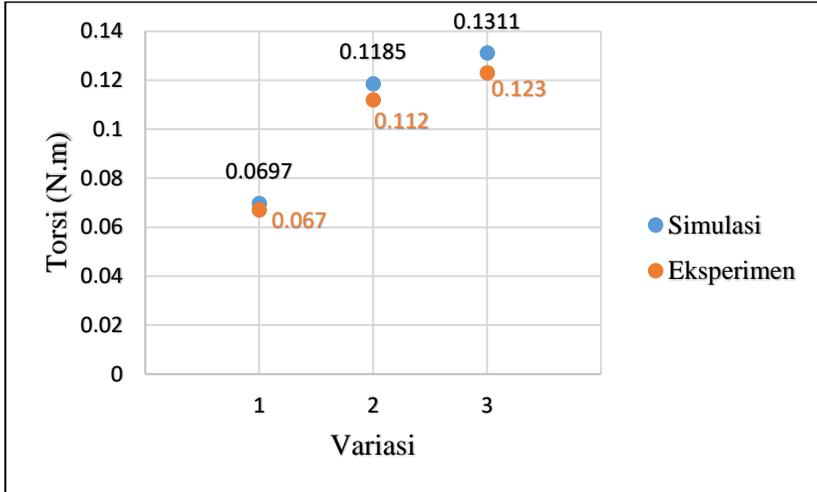
Gambar 4.11 Kontur kecepatan pada (a) variasi 25, (b) variasi 26 dan (c) variasi 27

4.5.3 Pengaruh Posisi *Draft Tube* Terhadap Torsi

Posisi *draft tube* memberikan dampak kepada torsi yang dihasilkan oleh turbin. Pada posisi *draft tube* dengan kondisi berada 100 mm dibawah permukaan *tail race* (-100) memiliki nilai torsi yang lebih tinggi apabila dibandingkan dengan nilai torsi ketika kondisi *draft tube* berada di permukaan maupun diatas *tail race*. Bahkan untuk posisi *draft tube* diatas *tail race* (+100), nilai torsi yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan dua kondisi lainnya. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.12

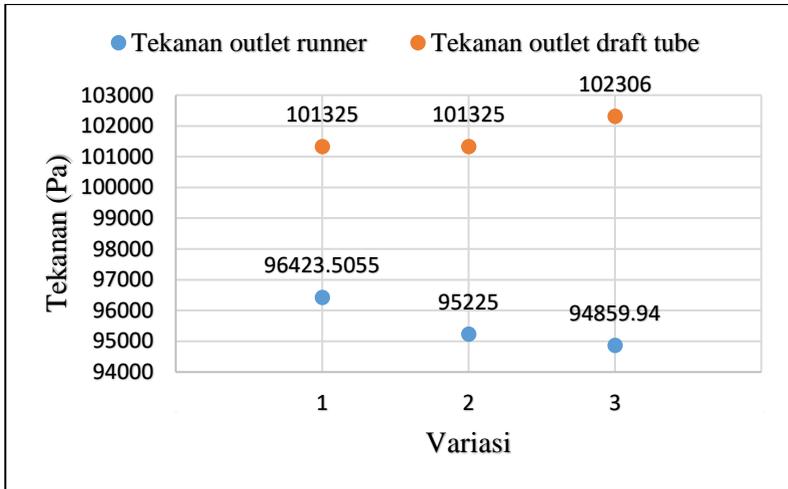
Gambar 4.12 ini merupakan grafik hasil torsi dari variasi 1, variasi 2 dan variasi 3 dengan posisi *draft tube* yaitu +100, 0 dan -100. Pemilihan variasi 1, 2 dan 3 menunjukkan bahwa perubahan torsi tidak hanya terjadi pada variasi 25, 26 dan 27 saja. Berdasarkan grafik pada gambar 4.12 dapat dilihat bahwa nilai torsi tertinggi terdapat pada variasi 3 sebesar 0,123 N.m yaitu ketika posisi dari *draft tube* berada 100 mm dibawah permukaan *tail race*. Hal ini dikarenakan pada posisi tercelup maka *draft tube* dalam keadaan vakum atau berada dibawah tekanan atmosfer. Karena pada bagian *draft tube* memiliki tekanan dibawah tekanan atmosfer maka hal tersebut akan mengakibatkan

tarikan pada aliran air yang keluar dari *runner* menuju *outlet draft tube*.



