

**SIMULASI ALIRAN AIR PADA *BUCKET* TURBIN PELTON  
DENGAN VARIASI DIMENSI *BUCKET* MENGGUNAKAN  
*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)***

**SKRIPSI**

**OLEH:**

**JOKO**

**NPM. 178130147**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MEDAN AREA  
MEDAN  
2023**

**UNIVERSITAS MEDAN AREA**

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Document Accepted 26/6/23

Access From (repository.uma.ac.id)26/6/23

## HALAMAN JUDUL

# SIMULASI ALIRAN AIR PADA *BUCKET* TURBIN PELTON DENGAN VARIASI DIMENSI *BUCKET* MENGGUNAKAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)*

## SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar  
Sarjana di Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik  
Universitas Medan Area

Oleh:

**JOKO**

**NPM. 178130147**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MEDAN AREA  
MEDAN**

**2023**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

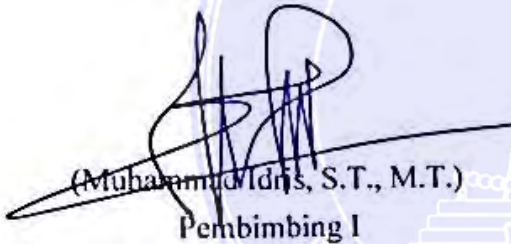
Document Accepted 26/6/23

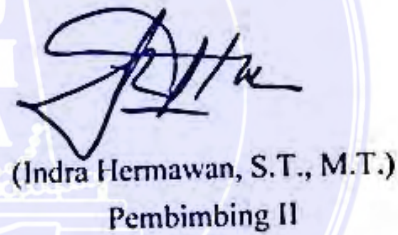
Access From (repository.uma.ac.id)26/6/23

## HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI

Judul Proposal : Simulasi Aliran Air pada Bucket Turbin Pelton dengan Variasi Dimensi Bucket Menggunakan Computational Fluid Dynamics (CFD).  
Nama Mahasiswa : Joko  
NIM : 178130147  
Fakultas : Teknik

Disetujui Oleh  
Komisi Pembimbing

  
(Muhammad Idris, S.T., M.T.)  
Pembimbing I

  
(Indra Hermawan, S.T., M.T.)  
Pembimbing II

  
(Rahmawati, S. Kom, M. Kom)  
Dekan

  
(Muhammad Idris, S.T., M.T.)  
Ka. Prodi/ WD I

Tanggal Lulus: 4 Mei 2023

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Document Accepted 26/6/23

Access From (repository.uma.ac.id)26/6/23

## HALAMAN PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya susun, sebagai syarat memperoleh gelar sarjana merupakan hasil karya tulis saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan skripsi ini yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai sorma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah.

Saya bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang saya peroleh dan sanksi-sanksi lainnya dengan peraturan yang berlaku, apabila di kemudian hari ditemukan adanya plagiat dalam skripsi ini.

Medan, 31 Januari 2023



Joko

178130147

## HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR/SKRIPSI/TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Medan Area, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Joko  
NPM : 178130147  
Program Studi : Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Tugas Akhir/ Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Medan Area **Hak Bebas Royalti Noneklusif (*Non-exclusive Royalti-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul: Simulasi Aliran Air pada *Bucket* Turbin Pelton dengan Variasi Dimensi *Bucket* Menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD)

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan mempublikasikan tugas akhir/skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/ pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Medan

Pada Tanggal: 31 Januari 2023

Yang menyatakan



(Joko)

## ABSTRAK

Untuk memenuhi kebutuhan energi, penggunaan sumber energi terbarukan menjadi lebih populer saat ini terutama dikalangan negara-negara maju dan berkembang. Potensi air yang dapat dimanfaatkan menjadi sumber energi listrik dengan dengan membangun sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) adalah salah satu sumber energi terbarukan yang saat ini sedang dikembangkan secara masif di Indonesia. Turbin Pelton adalah salah turbin yang banyak digunakan pada PLTA sebagai suatu komponen yang dapat mengubah energi kinetik air menjadi energi mekanik. Literatur tentang desain pada bucket turbin Pelton tidak banyak tersedia. Karya ini memaparkan teori dan aspek eksperimental dalam desain dan analisis turbin pelton berdasarkan variasi *bucket* dengan tujuan mendapatkan dimensi *bucket* yang paling optimal yang dapat diaplikasikan pada turbin pelton. Permodelan bucket dan turbin pelton dilakukan dengan menggunakan AutoCAD dan simulasi dijalankan dengan menggunakan ANSYS Fluent agar kemudian dapat menghasilkan data untuk dianalisa.

**Kata kunci:** PLTA, Turbin Pelton, *Bucket* Pelton, *Bucket* Optimal, Simulasi Turbin, Simulasi ANSYS

## **ABSTRACT**

*To meet energy needs, the use of renewable energy sources is becoming more popular today, especially among developed and developing countries. The potential of water that can be utilized as a source of electrical energy by building a Hydroelectric Power Plant (HEPP) is one of the renewable energy sources that is currently being massively developed in Indonesia. The Pelton turbine is one of the turbines that are widely used in hydropower plants as a component that can convert the kinetic energy of water into mechanical energy. Literature on the design of Pelton turbine buckets is not widely available. The theoretical and experimental aspects of the design and analysis of Pelton turbines based on bucket variations are described in this work, with the goal of obtaining the most optimal bucket dimensions that can be applied to Pelton turbines. Modeling of the bucket and Pelton turbine is carried out using AutoCAD, and the simulation is run using ANSYS Fluent so that later it can produce data for analysis.*

**Keywords:** *hepp, pelton turbine, bucket pelton, optimal buckets, turbine simulation, ansys simulation*

## RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Kisaran, Kabupaten Asahan pada tanggal 19 Desember 1991 dari seorang ayah bernama Hamdan dan Ibu Almarhumah Aminah. Penulis merupakan putra ke empat dari empat bersaudara. Tahun 2009 menyelesaikan Pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMK Negeri 2 Kisaran jurusan Teknik Mekanik Otomotif. Tahun 2009 Penulis lulus proses seleksi penerimaan pegawai PT PLN (Persero) beasiswa D1. Penulis kemudian menempuh Pendidikan D1 Beasiswa di STT PLN dengan jurusan Teknik Thermal, pembekalan latihan disiplin di MAKO SAT-81 Gultor Kopassus Cijantung Jakarta Timur dan *On the Job Training* (OJT) di PLTU Suralaya unit 1-6 dan PLTU Labuan Angin. Tahun 2010 penulis ditugaskan ke proyek pembangunan PLTU Tanjung Balai Karimun 2X7 MW Kepulauan Riau dan PLTU Tembilahan 2X7 MW Indragiri Hilir. Tahun 2016 Penulis ditugaskan di kantor Unit Induk Pembangunan Pembangkit Sumatera bertempat di jalan Kartini No. 23 Medan, Sumatera Utara. Tahun 2017 Penulis menikah dan dikaruniai sepasang anak yang lahir pada tahun 2017 dan 2020.

Tahun 2017 penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang Sarjana dengan jurusan Teknik Mesin di Universitas Medan Area. Sejak penulisan skripsi ini dimulai yaitu tahun 2022, penulis kembali ditugaskan di proyek Pembangunan Pembangkit PLTA Asahan 3 berlatar di jalan lintas Sigura-gura Jl, Raya Porsea-Pulu Raja, Kecamatan Aek Songsongan, Kabupaten Asahan, Sumatera Utara yang merupakan tempat domisili penulis saat ini. Tahun 2023 penulis menyelesaikan Pendidikan Sarjana S1 Jurusan Teknik Mesin di Universitas Medan Area.



## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala karunia-Nya sehingga skripsi ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian skripsi ini ialah kajian eksperimental semu (*modelling experiment*) dengan menggunakan perangkat lunak komputer AutoCAD untuk membuat geometri dan ANSYS untuk *Computational Fluid Dynamic* (CFD) dengan judul simulasi aliran air pada *bucket* turbin pelton dengan variasi dimensi *bucket* menggunakan *computational fluid dynamics* (CFD).

Secara khusus penulis mengucapkan terima kasih kepada Istri penulis Rika Oktapia, Orang tua penulis yaitu Ayahanda Hamdan dan Almarhumah Ibunda Aminah yang baru saja meninggal dunia pada saat penulis sedang dalam tahap pengerjaan skripsi ini dan seluruh keluarga yang telah memberikan dukungan moral maupun materil selama perkuliahan dan penulisan skripsi ini. Terimakasih juga penulis ucapkan kepada Bapak Bapak Muhammad Idris, ST., MT., selaku Ketua Prodi Teknik Mesin dan Dosen Pembimbing I yang sudah dengan tekun membimbing penulis menyelesaikan skripsi ini serta bapak Bapak Indra Hermawan, ST., MT., selaku Dosen pembimbing II yang sudah memberikan masukan dan arahan sehingga skripsi ini dapat diselesaikan.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki kekurangan, maka dari itu penulis meminta maaf jika dalam skripsi ini masih terdapat kesalahan dan kekurangan. Penulis berharap agar kesalahan dan kekurangan dalam penelitian ini dapat disempurnakan melalui masukan dan saran yang bersifat membangun. Penulis berharap makalah ini dapat bermanfaat baik untuk kalangan pendidikan maupun masyarakat. Akhir kata penulis ucapkan terima kasih.