Gambar 4.12 Pengaruh posisi *draft tube* terhadap torsi

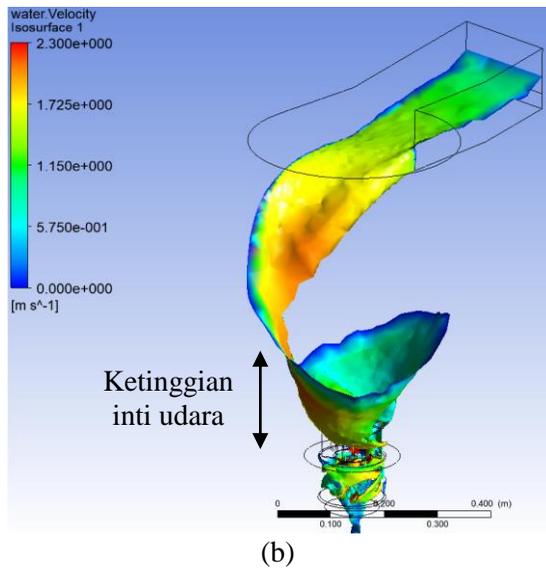
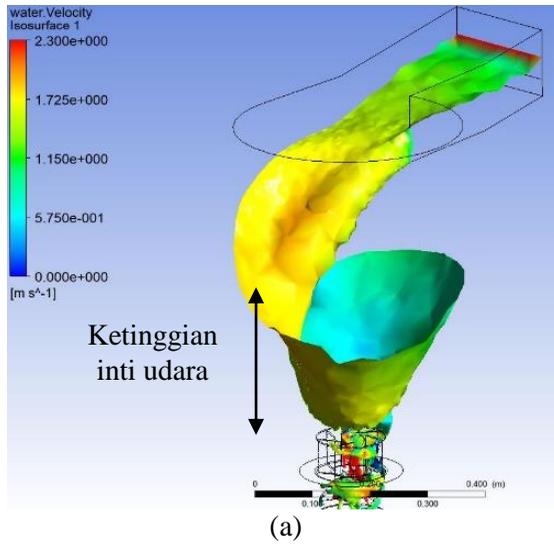
Dengan tertariknya air menuju *outlet draft tube*, maka hal tersebut memberikan gaya lebih kepada *runner* sehingga akan meningkatkan nilai torsi yang dihasilkan. Semakin besar selisih antara tekanan pada *outlet runner* dan *outlet draft tube* maka hal tersebut akan memberikan tarikan yang besar sehingga gaya yang ditimbulkan akan besar pula. Pada gambar 4.13 dapat dilihat bahwa jarak antara titik *outlet runner* dan titik *outlet draft tube* terbesar terletak pada variasi 3 yaitu kondisi *draft tube* 100 mm dibawah *tail race* (-100). Sehingga pada kondisi *draft tube* -100 efek tarikan yang terjadi semakin besar sehingga torsi yang dihasilkan pada *runner* semakin besar pula.

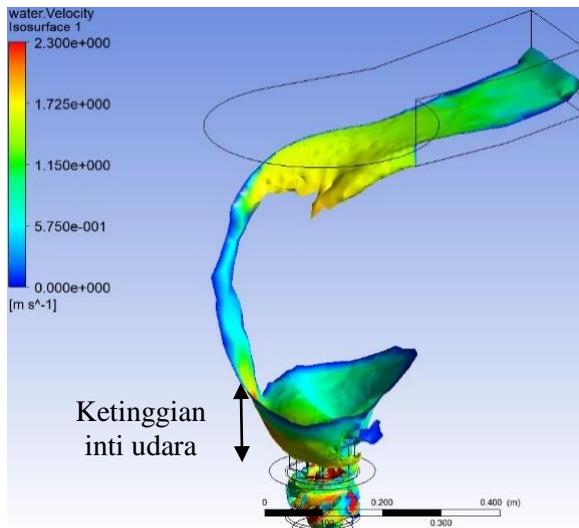


Gambar 4.13 Tekanan *outlet runner* dan *outlet draft tube*

4.6 Kontur Vorteks yang Terjadi

Kontur vorteks merupakan fenomena dari turbin vorteks *open flume*, yang mana kemunculan aliran vorteks ini berguna untuk menghasilkan daya yang lebih besar kepada turbin vorteks *open flume*. Terbentuknya vorteks ditandai dengan adanya inti udara yang terbentuk pada aliran vorteks. Tidak adanya inti udara pada suatu aliran menunjukkan bahwa aliran vorteks tidak terbentuk dengan benar. Inti udara terjadi karena aliran air yang keluar dari *outlet* pada *rotatio tank* menyebabkan pusaran air, pusaran air yang semakin cepat akan menyebabkan tekanan pada pusat pusaran/vorteks menjadi menurun. Tekanan ini berangsur-angsur akan mengalami penurunan hingga akhirnya berada dibawah tekanan atmosfer, ketika daerah pusat vorteks berada dibawah tekanan atmosfer maka akan terjadi efek hisap yang menyebabkan udara terhisap sehingga terbentuk inti udara.