Medan, 15 November 2022

Penulis



Joko

## DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
HALAMAN PERNYATAAN .....	ii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	iii
ABSTRAK .....	iv
<i>ABSTRACT</i> .....	v
RIWAYAT HIDUP .....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiv
DAFTAR NOTASI .....	xv
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1. Latar Belakang Masalah .....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Hipotesis Penelitian.....	4
1.5. Manfaat Penelitian.....	5
1.5.1. Manfaat Ilmiah.....	5
1.5.2. Manfaat Praktis .....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	6
2.1. Turbin Air.....	6
2.2. Klasifikasi Turbin Air .....	7
2.2.1. Turbin Tekanan Sama (Aksi) .....	7
2.2.2. Turbin Tekanan Lebih (Reaksi).....	8
2.3. Pemilihan Jenis Turbin .....	8
2.4. Turbin Pelton.....	9
2.5. Komponen Utama Turbin Pelton .....	11
2.5.1. <i>Runner</i> .....	11
2.5.2. Sudu ( <i>Bucket</i> ) .....	13
2.5.3. Nosel .....	14
2.5.4. Rumah Turbin .....	15
2.6. Prinsip Kerja Turbin Pelton.....	16
2.7. Efisiensi Turbin .....	16
2.8. Teori Dasar Aliran (Hidrodinamik) .....	17
2.9. Segitiga Kecepatan.....	18

2.10.	Head Turbin .....	19
2.11.	Jenis Aliran Fluida .....	20
2.11.1.	Aliran laminar .....	21
2.11.2.	Aliran Turbulen.....	22
2.11.3.	Aliran Transisi .....	22
2.12.	Computational Fluid Dynamic .....	22
2.12.1.	Pre -Processing .....	23
2.12.2.	<i>Solving</i> .....	23
2.12.3.	<i>Post Processing</i> .....	23
2.13.	ANSYS .....	24
BAB III.....		25
METODE PENELITIAN .....		25
3.1.	Waktu dan tempat .....	25
3.2.	Alat dan Bahan .....	26
3.2.1.	Alat.....	26
3.2.1.1.	Perangkat lunak .....	26
3.2.1.1.1.	Perangkat lunak AutoCAD 2019 .....	26
3.2.1.1.2.	Perangkat lunak ANSY Fluent .....	27
3.2.1.1.3.	Perangkat lunak Microsoft Excel.....	28
3.2.2.	Perangkat keras .....	29
3.2.2.1.	Perangkat keras Laptop.....	30
3.2.2.	Bahan .....	31
3.2.2.1.	Gambar Rumah Turbin .....	31
3.2.2.2.	Gambar Bucket Turbin .....	32
3.2.2.3.	Gambar <i>Runner</i> .....	33
3.3.	Metode Penelitian.....	34
3.3.1.	Proses Edit Geometry .....	34
3.3.2.	Proses <i>Meshing</i> .....	35
3.3.3.	Proses Setup .....	36
3.3.4.	Proses Solution.....	38
3.3.5.	Proses <i>Result</i> .....	39
3.4.	Variabel Diamati .....	40
3.5.	Diagram Penelitian .....	40
3.5.1.	Identifikasi dan Perumusan Masalah .....	41
3.5.2.	Studi Literatur dan Pengumpulan Data .....	41
3.5.3.	Penggambaran Model 3D Turbin Pelton.....	41

3.5.4. Simulasi.....	41
3.5.5. Analisa Data.....	42
3.5.6. Evaluasi.....	42
3.5.7. Hasil penelitian.....	42
3.5.8. Pengambilan Kesimpulan.....	42
BAB IV .....	44
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	44
1.1 Hasil Simulasi Turbin Pelton .....	44
4.1.1. Hasil Torsi .....	44
4.1.2. Hasil Kecepatan Sudut.....	44
4.1.3. Hasil Daya .....	45
4.1.3. Hasil dimensi bucket yang paling optimal.....	45
1.2 Pembahasan.....	46
4.2.1. Analisa Torsi/ <i>Moment</i> .....	46
4.2.1.1. Analisa Torsi Turbin Pelton Variasi 1.....	46
4.2.1.2. Analisa Torsi Turbin Pelton Variasi 2.....	47
4.2.1.3. Analisa Torsi Turbin Pelton Variasi 3.....	48
4.2.2. Analisa Kecepatan Sudut/ <i>Omega</i> .....	48
4.2.2.1. Analisa Kecepatan Sudut Turbin Pelton Variasi 1.....	48
4.2.2.2. Analisa Kecepatan Sudut Turbin Pelton Variasi 2.....	49
4.2.2.3. Analisa Kecepatan Sudut Turbin Pelton Variasi 3.....	50
4.2.3. Analisa Daya yang dihasilkan .....	50
4.2.3.1. Analisa Daya yang dihasilkan Turbin Pelton Variasi 1 ...	51
4.2.3.2. Analisa Daya yang dihasilkan Turbin Pelton Variasi 2 ...	52
4.2.3.3. Analisa Daya yang dihasilkan Turbin Pelton Variasi 3 ...	53
4.2.4. Analisa Aliran air .....	53
4.2.4.1. Analisa Aliran Air Turbin Pelton Variasi 1 .....	54
4.2.4.2. Analisa Aliran Air Turbin Pelton Variasi 2 .....	55
4.2.4.3. Analisa Aliran Air Turbin Pelton Variasi 3 .....	56
4.2.5 Analisa Dimensi Bucket yang paling Optimal .....	57
BAB V.....	58
SIMPULAN DAN SARAN.....	58
5.1. Simpulan .....	58
5.2. Saran.....	59
DAFTAR PUSTAKA .....	60
LAMPIRAN.....	61

## DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Waktu Kegiatan Penelitian.....	25
Tabel 3. 2 Spesifikasi Laptop .....	30
Tabel 3. 3 Spesifikasi Bahan Penelitian .....	31
Tabel 3. 4 Ukuran Variasi Bucket Turbin Pelton.....	33
Tabel 3. 5 Nilai inersia masing-masing variasi bucket.....	38
Tabel 4. 1 Data torsi hasil simulasi .....	44
Tabel 4. 2 Data Kecepatan Sudut hasil simulasi .....	44
Tabel 4. 3 Data daya hasil simulasi.....	45



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Turbin Air.....	6
Gambar 2. 2 Turbin Cross Flow & Turbin Pelton.....	7
Gambar 2. 3 Turbin Francis dan Turbin Propeller.....	8
Gambar 2. 4 Diagram pemilihan jenis Turbin .....	9
Gambar 2. 5 Turbin Pelton .....	10
Gambar 2. 6 Runner Turbin Pelton .....	12
Gambar 2. 7 Bucket Turbin Pelton.....	14
Gambar 2. 8 Nozzle Turbin Pelton.....	15
Gambar 2. 9 Rumah Turbin Pelton.....	16
Gambar 2. 10 Penampang Nozzle dan Bucket .....	18
Gambar 2. 11 Bagan Kecepatan Bucket Turbin Pelton.....	19
Gambar 2. 12 Diagram Bernoulli .....	20
Gambar 2. 13 Jenis Aliran Fluida .....	22
Gambar 3. 1 Perangkat Lunak AutoCAD 2019 .....	27
Gambar 3. 2 Perangkat Lunak ANSYS Fluent 16.0 .....	28
Gambar 3. 3 Perangkat Lunak Microsoft Excel.....	29
Gambar 3. 4 Perangkat Keras Laptop .....	30
Gambar 3. 5 Desain Turbin Pelton.....	31
Gambar 3. 6 Desain Rumah Turbin Pelton .....	32
Gambar 3. 7 Proses pembuatan gambar 3D bucket turbin pelton .....	32
Gambar 3. 8 Desain Bucket Turbin Pelton 3 Variasi Dimensi.....	33
Gambar 3. 9 Desain Runner Turbin Pelton.....	34
Gambar 3. 10 Penentuan Structures dan Groups .....	35
Gambar 3. 11 Proses Meshing ANSYS Fluent.....	36
Gambar 3. 12 Six DOF Properties Turbin Pelton Variasi 1 .....	37
Gambar 3. 13 Report Omega Turbin Pelton Variasi 1 .....	39
Gambar 3. 14 Proses Solution ANSYS Fluent.....	39
Gambar 3. 15 Proses Edit Result Animasi ANSYS Fluent .....	40
Gambar 3. 16 Diagram Penelitian .....	43
Gambar 4. 1 Torsi Turbin Pelton Variasi 1 timestep 1 sampai 177 detik .....	46
Gambar 4. 2 Torsi Turbin Pelton Variasi 1 timestep 1 sampai 179 detik .....	47
Gambar 4. 3 Torsi Turbin Pelton Variasi 2.....	47
Gambar 4. 4 Torsi Turbin Pelton Variasi 3.....	48
Gambar 4. 5 Kecepatan Sudut Turbin Pelton Variasi 1.....	49
Gambar 4. 6 Kecepatan Sudut Turbin Pelton Variasi 2.....	49
Gambar 4. 7 Kecepatan Sudut Turbin Pelton Variasi 3.....	50
Gambar 4. 8 Daya Turbin Pelton Variasi 1 timestep 1 sampai 177 detik .....	51
Gambar 4. 9 Daya Turbin Pelton Variasi 1 timestep 1 sampai 179 detik .....	52
Gambar 4. 10 Daya Turbin Pelton Variasi 2 .....	52
Gambar 4. 11 Daya Turbin Pelton Variasi 3 .....	53
Gambar 4. 12 Aliran Air Turbin Pelton Variasi 1 sisi X.....	54
Gambar 4. 13 Aliran Air Turbin Pelton Variasi 1 sisi Z .....	54

Gambar 4. 14 Aliran Air Turbin Pelton Variasi 2 sisi X .....	55
Gambar 4. 15 Aliran Air Turbin Pelton Variasi 2 sisi Z .....	55
Gambar 4. 16 Aliran Air Turbin Pelton Variasi 3 sisi X .....	56
Gambar 4. 17 Aliran Air Turbin Pelton Variasi 3 sisi Z .....	56



## DAFTAR LAMPIRAN

Data Hasil Simulasi Bucket Turbin Variasi 1	.....61
Data Hasil Simulasi Bucket Turbin Variasi 2	.....65
Data Hasil Simulasi Bucket Turbin Variasi 3	.....71





## DAFTAR NOTASI

$N_s$	=	Kecepatan Spesifik (Rpm)
$\omega$	=	Kecepatan Spesifik (Rpm)
$v$	=	Laju aliran air (m/s)
$I$	=	Momen inersia ( $\text{kg m}^2$ )
$m$	=	Massa benda (kg)
$r$	=	Jarak benda terhadap sumbu putar (m)
$\eta_t$	=	Efisiensi turbin
$PT$	=	Daya yang dihasilkan Turbin (watt)
Pair	=	Daya air (watt)
$H_{eff}$	=	Head efektif (m)
$\rho$	=	Massa jenis air ( $\text{kg/m}^3$ )
$Q$	=	Flow air ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$g$	=	Gravitasi ( $\text{m/s}^2$ )
$r$	=	Torsi (Nm)
$A$	=	Luas penampang (m)
$\pi$	=	Konstata perbandingan keliling lingkaran dan diameter

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang Masalah

Saat ini sumber energi baru terbarukan atau EBT menjadi pilihan utama bagi pengembangan energi diseluruh negara, energi baru terbarukan bisa didapatkan dengan memanfaatkan air, angin, panas bumi, matahari dan sebagainya. Di Indonesia sendiri, masih banyak potensi sumber energi baru terbarukan yang masih bisa dimanfaatkan, salah satunya adalah energi air. Seperti yang kita ketahui bahwa pada sebuah air yang mengalir terdapat energi potensial dan energi kinetic didalamnya [1].