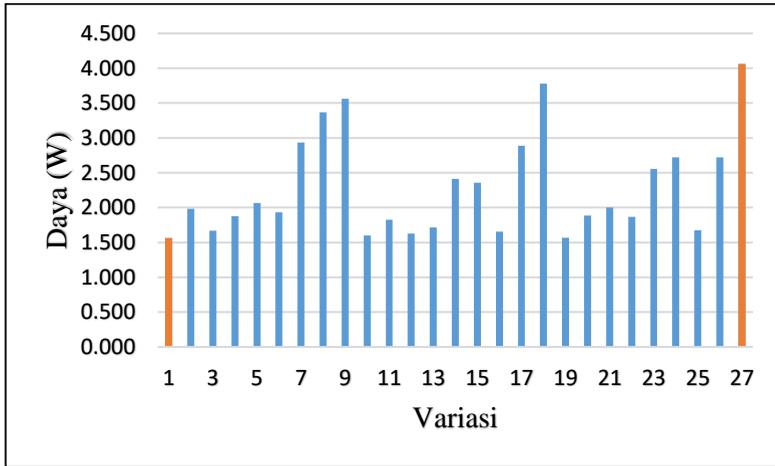


Gambar 4.14 Ketinggian air pada kondisi (a) 300 mm, (b) 200 mm dan (c) 100 mm

Pada gambar 4.14 dapat dilihat bahwa pada ketinggian air 300 mm, inti udara yang terbentuk memiliki ketinggian yang lebih tinggi apabila dibandingkan dengan inti udara pada ketinggian air 200 mm dan 100 mm. Hal ini mengindikasikan bahwa pada ketinggian 300 mm, daya yang dihasilkan oleh aliran vorteks lebih besar dibandingkan dengan ketinggian 200 mm dan 100 mm. Untuk ketinggian air 100 mm, ketinggian inti udara yang terbentuk lebih rendah, hal ini disebabkan karena debit air yang masuk lebih kecil daripada debit dengan ketinggian air 300 mm, sehingga inti udara yang terbentuk juga rendah. Berdasarkan penelitian dari Nauman Hanif, kecepatan tangensial air pada aliran vorteks berbanding terbalik dengan jari-jari dari pusat inti vorteks, sedangkan untuk nilai dari kecepatan aksial pada aliran vorteks tergantung pada kedalaman dari inti udara yang terbentuk.

4.7 Daya Poros Turbin

Dari aliran vorteks yang terbentuk didalam *rotation tank* menyebabkan putaran pada *runner*. Dari putaran *runner* tersebut dapat diperoleh beberapa nilai seperti kecepatan sudut dan gaya, dimana gaya ini nantinya dapat menghasilkan torsi ketika dikalikan dengan lengan gaya yaitu jari-jari *pulley*. Nilai kecepatan sudut diperoleh dengan menggunakan *tachometer* yang diarahkan pada poros turbin. Dari nilai kecepatan sudut dan torsi yang diperoleh, maka dapat diperoleh daya dengan mengalikan antara kecepatan sudut dengan torsi. Nilai torsi dan kecepatan sudut pada masing-masing variasi dapat dilihat pada lampiran. Berikut ini merupakan grafik daya yang dihasilkan dari beberapa variasi.



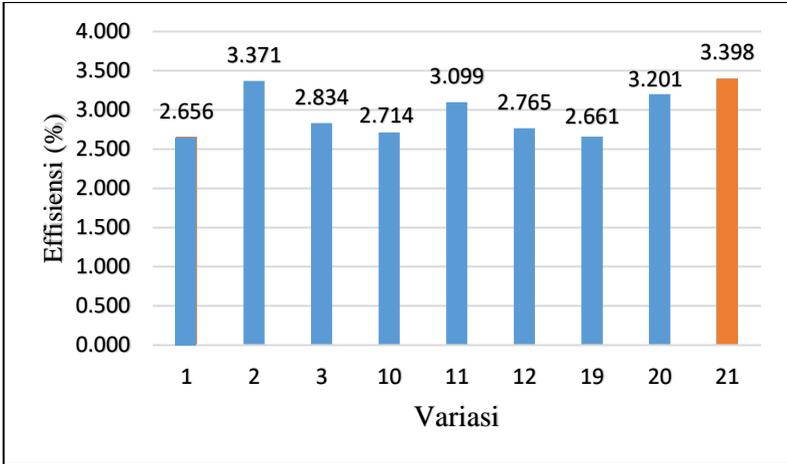
Gambar 4.15 Grafik batang daya pada beberapa variasi

Pada gambar 4.15, terlihat bahwa nilai daya tertinggi dihasilkan dari variasi 27 yaitu 4,06 W. Variasi ini memiliki kondisi sudut *inlet* sebesar 13° , ketinggian air didalam *rotation tank* 300 mm dan posisi dari *draft tube* 100 mm berada dibawah permukaan *tail race*. Pada variasi ini dihasilkan RPM sebesar 265,67 sedangkan torsi yang dihasilkan sebesar 0,146 N.m. Hal ini memberikan hasil bahwa dengan kondisi sudut *inlet* yang lebih besar, ketinggian air yang lebih tinggi dan posisi dari *draft tube* dibawah permukaan *tail race*

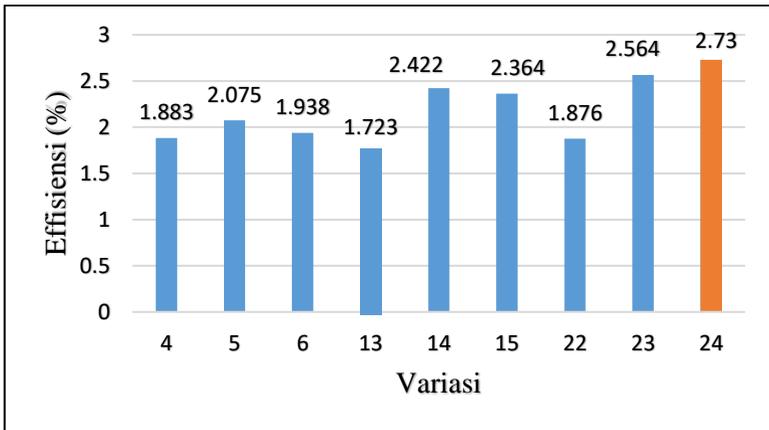
merupakan desain yang sesuai. Dengan adanya sudut *inlet* yang diperbesar maka hal ini akan membuat kecepatan air menjadi lebih tinggi saat memasuki *rotation tank* selain itu dengan sudut *inlet* yang lebih besar maka aliran yang memasuki *rotation tank* akan diarahkan sehingga aliran vorteks dapat terbentuk. Ketinggian air juga mempengaruhi massa air yang mengenai *runner*, apabila massa air yang mengenai *runner* lebih besar dengan kecepatan yang lebih tinggi maka hal ini akan memberikan gaya yang lebih besar. Posisi *draft tube* yang berada didalam air memberikan kondisi vakum yang menimbulkan beda tekanan antara sisi *outlet runner* dan *outlet draft tube*, sehingga keberadaan *draft tube* akan mengurangi kehilangan energi kinetik. Sedangkan variasi yang menghasilkan daya poros paling rendah adalah variasi 1 yaitu sebesar 1,564 W dengan kondisi sudut *inlet* sebesar 0°, ketinggian air didalam *rotation tank* 100 mm dan posisi dari *draft tube* berada 100 mm diatas *tail race*.

4.8 Effisiensi Turbin Vorteks *Open Flume*

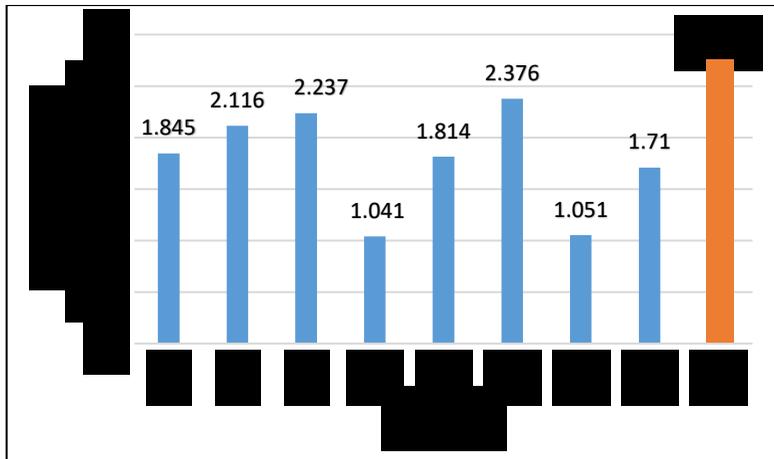
Effisiensi secara umum dapat diartikan sebagai ukuran suatu tingkat penggunaan sumber daya dalam suatu proses. Pada turbin vorteks ini, effisiensi dari sistem dilakukan dengan cara membagi nilai dari daya poros dengan daya hidrolik. Ketinggian air yang divariasikan sebesar 100 mm, 200 mm dan 300 mm memberikan perubahan pada debit air yang masuk kedalam *penstock*, sehingga hal tersebut mempengaruhi nilai dari daya hidrolik yang dihasilkan. Oleh karena itu, effisiensi yang diperoleh terdiri atas 3 variasi yaitu effisiensi untuk debit 0,003 m³/detik yaitu saat ketinggian air 100 mm, effisiensi debit 0,0051 m³/detik saat ketinggian air 200 mm dan effisiensi debit 0,0081 m³/detik saat ketinggian air 300 mm.



Gambar 4.16 Effisiensi untuk debit 0,003 m³/detik



Gambar 4.17 Effisiensi untuk debit 0,0051 m³/detik



Gambar 4.18 Effisiensi untuk debit 0,0081 m³/detik

Berdasarkan grafik pada gambar 4.16 terlihat bahwa efisiensi tertinggi untuk debit 0,003 m³/s terletak pada variasi 21 yaitu sebesar 3,398%, sedangkan efisiensi terendah terdapat pada variasi 1 yaitu sebesar 2,656%. Variasi 21 ini memiliki daya poros sebesar 2 W sedangkan untuk variasi 1 memiliki daya poros sebesar 1,56 W. Nilai daya poros yang besar akan memberikan dampak pada efisiensi turbin. Semakin besar nilai daya poros yang diperoleh maka nilai efisiensi akan besar, hal ini dikarenakan berdasarkan persamaan 2.3 nilai dari efisiensi berbanding lurus dengan daya poros. Apabila untuk debit 0,0051 m³/detik efisiensi tertinggi didapatkan pada variasi 24 yaitu sebesar 2,73% dengan nilai daya poros sebesar 2,72 W sedangkan efisiensi terendah dimiliki oleh variasi 13 yaitu sebesar 1,723% dengan nilai daya poros sebesar 1,72 W. Sedangkan untuk grafik pada gambar 4.18 yaitu efisiensi untuk debit 0,0081 m³/detik, nilai efisiensi tertinggi terletak pada variasi 27 yaitu 2,552% dengan nilai daya poros sebesar 4,06 W sedangkan untuk efisiensi terendah terdapat pada variasi 16 yaitu 1,041% dengan nilai daya poros sebesar 1,66 W. Berdasarkan hasil tersebut, pada posisi *draft tube* tercelup kedalam air dapat meningkatkan efisiensi sebesar 38,3% terhadap efisiensi pada saat kondisi *draft tube* berada 100 mm diatas permukaan *tail race*.