Pemanfaatan air sebagai energi baru terbarukan dapat dilakukan dengan membangun sebuah Pembangkit listrik tenaga air (PLTA). Banyak teknologi dan inovasi telah diterapkan untuk membangun sebuah PLTA yang lebih efisien, handal dan sesuai dengan kebutuhan kondisi geografis pada sebuah pembangkit. Salah satu hal mendasar dari kebutuhan teknologi yang beradaptasi dengan kondisi geografi adalah turbin pelton yang menggunakan prinsip impuls, yaitu turbin yang memerlukan ketinggian (*head*) yang cukup tinggi. Turbin pelton bekerja dengan memanfaatkan *head*, kecepatan dan *volume* aliran. Turbin pelton adalah salah satu jenis turbin impuls yang mengkonversi seluruh energi air menjadi energi kecepatan sebelum menumbuk dan menggerakkan *runner* turbin. Daya yang dihasilkan pada turbin pelton berubah-ubah tergantung aliran atau debit air yang masuk untuk memutar turbin [2].

Air yang didapatkan dari ketinggian masuk dan kemudian dipancarkan dari nosel memberikan torsi pada *runner* untuk memutar poros turbin dan kemudian

generator untuk menghasilkan listrik [3]. Banyak pekerjaan telah dilaporkan untuk desain dan analisis bentuk *bucket* yang menyebabkan perubahan pancaran air, tetapi belum ada penelitian yang mempelajari pengaruh perubahan dimensi *bucket* pada kinerja turbin Pelton skala laboratorium. Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah eksperimental semu (*modelling experiment*) dengan menggunakan perangkat lunak computer AutoCAD untuk membuat geometri turbin pelton dan ANSYS untuk simulasi *Computational Fluid Dynamic* (CFD). Penelitian dilakukan dengan metode ini lebih efisien dan cepat dalam proses merancang turbin pelton. Hasil simulasi juga menjadi lebih terukur dan mudah untuk diamati karena pola aliran fluida yang dihasilkan dapat diatur dan diamati dengan baik dan memberi ruang dan kesempatan yang lebih banyak untuk kesalahan dan perbaikan, dibandingkan dengan pengamatan langsung yang tidak kasat mata.

Pemilihan model sudu turbin berbentuk semi-elliptical dilakukan berdasarkan penelitian ilmiah yang dilakukan oleh Nikil Jacob George[4], Bhattarai Suyesh [3], Bono, Indarto [5] dan Dwi Aries Himawanto, M.M Alnakhlani [6] dan Serta Bernadus Lumban Gaol [7]. Penentuan dimensi *bucket* mengacu kepada penelitian Hadimi [8] dengan sedikit penyesuaian agar beban yang ditargetkan pada penelitian ini diharapkan dapat tercapai.

## 1.2. Perumusan Masalah

Tidak banyak penelitian dengan metode *modelling experiment* menggunakan software ANSYS dengan variasi dimensi *bucket*. Penulis sangat tertarik untuk meneliti tentang pengaruh perbedaan dimensi *bucket* terhadap kinerja turbin pelton sehingga berharap agar hasil dari penelitian metode *modelling experiment* menggunakan software ANSYS ini dapat diaplikasikan pada perancangan turbin pelton dengan spesifikasi:

- a. Turbin dengan poros horizontal
- b. Memiliki nosel ganda dengan diameter 0,20 m.
- c. Jumlah *bucket* 22 buah.
- d. Diameter *runner wheel* 0,22 m.
- e. Diameter pipa aliran air 0,50 m.
- f. Fluida air yang disimulasikan memiliki tekanan 100.000 Pascal dengan laju aliran volume air 0,008 m<sup>3</sup>/s [9]
- g. Bucket turbin pelton dengan variasi dimensi:
  - a) Variasi 1 Panjang= 0,077 m, Lebar= 0,066 m, Tebal= 0,028 m, Jet-circle diameter= 0,022 m, Berat Turbin= 7,2 kg.
  - b) Variasi 2: Panjang= 0,070 m, Lebar= 0,060 m, Tebal= 0,025 m, Jet-circle diameter= 0,020 m, Berat Turbin= 6,7 kg.
  - c) Variasi 3: Panjang= 0,063 m, Lebar =0,054 m, Tebal= 0,022 m, Jet-circle diameter= 0,018 m, Berat= 6,3 kg.

Penelitian dibatasi hanya dengan mencari nilai serta karakteristik dari variable-variabel yang berkaitan langsung dengan performa dari turbin pelton tanpa membahas lebih jauh tentang perpindahan panas, reaksi kimia, *failure* atau

keretakan yang terjadi pada *bucket* dan konstruksi penunjang turbin lainnya.

Adapun rumusan masalah yang ingin diselesaikan dalam penelitian ini adalah:

- a. Berapa kecepatan sudut yang dihasilkan turbin pelton pada masing-masing variasi dimensi *bucket* dengan simulasi menggunakan ANSYS?
- b. Berapa torsi yang dihasilkan turbin pelton pada masing-masing variasi dimensi *bucket* dengan simulasi menggunakan ANSYS?
- c. Berapa daya yang dihasilkan turbin pelton pada masing-masing variasi dimensi *bucket* dengan simulasi menggunakan ANSYS?
- d. Dimensi *bucket* manakah paling optimal yang dapat diaplikasikan pada prototype turbin pelton?

### 1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

- a. Mengetahui nilai torsi yang dihasilkan turbin pelton pada masing-masing variasi *bucket*.
- b. Mengetahui nilai kecepatan sudut yang dihasilkan turbin pelton pada masing-masing variasi *bucket*.
- c. Mengetahui nilai daya yang dihasilkan turbin pelton pada masing-masing variasi *bucket*.
- d. Menentukan dimensi *bucket* paling optimal yang dapat diaplikasikan pada turbin pelton.

### 1.4. Hipotesis Penelitian

Adapun hipotesis dari penelitian ini adalah:

- a. Adanya perbedaan nilai torsi dari masing-masing variasi *bucket* yang disimulasikan.

- b. Adanya perbedaan nilai kecepatan sudut dari masing- masing variasi bucket yang disimulasikan.
- c. Adanya perbedaan nilai daya dari masing-masing variasi bucket yang disimulasikan.

## 1.5. Manfaat Penelitian

### 1.5.1. Manfaat Ilmiah

Manfaat ilmiah yang diharapkan dapat diperoleh dari hasil penelitian ini adalah:

- a. Hasil dari penelitian ini diharapkan akan bermanfaat untuk pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi khususnya bidang konversi energi yang berkaitan dengan turbin pelton.
- b. Penelitian ini dapat menghasilkan informasi ilmiah dalam analisa prestasi kinerja turbin pelton terhadap perubahan dimensi *bucket* dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD).
- c. Dapat memberikan informasi kepada mahasiswa atau peneliti lainya yang ingin mengembangkan hasil penelitian ini serta dapat dijadikan sebagai pembandingan dalam pembahasan pada topik yang sama.

### 1.5.2. Manfaat Praktis

Adapun manfaat praktis yang diharapkan dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

- a. Dapat menjadi acuan dalam penerapan pembangunan turbin pelton baik untuk skala laboratorium maupun skala industri.
- b. Dapat memberikan rekomendasi dimensi *bucket* yang paling optimal untuk turbin pelton.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Turbin Air

Turbin adalah sebuah mesin mekanik yang berputar yang mengambil energi dari suatu fluida. Turbin yang sederhana memiliki satu bagian yang bergerak, atau *assembly rotor-blade*. Fluida yang mengalir menggerakkan baling-baling atau sudu-sudu turbin sehingga berputar dan menghasilkan energi untuk menggerakkan rotor atau *shaft*. Turbin yang pertama kali digunakan oleh umat manusia adalah kincir angin dan roda air.

Turbin air merupakan sebuah mesin mekanik yang berfungsi mengubah energi potensial air menjadi energi mekanik. Energi mekanik ini kemudian memutar sebuah rotor atau shaft yang terhubung pada generator sehingga dapat menghasilkan energi listrik. Turbin air dikembangkan pada abad 19 dan digunakan secara luas untuk pembangkit tenaga listrik seperti yang terlihat pada gambar 2.1.



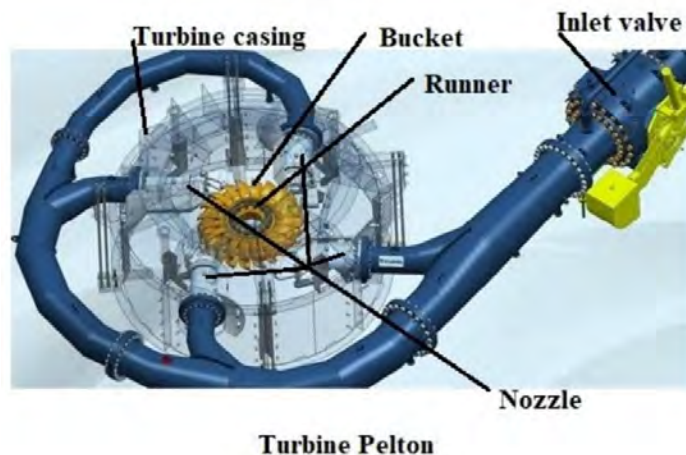
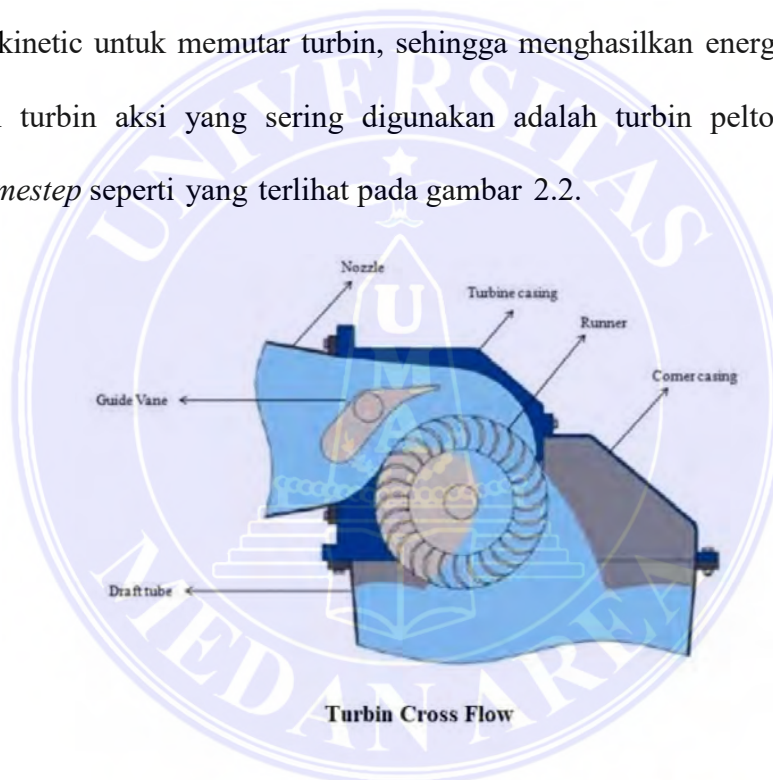
Gambar 2. 1 Turbin Air

## 2.2 Klasifikasi Turbin Air

Turbin air berdasarkan pertukaran momentumnya atau tekanan yang dihasilkan, dikelompokkan kedalam dua bagian yaitu turbin turbin impuls atau turbin tekanan sama (aksi) dan turbin tekanan lebih (reaksi).