4.9 Diskusi

Picohydro merupakan salah satu jenis Pembangkit Listrik Tenaga Air yang dapat mengkonversi energi dari air menjadi energi listrik dengan daya kurang dari 5 kW. Salah satu penerapan dari *picohydro* adalah turbin vorteks *open flume* yang memanfaatkan pusaran air sebagai penggerak *runner*. Pada tugas akhir ini membahas mengenai turbin vorteks *open flume* dengan variabel bebas berupa sudut *inlet* sebesar 0° , 7° dan 13° , ketinggian air didalam *rotation tank* sebesar 100 mm, 200 mm dan 300 mm, serta posisi dari *draft tube* yaitu pada sisi *outlet* berada 100 mm diatas *tail race* (+100), sisi *outlet* berada dipermukaan *tail race* (0) dan berada 100 mm dibawah permukaan *tail race* (-100). Pada tugas akhir dilakukan dua macam metode yaitu metode secara eksperimen dan simulasi. Metode eksperimen ini dengan melakukan percobaan pada alat yang sudah dibuat di sungai, sehingga akan diperoleh data berupa RPM, gaya, dan kecepatan air. Selanjutnya data RPM dan juga kecepatan air digunakan sebagai data *input* pada metode simulasi. Dari simulasi nantinya diperoleh data berupa torsi, pola aliran berupa *streamline* kecepatan, *isosurface* dari aliran, yang mana fenomena-fenomena tersebut tidak dapat dilihat ketika melakukan uji eksperimen pada turbin. Data hasil dari simulasi tersebut dapat digunakan sebagai data penunjang untuk mengetahui pengaruh variabel bebas terhadap aliran yang terjadi.

Berdasarkan hasil dari eksperimen diperoleh data berupa gaya, RPM dan kecepatan air. Nilai gaya yang diperoleh dikalikan dengan diameter dari *pulley* sebesar 0,05 m sehingga diperoleh torsi. Data torsi tersebut dikalikan dengan RPM sehingga diperoleh daya poros pada masing-masing konfigurasi. Dari uji eksperimen diperoleh daya terbesar pada konfigurasi 27 yaitu 4,06 W dengan torsi sebesar 0,146 N.m dan RPM sebesar 265,67. Konfigurasi 27 ini memiliki variasi sudut *inlet* sebesar 13° , ketinggian air di *rotation tank* 300 mm serta posisi dari *draft tube* berada 100 mm dibawah permukaan *tail race* (-100). Sedangkan daya terendah terdapat pada variasi 1 sebesar 1,56 W dengan sudut *inlet* 0° , ketinggian air 100 mm dan posisi *draft tube* 100 mm diatas permukaan *tail race* (+100). Berdasarkan data tersebut, maka dapat dilihat bahwa terdapat pengaruh dari konfigurasi sudut *inlet*, ketinggian air serta posisi dari *draft tube*.

Sudut *inlet* memiliki pengaruh terhadap RPM dan torsi yang dihasilkan. Hal ini dapat terlihat pada ketinggian air sebesar 300 mm, posisi *draft tube* 100 mm dibawah permukaan *tail race* dengan variasi sudut *inlet*, diperoleh hasil bahwa ketika sudut *inlet* 0° dihasilkan RPM sebesar 129,67, sudut *inlet* 7° dihasilkan RPM 137,67 dan ketika sudut *inlet* 13° dihasilkan RPM 159,33. Berdasarkan data tersebut terlihat bahwa semakin besar sudut *inlet* yang terbentuk maka RPM yang dihasilkan semakin besar, hal ini dikarenakan semakin besar sudut *inlet* yang dibentuk maka kecepatan aliran air yang masuk kedalam *rotation tank* semakin besar sehingga RPM yang dihasilkan semakin besar pula. Selain itu, pada konfigurasi yang sama, nilai torsi yang dihasilkan pada sudut *inlet* 0° , 7° dan 13° sebesar 0,13 N.m, 0,135 N.m dan 0,146 N.m sehingga dapat terlihat bahwa nilai torsi semakin besar seiring dengan bertambahnya sudut *inlet*. Hal ini dikarenakan semakin besar nilai kecepatan aliran maka energi kinetik yang dihasilkan semakin besar. Energi kinetik tersebut akan terkonversi menjadi suatu gaya sehingga torsi yang dihasilkan akan semakin besar pula.

Ketinggian air didalam *rotation tank* juga memiliki peran terhadap RPM dan torsi yang dihasilkan. Pada kondisi sudut *inlet* 13° dan posisi *draft tube* berada di permukaan *tail race* (0) dengan ketinggian air yang berbeda diperoleh data RPM pada ketinggian 100 mm sebesar 219,67, ketinggian 200 mm sebesar 244 dan ketinggian 300 mm sebesar 268. Dari data tersebut terlihat bahwa semakin besar ketinggian air maka RPM yang dihasilkan semakin besar. Ini dikarenakan semakin tinggi air didalam *rotation tank*, maka massa air yang menumbuk permukaan *runner* semakin besar sehingga akan memberikan RPM yang besar pula. Selain itu ketinggian air ini juga memiliki pengaruh terhadap torsi yang dihasilkan. Pada konfigurasi sudut *inlet* 13° dan posisi *draft tube* 100 mm dibawah permukaan *tail race*, ketinggian air 300 mm menghasilkan torsi terbesar yaitu 0,146 N.m sedangkan torsi terendah yaitu 0,12 N.m ketika ketinggian air sebesar 100 mm. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.6 mengenai pola *streamline* aliran yang mengenai permukaan *runner*. Dari gambar 4.6 terlihat bahwa pada ketinggian air 300 mm aliran *streamline* yang mengenai *runner* lebih banyak jika dibandingkan dengan ketinggian air 100 mm dan 200 mm. Semakin banyak *streamline* maka

mengindikasikan semakin besar energi kinetik yang dihasilkan sehingga torsi juga semakin besar.

Selain itu posisi dari *draft tube* ini juga memiliki pengaruh terhadap torsi dan juga dapat meningkatkan efisiensi dari turbin. Pada variasi 1, 2 dan 3 dengan sudut *inlet* sebesar 0° , ketinggian air sebesar 100 mm, dengan posisi *draft tube* yang berbeda, diperoleh nilai torsi terbesar pada variasi 3 yaitu 0,123 N.m dengan kondisi *draft tube* 100 mm dibawah permukaan *tail race*. Hal ini dikarenakan ketika posisi tercelup maka *draft tube* berada dalam keadaan vakum, sehingga terjadi perbedaan tekanan pada sisi *outlet runner* dan *outlet draft tube*. Perbedaan tekanan ini mengakibatkan tarikan pada aliran yang telah melewati *runner*. Dengan tertariknya aliran air maka hal ini akan memberikan gaya lebih pada *runner* sehingga torsi yang dihasilkan oleh *runner* semakin besar. Apabila dilihat dari efisiensi turbin, dimana efisiensi turbin merupakan pembagian antara daya poros dengan daya hidrolik. Diperoleh data ketika debit aliran sebesar $0,003 \text{ m}^3/\text{detik}$, efisiensi terbesar terdapat pada variasi 21 yaitu sebesar 3,398%, untuk debit $0,0051 \text{ m}^3/\text{detik}$ nilai efisiensi terbesar terdapat pada variasi 24 yaitu sebesar 2,73% sedangkan untuk debit $0,0081 \text{ m}^3/\text{detik}$ efisiensi tertinggi terdapat pada variasi 27 yaitu 2,552%. Dari ketiga variasi yang memiliki efisiensi tertinggi, ketiganya memiliki posisi *draft tube* yang sama yaitu berada 100 mm dibawah permukaan *tail race*. Sehingga dapat disimpulkan bahwa posisi dari *draft tube* memberikan kenaikan pada efisiensi turbin.

BAB V

KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang didapat berdasarkan analisa dan pembahasan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut,

1. Telah diperoleh pada variasi sudut *inlet* sebesar 13° menghasilkan daya terbesar yaitu 4,06 W sedangkan untuk sudut *inlet* sebesar 0° menghasilkan daya paling rendah yaitu 1,56 W.
2. Telah diperoleh bahwa semakin tinggi air didalam *rotation tank* maka daya yang dihasilkan semakin besar. Pada variasi yang telah dilakukan daya terbesar yang diperoleh yaitu 4,06 W dengan ketinggian air didalam *rotation tank* sebesar 300 mm.
3. Telah diperoleh hasil pada posisi *draft tube* -100 memiliki tekanan *outlet* 102303,1 Pa, posisi 0 sebesar 101325 Pa dan posisi +100 sebesar 101325 Pa. Pada posisi *draft tube* berada dibawah permukaan *tail race* mengalami peningkatan effisiesni sebesar 38,3% terhadap efisiensi pada posisi *draft tube* 100 mm diatas permukaan *tail race*.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh hasil bahwa konfigurasi terbaik yaitu pada kondisi sudut *inlet* 13° , ketinggian air 300 mm dan posisi *draft tube* 100 mm dibawah permukaan *tail race*

5.2. Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan diperoleh hasil bahwa posisi dari *draft tube* memiliki pengaruh terhadap efisiensi yang dihasilkan, sehingga hal ini menarik apabila dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai geometri dari *draft tube*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. J. P. Pardede, "Analisa Teoritis Turbin Vorteks Dengan Rumah Turbin Berbentuk Lingkaran Dengan Variasi Diameter Saluran Buang, Ketinggian Air dan Diameter Runner," Medan, 2015.
- [2] A. P. Harsarapama, "Turbin Mikrohidro Open Flume Dengan Hub to Tip Ratio 0,4 Untuk Daerah Terpencil," Depok, 2012.
- [3] E. Suryono and A. Nusantara, "Simulasi Turbin CrossFlow Dengan Jumlah Sudu 18 Sebagai Pembangkit Listrik Picohydro," *SIMETRIS*, vol. 8, p. 548, 2 November 2017.
- [4] A. E. Setyono, A. Yulian, F. A. Wicaksono and V. Ventriolla, "Pembuatan Turbin Vortex Dengan Sudu Berbentuk Spiral Sebagai Upaya Untuk Meningkatkan Efisiensi," Semarang, 2017.
- [5] R. A. Subekti, "Analisis Aliran FLuida Dinamik Pada Draft Tube Turbin Air," 2009.
- [6] I. F. Tanjung, "Analisa Performansi Turbin Vortex Menggunakan Perangkat Lunak CFD Dengan Variasi Dimensi Sudu I dan Sudu III, Debit Air Masuk Serta Luas Saluran Buang," Medan, 2013.
- [7] Hudan. A. K and P. H. Adiwibowo, "Pengaruh Sudut Inlet Notch Pada Turbin Reaksi Aliran Vortex Terhadap Daya dan Efisiensi," vol. 05, p. 62, 2017.
- [8] Y. Nishi and T. Inagaki, "Performance and Flow Field of a Gravitation Vortex Type Water Turbine," vol. 2017, 16 Maret 2017.
- [9] I. Taufiq, "Menilai Potensi Energi Dari Aliran Air Selokan Kampus IV Universitas Pasundan Bandung," Bandung, 2011.
- [10] T. M. Syahputra, M. Syukri and I. D. Sara, "Rancang Bangun Prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Piko Hydro Dengan Menggunakan Turbin Ulir," vol. 2, p. 16, 2017.