### 2.2.1. Turbin Tekanan Sama (Aksi)

Turbin aksi adalah sebuah turbin air bekerja dengan merubah seluruh energi air yang terdiri dari energi potensial, tekanan dan kecepatan yang tersedia menjadi energi kinetic untuk memutar turbin, sehingga menghasilkan energi punter [10]. Contoh turbin aksi yang sering digunakan adalah turbin pelton dan turbin *crossmestep* seperti yang terlihat pada gambar 2.2.

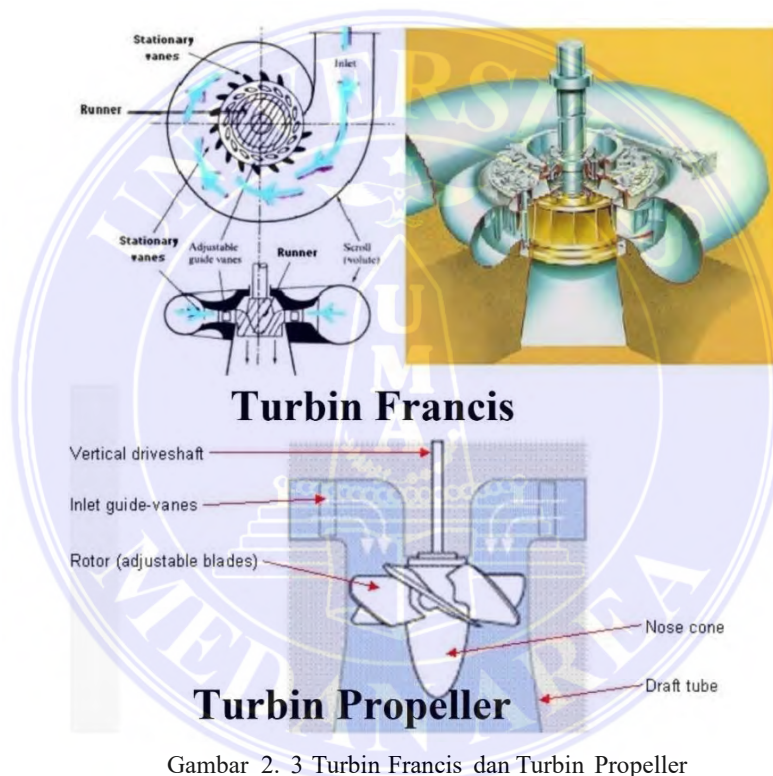


Gambar 2. 2 Turbin Cross Flow & Turbin Pelton



### 2.2.2. Turbin Tekanan Lebih (Reaksi)

Turbin reaksi seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3 adalah sebuah turbin yang beroperasi dengan cara memanfaatkan volume dan tekanan air sehingga turbin reaksi pada umumnya memiliki karakteristik fluida yang keluar dari turbin memiliki tekanan yang jauh lebih rendah daripada air yang masuk turbin. Adapun jenis-jenis turbin reaksi antara lain, turbin francis, turbin propeler atau Kaplan.



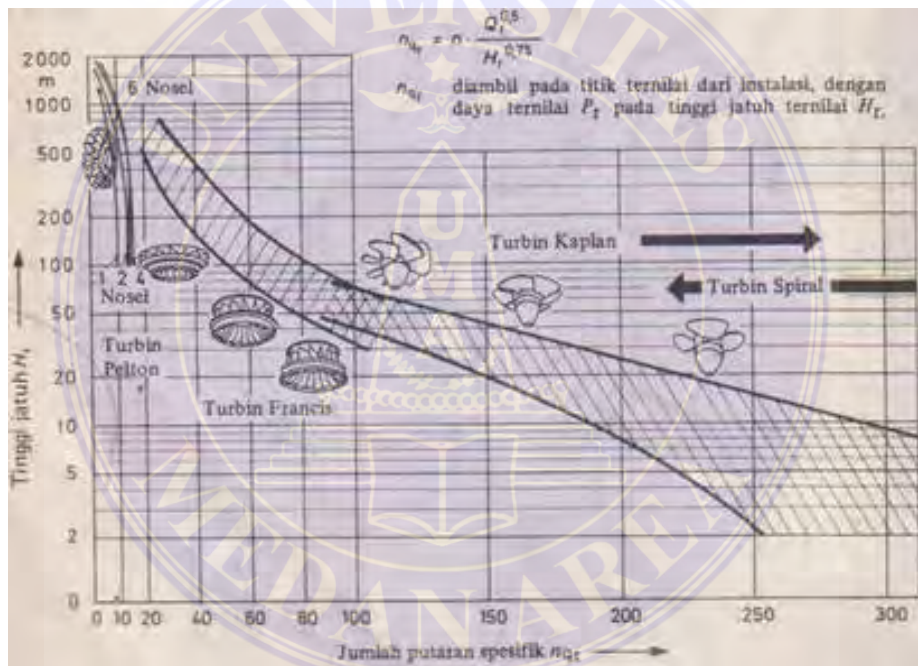
Gambar 2. 3 Turbin Francis dan Turbin Propeller

## 2.3 Pemilihan Jenis Turbin

Pemilihan jenis turbin yang tepat pada umumnya didasarkan pada tinggi *head* dan juga besarnya kecepatan spesifik yang dihasilkan seperti yang terlihat pada gambar 2.4. Jenis turbin yang akan dipilih dan digunakan dapat diperhitungkan dengan menimbang semua parameter yang bisa mempengaruhi beroperasinya turbin, yaitu diantaranya, faktor *head* efektif, faktor daya serta

faktor kecepatan putaran turbin (RPM). Kecepatan spesifik adalah kecepatan putar turbin yang menghasilkan daya sebesar satu satuan daya pada tinggi terjun satu satuan[10]. Kecepatan spesifik merupakan suatu besaran yang penting dalam merencanakan turbin air. Dengan mengetahui kecepatan besaran dan spesifik turbin maka perencanaan pemilihan jenis turbinakan lebih mudah dan dapat diperkirakan. Persamaan kecepatan spesifik dinyatakan sebagai:

$$Ns = \frac{n\sqrt{Q}}{\sqrt[3]{H^4}} \dots\dots\dots(2.1)$$



Gambar 2. 4 Diagram pemilihan jenis Turbin

### 2.4 Turbin Pelton

Turbin Pelton seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.5 termasuk dalam jenis turbin aksi yang berfungsi untuk merubah energi potensial dan energi kinetis fluida menjadi energi listrik. Ketinggian air (head) untuk trubin pelton adalah 80 m hingga 1800 m. Turbin Pelton dikembangkan oleh seorang insinyur Amerika Lester A. Pelton pada tahun 1897 dan kemudian dipatenkannya setahun kemudian.

Turbin Pelton bekerja dengan cara merubah seluruh energi potensial dan kinetik yang terdapat pada fluida air menjadi energi kecepatan pada nosel, energi tersebut kemudian menumbuk sudu turbin yang berbentuk seperti *bucket* atau mangkuk sehingga menghasikan energi kinetis.

Air atau *fluida* pada turbin pelton dialirkan melalui nosel agar tekanan air yang menumbuk *bucket* turbin pelton menjadi lebih maksimal. Pancaran air dari nosel kemudian menumbuk sudu-sudu turbin atau *bucket* sehingga kemudian menggerakan *runner*. Kecepatan keliling turbin pelton yang dihasilkan pada bucket akibat tumbukan air tergantung dari volume, ukuran pancaran serta kecepatannya yang keluar dari nosel. Kecepatan pancaran yang dihasilkan nosel tergantung *head* air, ukuran pipa aliran air serta diameter noselnya. Sudu turbin pelton dibentuk sedemikian rupa agar pancaran air mengenai tengah sudu dan terpotong menjadi 2 sisi dan kemudian berbelok kedua arah sehingga bisa membalikan pancaran air dengan sempurna dan membebaskan sudu dari gaya-gaya samping.



Gambar 2. 5 Turbin Pelton

## 2.5. Komponen Utama Turbin Pelton

Sebuah Turbin Pelton yang digunakan sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Air atau PLTA, secara umum memiliki 2 jenis komponen yaitu komponen utama dan komponen tambahan dimana komponen utama adalah bagian-bagian dari turbin pelton itu sendiri sedangkan komponen tambahan adalah komponen-komponen yang berfungsi agar sistem operasi dari turbin pelton berjalan lancar sesuai dengan yang diharapkan, contoh dari komponen tambahan itu sendiri adalah valve pengatur aliran air, aliran buang air keluaran turbin, alat ukur dan lain sebagainya. Adapun komponen utama yang terdapat pada turbin pelton secara umum adalah:

### 2.5.1. Runner

*Runner* turbin Pelton seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6 terdiri atas cakram dan *bucket* yang terpasang disekelilingnya. Bucket terpasang dengan pengunci baut ataupun dapat di las senyawa dengan cakram. Cakram terpasang ke poros dengan sambungan pasak atau dengan pengunci baut. Besarnya *head* jatuh air yang dirancang menentukan ukuran besarnya diameter *runner* yang digunakan, semakin tinggi ataupun besar *head* jatuh air maka ukuran *runner* akan lebih baik jika semakin besar. Pemilihan diameter *runner* tergantung kepada kecepatan spesifik yang telah dirancang untuk turbin. Untuk turbin dengan pemilihan kecepatan putar yang tinggi maka akan di dapat ukuran roda turbin yang kecil, momen yang kecil, dan poros yang kecil [11].



Gambar 2. 6 *Runner* Turbin Pelton

Kecepatan keliling *runner* suatu turbin dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$v = 0,44\sqrt{2 \cdot g \cdot H} \dots \dots \dots (2.2)$$

Kecepatan lingkaran tusuk dapat dihitung dengan persamaan:

$$D_t = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot n} \dots \dots \dots (2.3)$$

Untuk mencari diameter luar *Runner* digunakan persamaan:

$$D^0 = D_t + 1,2 \cdot L_s \dots \dots \dots (2.4)$$

Kecepatan Sudut yang dihasilkan turbin pelton digunakan persamaan:

$$\omega = V/r \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana:

$\omega$  = Kecepatan sudut (rad/s m<sup>2</sup>)

$V$  = Laju aliran air (m/s)

$r$  = Jarak benda terhadap sumbu putar (m)

Untuk mencari Momen Inersia dari sebuah turbin pelton digunakan persamaan:

$$I = m \cdot R^2 \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana:

$I$  = Inersia ( $\text{kg m}^2$ )

$m$  = Massa benda (kg)

$R$  = Jarak benda terhadap sumbu putar (m)

### 2.5.2. Sudu (*Bucket*)

*Bucket* turbin pelton seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7 berbentuk mirip mangkuk dimana terdapat sekat atau yang disebut dengan splitter pada bagian tengah nya dengan bagian dalam bucket melengkung ke dalam dan bagian atasnya berbentuk runcing atau *semi-elliptical*. Pemanfaatan tinggi air jatuh (*head*) memiliki hubungan yang erat dengan bentuk sudu turbin. Untuk *head* yang tinggi kelengkungan *bucket* akan akan didesain menjadi lebih tajam. Untuk *head* yang rendah kelengkungan *bucket* tidak terlalu melengkung. Hal tersebut dilakukan karena pancaran air yang menumbuk bucket diharapkan terurai ke sisi-sisi turbin sehingga tidak menumbuk bucket turbin yang berada di depan nya. Sejauh ini, pembuatan *bucket turbin* pelton yang baik dibuat dengan menggunakan metode casting.



Gambar 2. 7 Bucket Turbin Pelton

Jumlah *bucket* yang optimal dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Z = 5,4\sqrt{\frac{D^{\pm}}{d_n}} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimensi *bucket* dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Lebar bucket } B_s = (4 - 5) \times d_{ns} \dots\dots\dots(2.8)$$

$$\text{Tinggi bucket } L_s = (2,4 - 3,2) \times d_{ns} \dots\dots\dots(2.9)$$

$$\text{Lebar Bukaian bucket } M = (1,1 - 1,25) \times d_{ns} \dots\dots\dots(2.10)$$

$$\text{Kedalaman bucket } = C_s = (0,81 - 1,05) \times d_s \dots\dots\dots(2.11)$$

### 2.5.3. Nosel

Nosel seperti gambar 2.6 merupakan komponen turbin pelton yang berfungsi untuk memampatkan air kemudian mengarahkan pancaran air tersebut ke *bucket* pada *runner*. Nosel terdiri atas bagian selubung atau *reducer* yang dipasang pada pipa dan jarum nosel yang bisa digerakan didalam *reducer* tersebut. Jarum dan *reducer* yang selalu beroperasi akan cepat aus sehingga idealnya diproduksi dengan menggunakan material bermutu tinggi serta dapat dengan

mudah untuk dilakukan penggantian. Penentuan diameter nosel turbin harus disesuaikan dengan *head* dan volume yang ingin dioperasikan. Idealnya, agar turbin dengan *head* dan daya yang besar beroperasi dengan lebih optimal, maka system pancaran air yang menumbuk *bucket* turbin pelton dibagi lewat beberapa nosel.



Gambar 2. 8 *Nozzle* Turbin Pelton

#### 2.5.4. Rumah Turbin

Sama seperti namanya, rumah turbin pelton berfungsi sebagai cover atau pelindung dari sebuah turbin pelton terhadap aktivitas kimia dan fisik di sekitarnya seperti reaksi oksidasi, cahaya matahari, dan lain-lain yang dapat memperpendek usia turbin. Rumah turbin juga berfungsi sebagai penagan dan pengarah laju aliran air yang terjadi didalam turbin pelton agar selama beroperasi, agar aliran air tersebut tidak tercerai berai dan aliran air buang dapat diarahkan sesuai dengan sistem yang diinginkan.





Gambar 2. 9 Rumah Turbin Pelton

## 2.6. Prinsip Kerja Turbin Pelton

Turbin pelton memenuhi prinsip dasar kaidah energi yang menyatakan bahwa energi dapat diubah menjadi bentuk energi yang lain. Arus air mengalir mengandung energi potensial, lalu kemudian energi tersebut diubah bentuk menjadi energi kinetis atau energi gerak.

## 2.7. Efisiensi Turbin

Efisiensi turbin merupakan sebuah variabel yang berfungsi untuk dapat menentukan kualitas kinerja dari suatu turbin. Apabila efisiensi dari suatu turbin tinggi, maka kinerja turbin tersebut akan semakin baik. Efisiensi dari turbin air pada umumnya dapat ditentukan dengan melakukan perbandingan antara daya turbin yang dapat dihasilkan dengan daya air atau fluida yang digunakan untuk menggerakkan turbin.

Adapun pencarian nilai dari efisiensi pada suatu turbin air dapat diketahui dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\eta_t = \frac{P_T}{P_{air}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana:

$\eta_t$  = Efisiensi Turbin

$PT$  = Daya yang dihasilkan (Watt)

$P_{air}$  = Daya Air (Watt)

Daya air dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$P_{air} = \rho \times g \times H_{eff} \times Q \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana:

$\rho$  = Massa jenis air (1000 kg/m<sup>3</sup>)

$g$  = Gravitasi (9,81 m/s<sup>2</sup>)

$H_{eff}$  = Head efektif (m)

$Q$  = Flow air (m<sup>3</sup>/s)

Daya yang dihasilkan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$PT = r \times \omega \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana:

$PT$  = Daya turbin (Watt)

$r$  = Torsi (Nm)

$\omega$  = Kecepatan sudut (rad/s)

## 2.8. Teori Dasar Aliran (Hidrodinamik)

Air mengalir memiliki energi potensial yang dapat digunakan untuk memutar turbin, karena itu pembangkit listrik tenaga air selalu memanfaatkan aliran air yang mengalir seperti di daerah sungai dan pegunungan. Pembangkit listrik tenaga air dapat dibedakan menjadi 2 golongan, yaitu pembangkit listrik tenaga air tekanan tinggi dan pembangkit listrik tenaga air tekanan rendah. Nilai tinggi air jatuh (H) didapatkan dari selisih antara tinggi permukaan air atas (TPA) dan tinggi

permukaan air bawah (TPB) dengan menggunakan persamaan-persamaan yang biasanya digunakan pada luas penampang lintang saluran dan dimensi dari bagian-bagian turbin, daya turbin, mekanika fluida serta bentuk energi dari aliran air dapat ditentukan. Dari nilai pada kapasitas air ( $V$ ) dan *head* ( $H$ ) maka dapat diperoleh nilai daya yang mampu dihasilkan turbin air dengan menggunakan persamaan:

$$P_t = T \cdot \omega \dots \dots \dots (2.15)$$

Atau

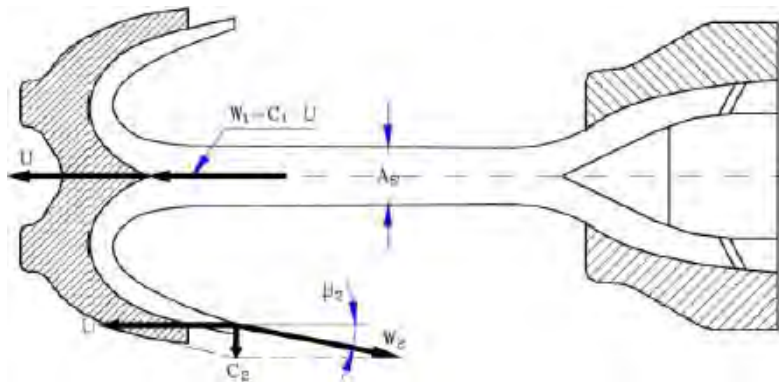
$$P_t = \frac{\left(\frac{T}{1000}\right) \cdot \left(\frac{2\pi n}{60}\right)}{102} \dots \dots \dots (2.16)$$

Untuk mengetahui nilai dari  $\omega$  atau kecepatan sudut atau kecepatan keliling turbin maka digunakan persamaan:

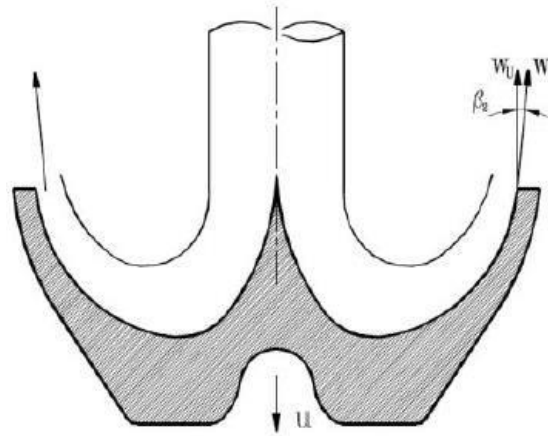
$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \dots \dots \dots (2.17)$$

### 2.9. Segitiga Kecepatan

Bentuk dari penampang nosel dan *bucket* pada umumnya terlihat seperti gambar 2.10 dan 2.11



Gambar 2. 10 Penampang Nozzle dan Bucket



Gambar 2. 11 Bagan Kecepatan Bucket Turbin Pelton

Pancaran air yang disemburkan oleh nosel dengan kecepatan  $V_n$  menumbuk tepat pada bagian tengah sudu memisahkan aliran fluida serta membelokkan kecepatan relatifnya ( $V_r$ ) melalui sudut  $\beta^1 = (4^\circ - 8^\circ)$ , fenomena tersebut menimbulkan suatu gaya pada bagian permukaan *bucket*. Seluruh fenomena yang terjadi tersebut kemudian menghasilkan momen atau gaya sehingga dapat memutar turbin.