- [11] W. Ratnata, W. Surya and M. Somantri, "Analisis Potensi Pembangkit Energi Listrik Tenaga Air di Saluran Air Sekitar Universitas Pendidikan Indonesia," p. 258, 14 November 2013.
- [12] Marfizal. "Perancangan Turbin Propeller dan Pengujian Pengaruh Bentuk Penampang Sudu Turbin Terhadap Effisiensi Turbin," Padang, 2015.
- [13] A. Siregar, M. Syukri, I. D. Sara, S. and M. Gapy, "Rancang Bangun Prototype PLTPH Menggunakan Turbin Open Flume," p. 67, 2015.
- [14] M. Rahman, "Pengaruh Soliditas dan Penggunaan Sudu Pengarah Aliran Terhadap Unjuk Kerja Model Turbin Helik," Bandar Lampung, 2018.
- [15] S. Dhakal, S. Nakarmi, P. Pun, A. B. Thapa and T. R. Bajracharya, "Development and Testing of Runner and Conical Basin for Gravitational Water Vortex Power Plant," vol. 10, p. 147.
- [16] W. D. Prasetyo, "Rancang Bangun Turbin Vortex Skala Kecil dan Pengujian Pengaruh Bentuk Penampang Sudu Terhadap Daya," Yogyakarta, 2018.
- [17] Chapaliaz. J., E. P. and F. G., "Manual on Pumps Used as Turbines," vol. 11, 1992.
- [18] A. I. Abbas and R. S. Amano, "Optimization of Intake and Draft Tubes of a Kaplan Micro Hydro-Turbine," July 2017.
- [19] Tridon. S, "Experimental Analysis of The Swirling Flow in a Francis Turbine Draft Tube : Focus on Radial Velocity Component Determination," p. 322, 15 Februari 2010.
- [20] M. Rahman, T. J. Hong, R. Tang and L. L. Sung, "Experimental Study The Effect of Water Pressure and Turbine Blade Lengths & Numbers on The Model Free Vortex Power Generation System," vol. 2, no. 9, September 2016.
- [21] S. Dhakal, A. B. Timilsina and R. Dhakal, "Comparison of Cylindrical and Conical Basins with Optimum Position of Runner : Gravitational Water Vortex Power Plant," p. 663, 3 April 2015.

- [22] Susilo, "Simulasi Mekanisme Passive-Pitch Dengan Flapping Wing Pada Turbin Vertikal Aksis Arus Sungai Jenis Darrieus Straight-Bladed Berbasis CFD," Surabaya, 2014.
- [23] Fluent Inc, *Fluent 6.1 User's Guide*, 2003, pp. 22-17.
- [24] N. H. Khan, "Blade Optimization of Gravitational Water Vortex Turbine," Pakistan, 2016.

LAMPIRAN

LAMPIRAN A : Variasi simulasi

Variasi	Sudut <i>inlet</i>	Ketinggian air di <i>rotation tank</i> (mm)	Posisi <i>draft tube</i> (mm)
1	0°	100	+100
2	0°	100	0
3	0°	100	-100
4	0°	200	+100
5	0°	200	0
6	0°	200	-100
7	0°	300	+100
8	0°	300	0
9	0°	300	-100
10	7°	100	+100
11	7°	100	0
12	7°	100	-100
13	7°	200	+100
14	7°	200	0
15	7°	200	-100
16	7°	300	+100
17	7°	300	0
18	7°	300	-100
19	13°	100	+100
20	13°	100	0
21	13°	100	-100
22	13°	200	+100
23	13°	200	0
24	13°	200	-100
25	13°	300	+100
26	13°	300	0
27	13°	300	-100