$$V_r = V_n - v \dots\dots\dots(2.18)$$

Gaya yang diberikan pada bucket dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$F = \rho \cdot Q(V_n - v)(1 - \cos \beta^2) \dots\dots\dots(2.19)$$

dengan nilai  $\beta^2 = (160^\circ - 180^\circ)$

### 2.10. Head Turbin

*Head* Turbin air adalah titik tinggi jatuh air dan sering dinotasikan sebagai  $H$ . Nilai *head* turbin air adalah variable yang sangat penting dalam merencanakan sebuah turbin air. *Head* Turbin air dapat dicari menggunakan persamaan Bernoulli seperti yang ditunjukkan diagram pada gambar 2.12. Menurut persamaan Bernoulli besar energi aliran fluida adalah:

$$W = mgz + m \frac{p}{\rho} + m \frac{c^2}{2} \left( \frac{N}{kg} \right) \dots\dots\dots(2.20)$$

Dimana:

$m$  = Massa

$g$  = Kecepatan Gravitasi Bumi

$C$  = Kecepatan

$z$  = Selisih Ketinggian (Tinggi air atas-Tinggi air bawah)

$P$  = Tekanan

Jika pada aliran air tersebut nilai  $m = 1$  kg, maka energi spesifiknya adalah:

$$W = gz + \frac{p}{\rho g} + \frac{c^2}{2g} \text{ (Nm)} \dots \dots \dots (2.21)$$

Bila energi spesifik tersebut dibagi dengan gravitasi maka ketinggian:

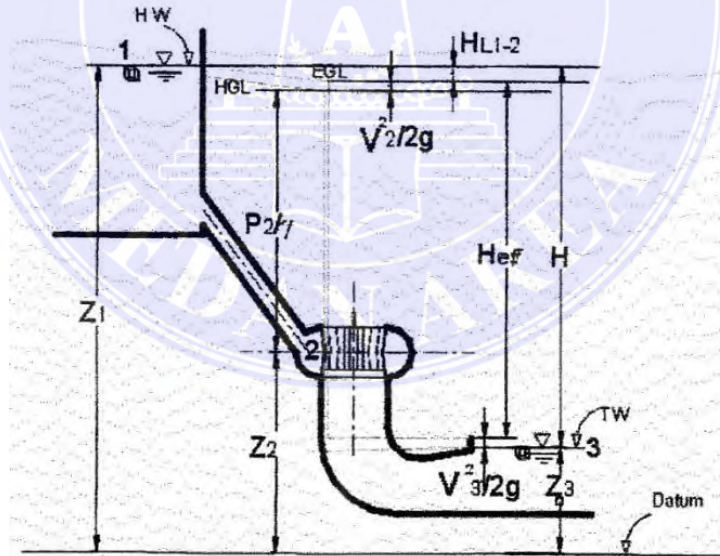
$$H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{c^2}{2g} = \text{Constan (m)} \dots \dots \dots (2.22)$$

Dimana:

$z$  = Ketinggian

$\frac{p}{\rho g}$  = Tinggi tekanan

$\frac{c^2}{2g}$  = Tinggi kecepatan



Gambar 2. 12 Diagram Bernoulli

### 2.11. Jenis Aliran Fluida

Fluida adalah suatu zat yang bisa mengalir, dalam fluida yang akan menjadi bagian dari penelitian ini adalah fluida air yang menumbuk *bucket* turbin pelton.

Untuk mencari nilai- nilai yang dibutuhkan terkait aliran fluida, hal yang selalu menjadi acuan adalah luas penampang, adapun persamaan yang digunakan dalam mencari luas penampang adalah:

$$A = \pi \cdot r \dots \dots \dots (2.23)$$

Dimana:

$A$  = Luas Penampang ( $m^2$ )

$\pi$  = Konstanta perbandingan keliling lingkaran dengan diameternya

$r$  = Jari-jari (m)

Rata-rata laju aliran air dibutuhkan pada penelitian ini sebagai variable yang harus di input. Adapun persamaan untuk mendapatkan *velocity magnitude* atau rata-rata laju aliran air adalah:

$$V = \frac{Q}{A} \dots \dots \dots (2.24)$$

Dimana:

$V$  = Kecepatan aliran rata-rata (m/detik)

$Q$  = Debit ( $m^3/s$ )

$A$  = Luas Penampang ( $m^2$ )

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.13, berdasarkan klasifikas inya terdapat 3 jenis dari aliran air atau fluida seperti, yaitu:

### 2.11.1. Aliran laminar

Aliran laminar adalah aliran dengan air atau fluida yang bergerak dalam lapisan, atau lamina dalam satu dan lapisan berjalan secara lancer dan teratur. Pada aliran laminar, viskositas berfungsi untuk meredam kecendrungan terjadinya

gerakan relatif pada setiap lapisan. Hal tersebut mengindikasikan bahwa aliran laminar memenuhi hukum viskositas Newton yaitu:

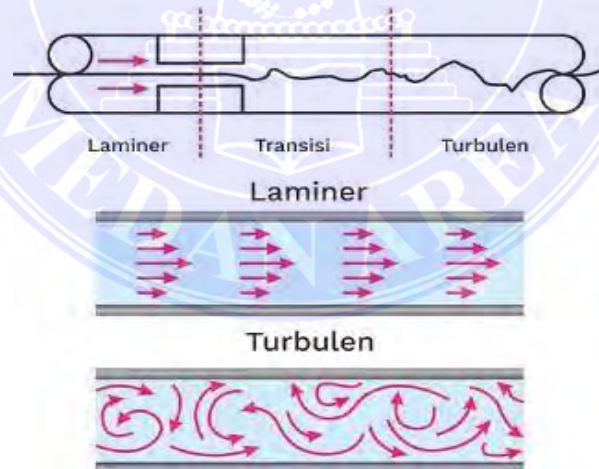
$$\tau = \mu + \frac{du}{dy} \dots \dots \dots (2.25)$$

### 2.11.2. Aliran Turbulen

Aliran turbulen adalah aliran dimana pergerakan dari partikel fluida tidak menentu karena mengalami percampuran serta putaran partikel antar lapisan lain. Hal tersebut mengakibatkan terjadinya saling tukar momentum antar fluida pada skala yang besar. Terjadinya turbulensi pada aliran turbulen mengakibatkan terjadinya tegangan geser yang merata diseluruh fluida sehingga menghasilkan kerugian aliran.

### 2.11.3. Aliran Transisi

Aliran transisi adalah aliran peralihan dari aliran laminar ke aliran turbulen.



Gambar 2. 13 Jenis Aliran Fluida

## 2.12. Computational Fluid Dynamic

*Computational Fluid Dynamic* (CFD) merupakan modeling dengan menggunakan sebuah software yang secara umum digunakan untuk menyelesaikan permasalahan yang berhubungan dengan aliran Fluida dan

interaksinya dengan permukaan benda (*boundary condition*). Penggunaan CFD berawal pada tahun 1960-an dan terus berkembang hingga saat ini. Pada modelling simulation, secara umum terdapat tiga langkah proses yang harus dilakukan, yaitu:

#### 2.12.1. Pre -Processing

Merupakan proses awal pembuatan dan penentuan dari variable-variabel modelling yang ingin disimulasikan. Proses ini meliputi:

- a. Penentuan kondisi batas atau *boundary* pada geometri
- b. Penentuan dan pengelompokan domain
- c. Meshing geometri

#### 2.12.2. Solving

Merupakan proses input variable-variabel sesuai dengan nilai atau spesifikasi dari sebuah model itu sendiri, secara umum proses solving itu sendiri meliputi:

- a. Models
- b. Materials
- c. Cell zones conditions
- d. Boundary conditions
- e. Mesh Interface
- f. Dynamic mesh
- g. Methods
- h. Solution

#### 2.12.3. Post Processing

Tahap ini merupakan tahap akhir dari CFD, dimana hasil dari simulasi CFD yang telah kita lakukan akan kita peroleh. Hasil dari simulasi CFD yang telah kita



lakukan biasanya berbentuk grafik realtime dan nilai-nilai hasil simulasi yang tersimpan dalam *file extension notepad*.

### 2.13. ANSYS

ANSYS adalah sebuah *software* analisis elemen hingga yang memiliki kemampuan menganalisa cakupan yang luas untuk berbagai jenis masalah. ANSYS mampu memecahkan persamaan differensial dengan cara memecahnya menjadi elemen- elemen yang lebih kecil. Pada awalnya program ini bernama STASYS Structural Analysis System, kemudian berganti nama menjadi ANSYS yang ditemukan pertama kali oleh Dr. John Swanson pada tahun 1970. ANSYS memiliki beragam varian dengan masing- masing fungsi dan kegunaan. ANSYS yang digunakan dalam penelitian ini adalah ANSYS Fluent.

ANSYS Fluent dapat membuat model fisika tingkat lanjut dan menganalisis berbagai fenomena fluida secara akurat dan efisien, semuanya dalam ruang yang dapat disesuaikan dan intuitif sehingga akan memudahkan dalam berinovasi dan mengoptimalkan kinerja produk. Aliran fluida pada ANSYS Fluent disimulasikan pada bentuk/ geometri yang rumit.

## BAB III METODE PENELITIAN

Metode penelitian tugas akhir dengan judul simulasi aliran air pada *bucket* turbin pelton dengan variasi dimensi *bucket* menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) adalah metode eksperimental semu. Secara garis besar metode ini dilakukan dengan cara membuat desain geometri turbin pelton menggunakan perangkat lunak komputer AutoCAD lalu kemudian di simulasikan dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent.

### 3.1. Waktu dan tempat

Penelitian ini dilakukan sejak tanggal pegesahan usulan oleh pihak Universitas Medan Area dan direncanakan akan selesai sesuai dengan waktu yang ditentukan. Tempat pelaksanaan penelitian adalah laboratorium Kampus Teknik Mesin Universitas Medan Area.

Tabel 3. 1 Waktu Kegiatan Penelitian

No	Kegiatan	Waktu (Bulan)															
		6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5				
1.	Studi Literatur	■															
2.	Perencanaan Model 3D		■	■													
3.	Penyusunan Proposal			■	■												
4.	Seminar Proposal				■	■											
5.	Pengujian CFD					■	■	■									
6.	Pengumpulan Data						■	■	■								
7.	Analisa Data							■	■	■							
8.	Laporan Penelitian										■						
9.	Seminar hasil											■					
10.	Perbaikan												■	■			
11.	Ujian Sidang														■	■	

## 3.2. Alat dan Bahan

### 3.2.1. Alat

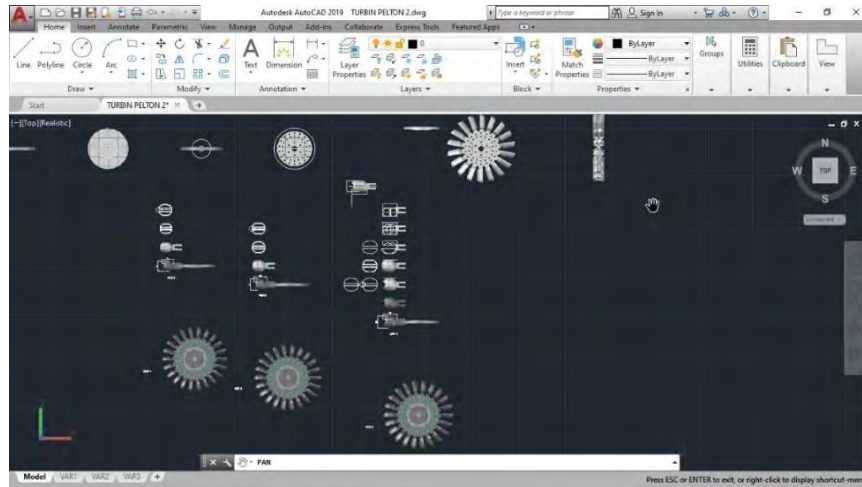
Penelitian ini menggunakan 2 jenis peralatan yaitu, perangkat lunak atau *software* yang menjadi alat utama untuk menjalankan semua proses Penelitian ini mulai dari studi literatur, pembuatan gambar 3D, simulasi hingga pengolahan serta analisa data dan perangkat keras atau *hardware* yang menjadi wadah untuk menjalankan perangkat lunak.

#### 3.2.1.1. Perangkat lunak

Perangkat lunak atau *software* yang digunakan dalam penelitian memiliki peran dan fungsinya masing-masing dengan hasil akhir atau output berupa *file extension* dari masing-masing perangkat lunak. Adapun perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

##### 3.2.1.1.1. Perangkat lunak AutoCAD 2019

Salah satu perangkat lunak atau *software* yang digunakan dalam penelitian ini adalah AutoCAD 2019 yang merupakan perangkat lunak yang berfungsi untuk membuat desain dalam bentuk 2D dan 3D. Sesuai namanya, AutoCAD memakai teknologi *Computer-aided Design (CAD)* yang mengoptimalkan komputer untuk membuat desain. Pada penelitian ini AutoCAD digunakan untuk menggambar geometri turbin pelton dalam bentuk 3D dengan 3 variasi dimensi *bucket*. Adapun perangkat lunak AutoCAD 2019 dapat terlihat pada gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Perangkat Lunak AutoCAD 2019

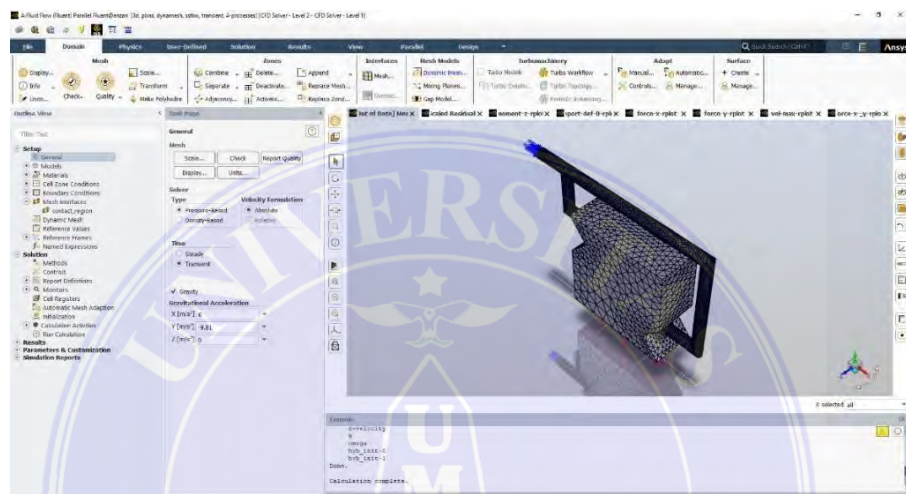
### 3.2.1.1.2. Perangkat lunak ANSYS Fluent

ANSYS Fluent adalah perangkat lunak atau *software* komputasi untuk *Computational Fluid Dynamic* (CFD) untuk pemodelan aliran fluida dan perpindahan panas dalam geometri kompleks. Jenis geometri yang dapat diproduksi dan diterima oleh perangkat lunak ini mencakup jaringan dengan elemen segitiga dan segi empat untuk geometri 2D dan empat sisi, heksagonal, berbentuk hermia untuk geometri 3D.

ANSYS Fluent seperti yang terlihat pada gambar 3.2 juga memungkinkan pengguna untuk memperbaiki geometri misalnya, mengutak-atik atau menggiling grid di batas-batas dan tempat yang dibutuhkan dalam geometri. Pengoptimalan untuk pemecahan dan geometri ini memberi pengguna kemampuan untuk memperbaiki hasil di area yang memiliki vortisitas besar seperti lapisan batas, dan lain-lain. Kemampuan ini sangat mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk menghasilkan geometri yang baik dibandingkan dengan pemecahan dalam jaringan terstruktur. Perangkat lunak ini ditulis dalam bahasa pemrograman C dan memiliki fleksibilitas dan fleksibilitas penuh dalam bahasa ini. ANSYS Fluent

memungkinkan penggunaan memori dinamis, struktur data dan informasi yang tepat, dan kontrol komputasi yang fleksibel.

Pada penelitian ini ANSYS Fluent digunakan untuk mensimulasikan aliran fluida yang menumbuk *bucket* sehingga memutar *runner* turbin pelton dan menghasilkan variable atau data yang diinginkan untuk kemudian dianalisa.



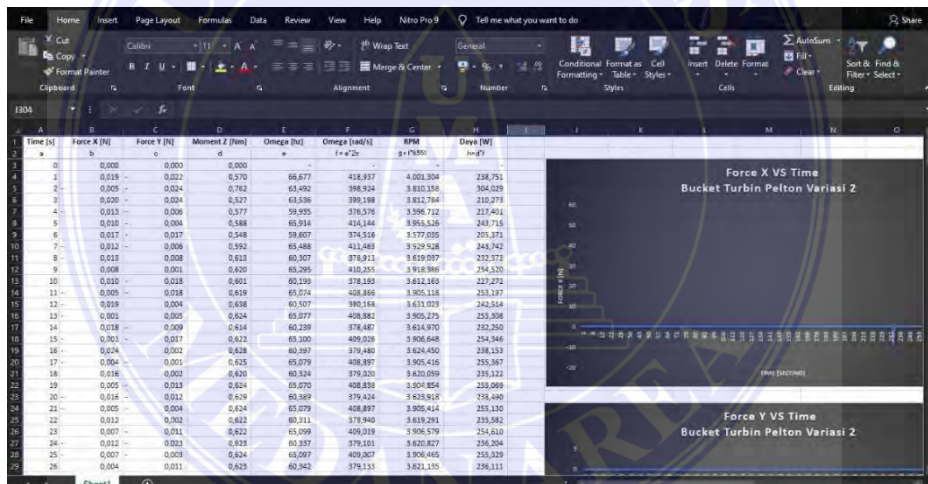
Gambar 3. 2 Perangkat Lunak ANSYS Fluent 16.0

### 3.2.1.1.3. Perangkat lunak Microsoft Excel

Microsoft Excel seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.3 adalah sebuah aplikasi yang digunakan untuk mengolah sebuah data dengan otomatis melalui berbagai bentuk seperti rumus, perhitungan dasar, pengolahan data, pembuatan tabel, pembuatan grafik hingga manajemen data. Microsoft Excel seringkali digunakan untuk keperluan administrasi pada sebuah penelitian. Karena aplikasi ini sangat mudah digunakan, lengkap serta sangat penting dalam proses pengolahan data penelitian. Selain itu, Excel juga memiliki formula yang memudahkan kita melakukan sebuah perhitungan dalam pengolahan data tersebut. Aplikasi ini juga sangat penting dalam pembuatan grafik tertentu yang dibutuhkan dalam sebuah penelitian. Aplikasi Microsoft Excel berupa lembaran kerja atau

spreadsheet yang mempunyai fitur-fitur kalkulasi yang baik dalam membantu kita semua untuk kebutuhan penelitian sehingga aplikasi ini sangat populer digunakan untuk mengelola atau manajemen data.

Microsoft Excel dalam penelitian ini berfungsi untuk mengelola data output hasil dari simulasi pada software ANSYS Fluent. Pengolahan, pembacaan dan analisa data pada Microsoft excel menjadi lebih simple karena data yang diinput kedalam Microsoft Excel dapat dengan mudah dirumuskan dan diubah menjadi grafik dan persamaan garis untuk memudahkan pemahaman, perbandingan, dan analisis agar dapat dianalisa untuk kemudian dilakukan perbandingan antara masing-masing data.