LAMPIRAN B : Data eksperimen

Variasi	Kecepatan <i>inlet</i> di saluran masuk (m/s)	Kecepatan di <i>draft tube</i> (m/s)		RPM
		<i>Inlet</i>	<i>Outlet</i>	
1	0,766	1,167	1,7	223
2	0,767	1,17	0,97	169,33
3	0,767	1,16	0,43	129,67
4	0,867	1,7	1,7	256
5	0,833	1,167	0,97	212,33
6	0,833	1,43	0,8	134,67
7	1,067	1,23	1,13	311,67
8	1,067	1,23	1	253,33
9	0,967	1,63	1,067	246,67
10	0,766	0,73	0,7	232,67
11	0,733	0,73	0,63	218
12	0,733	1,267	0,467	137,67
13	0,833	1,4	1,47	260,33
14	0,833	1,4	1,3	237,67
15	0,867	1,3	0,8	157,33
16	0,967	1,5	1,67	336,67
17	0,967	1,53	1,4	257,67
18	0,967	1,567	0,967	258
19	0,733	0,8	0,7	234
20	0,767	0,9	0,76	219,67
21	0,767	1,3	0,73	159,33
22	0,867	1,367	1,3	297,67
23	0,867	1,3	1,1	244
24	0,867	1,1	0,867	209,67
25	0,967	1,63	1,6	371,67
26	0,967	1,53	1,3	268
27	1,067	1,63	0,93	265,67

LAMPIRAN C : Data eksperimen dan simulasi

Variasi	Torsi (N.m)		Daya Poros (W)
	Eksperimen	Simulasi	
1	0,067	0,0697	1,56
2	0,1165	0,1185	1,98
3	0,123	0,1311	1,67
4	0,07	0,0722	1,87
5	0,093	0,1043	2,06
6	0,137	0,1461	1,93
7	0,09	0,0987	2,93
8	0,127	0,135	3,36
9	0,138	0,145	3,56
10	0,063	0,0671	159
11	0,08	0,0861	1,82
12	0,113	0,1256	1,62
13	0,063	0,0677	1,72
14	0,097	0,103	2,41
15	0,143	0,1578	2,35
16	0,047	0,0503	1,65
17	0,107	0,1143	2,88
18	0,14	0,149	3,78
19	0,062	0,0683	1,56
20	0,082	0,09	1,88
21	0,12	0,128	2,001
22	0,06	0,0636	1,86
23	0,1	0,1073	2,55
24	0,124	0,13	2,72
25	0,043	0,0457	1,673
26	0,097	0,1095	2,721
27	0,146	0,1585	4,060

LAMPIRAN D : Data tekanan pada *draft tube*

Variasi	Posisi <i>draft tube</i>	Tekanan <i>input</i> (Pa)	Tekanan <i>output</i> (Pa)
1	-100	96423,51	101325
2	0	95225	101325
3	+100	94859,94	102306
4	-100	96420	101325
5	0	95228,51	101325
6	+100	94732,25	102306
7	-100	96298,31	101325
8	0	95178,86	101325
9	+100	94674,9	102303,1
10	-100	96396,35	101325
11	0	95370,7	101325
12	+100	94745,4	102303,1
13	-100	96520,45	101325
14	0	95304	101325
15	+100	94914	102303,1
16	-100	96684,44	101325
17	0	95243,95	101325
18	+100	94678,8	102303,1
19	-100	96345	101325
20	0	95327,378	101325
21	+100	94862,64	102303,1
22	-100	96330,65	101325
23	0	95199	101325
24	+100	95209,84	102303,1
25	-100	96371,55	101325
26	0	95113,55	101325
27	+100	94540,9	102303,1

LAMPIRAN E : Efisiensi Turbin

Variasi	Debit (m ³ /s)	Daya Poros (W)	Daya Hidrolik (W)	Efisiensi (%)
1	0,003	1,56	58,89	2,656
2		1,98		3,371
3		1,67		2,834
10		1,59		2,714
11		1,82		3,099
12		1,62		2,765
19		1,56		2,661
20		1,88		3,201
21		2,001		3,398
4		0,0051		1,87
5	2,06		2,075	
6	1,93		1,938	
13	1,72		1,723	
14	2,41		2,422	
15	2,35		2,364	
22	1,86		1,876	
23	2,55		2,564	
24	2,72		2,73	
7	0,00811		2,93	159,12
8		3,36	2,116	
9		3,56	2,237	
16		1,65	1,041	
17		2,88	1,814	
18		3,78	2,376	
25		1,673	1,051	
26		2,721	1,71	
27		4,060	2,552	

LAMPIRAN F : Dokumentasi proses eksperimen



BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap M Rizal Rizki Hansyah, lahir di Jember pada tanggal 6 Agustus 1996, merupakan anak pertama dari tiga bersaudara pasangan Bapak Ahmad Fazri dan Ibu Anis Wijayanti, Yang beralamat Jln. Teratai Tutul Tegal Sari, Kecamatan Ambulu, Jember. Pendidikan formal pertama adalah SDN AMBULU 1, SMPN 1 AMBULU, dan SMAN 1 JEMBER, D3 Teknik Mesin. Penulis melanjutkan studinya di S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Bidang minat yang diambil penulis saat di Teknik Fisika adalah Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan. Selama masa perkuliahan penulis pernah mendapatkan beasiswa Peningkatan Prestasi Akademik (PPA) pada tahun 2019. Selain itu penulis telah melakukan kerja praktik di BATAN (Badan Tenaga Nuklir Nasional) Yogyakarta tahun 2018. Penulis dapat dihubungi melalui *e-mail* rizalrizki075@gmail.com