Gambar 3. 3 Perangkat Lunak Microsoft Excel

### 3.2.2. Perangkat keras

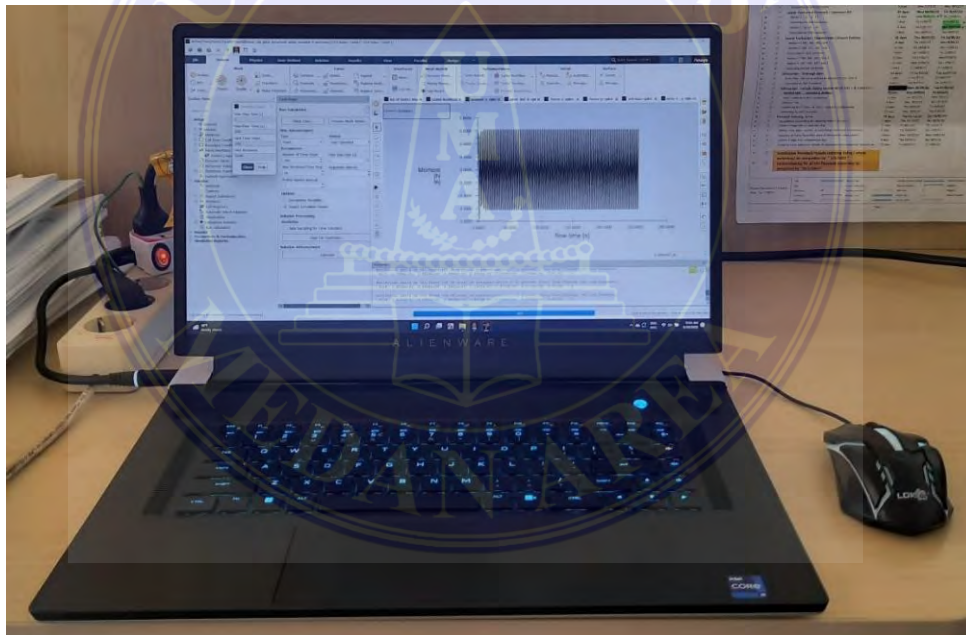
Perangkat keras atau *hardware* yang digunakan dalam penelitian ini berfungsi sebagai wadah untuk mengoperasikan perangkat lunak sesuai dengan kemampuan atau spesifikasi yang dibutuhkan pada masing-masing perangkat lunak. Adapun perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

### 3.2.2.1. Perangkat keras Laptop

Laptop seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3.4 adalah komputer bergerak atau bisa dipindahkan dengan mudah yang berukuran relatif kecil dan ringan, beratnya berkisar dari 1-8 kg, tergantung ukuran, bahan, dari spesifikasi laptop tersebut, laptop dapat digunakan dalam lingkungan yang berbeda dari komputer dan sering disebut sebagai komputer jinjing.

Tabel 3. 2 Spesifikasi Laptop

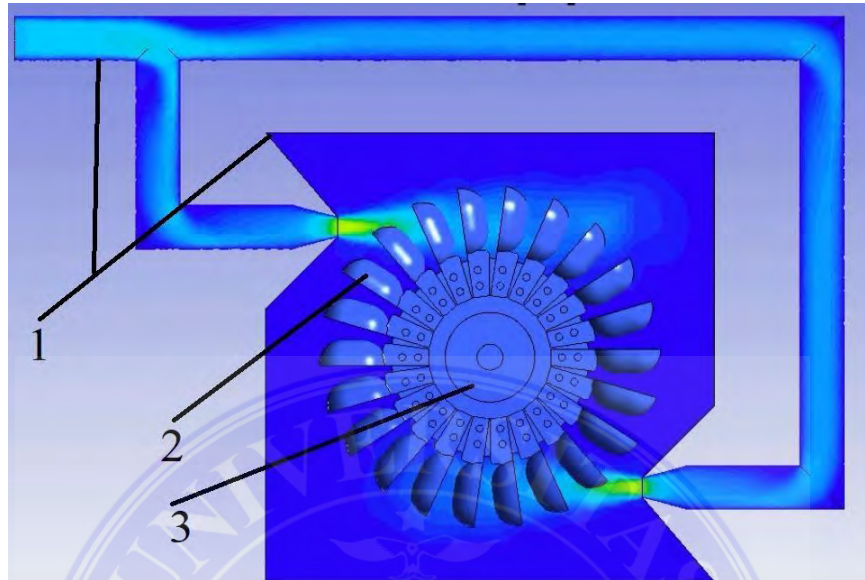
Perangkat	Spesifikasi
Processor	12 <sup>th</sup> Gen intel® Core™ i9-12900HK (20 CPUs), 2.5GHz
Installed RAM	32,00 GB
Display	Intel® Iris® Xe Graphics & NVIDIA GeForce RTX 3080
System type	Windows 11 Pro 64-bit operating system
Storage	SSD 460GB



Gambar 3. 4 Perangkat Keras Laptop

### 3.2.2. Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini terlihat pada gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Desain Turbin Pelton

Berikut merupakan keterangan dan spesifikasi bahan penelitian yang digunakan pada saat penelitian.

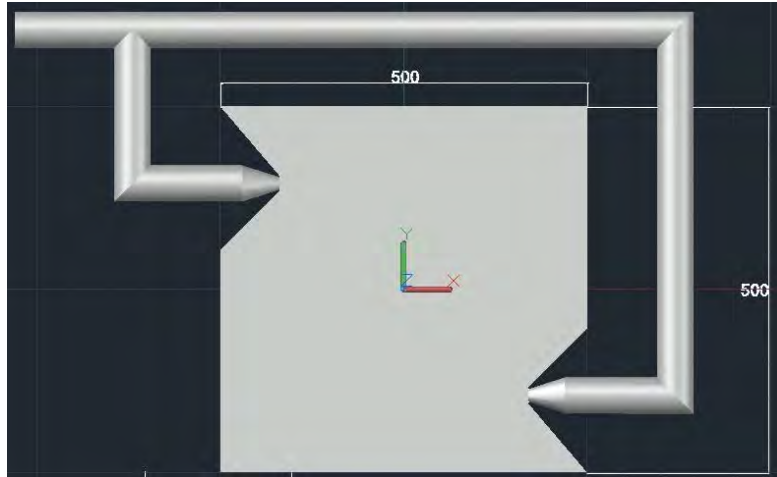
Tabel 3. 3 Spesifikasi Bahan Penelitian

No	Bagian	Keterangan
1	Rumah Turbin	$P = 0,50\text{m}$ , $L = 0,20\text{m}$ , $T = 0,50\text{m}$
2	<i>Bucket</i> Turbin	3 Variasi dimensi
3	<i>Runner</i>	$\varnothing$ <i>Runner</i> 0,22 m, $\varnothing$ Poros 0,10 m

#### 3.2.2.1. Gambar Rumah Turbin

Rumah turbin pelton yang digunakan pada simulasi ini memiliki dimensi panjang dan tinggi 0,50 m dengan ketebalan 0,20 m. Rumah turbin dilengkapi oleh 2 aliran *nozzle* untuk masuknya fluida air penggerak turbin pada bagian kiri atas dan kanan bawah seperti yang terlihat pada gambar 3.6.

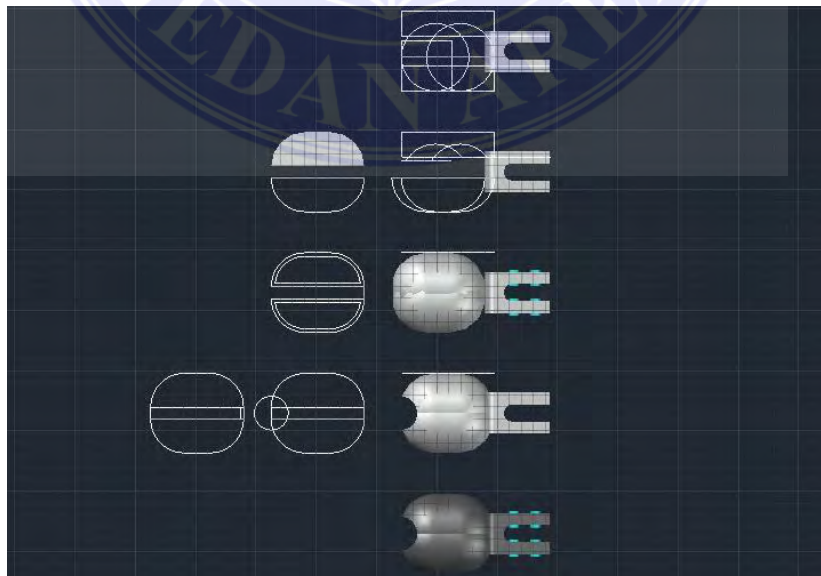




Gambar 3. 6 Desain Rumah Turbin Pelton

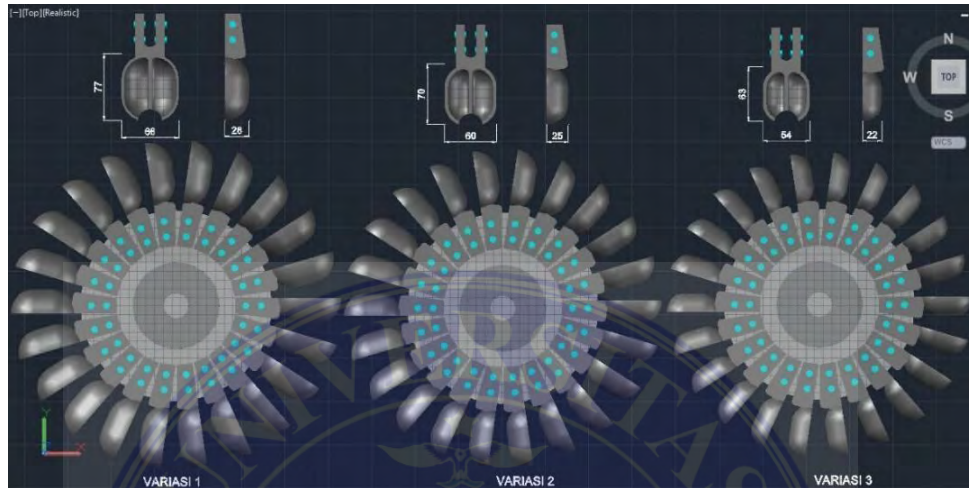
### 3.2.2.2. Gambar Bucket Turbin

Proses penggambaran *bucket* diawali dengan membuat sketsa 2D dari bagian-bagian tertentu. Setelah digambar secara 2D kemudian langkah selanjutnya adalah menggunakan tools “PRESSPULL” & “EXTRUDE” untuk mengubah base line 2D yang sudah dikerjakan menjadi 3D. Adapun proses pembuatan gambar 3D yang dilakukan pada penelitian ini terlihat pada gambar 3.7.



Gambar 3. 7 Proses pembuatan gambar 3D bucket turbin pelton

Gambar *bucket* turbin pelton dibuat sebanyak 3 variasi dimensi dengan masing- masing variasi dari 22 buah *bucket*. Adapun gambar *bucket* yang sudah dibuat terlihat pada gambar 3.8.



Gambar 3. 8 Desain *Bucket* Turbin Pelton 3 Variasi Dimensi

Berdasarkan gambar diatas, terlihat perbedaan dimensi yang cukup signifikan apabila masing- masing variasi *bucket* dipasangkan ke *runner* turbin pelton. Adapun ukuran dari masing-masing variasi *bucket* diatas adalah:

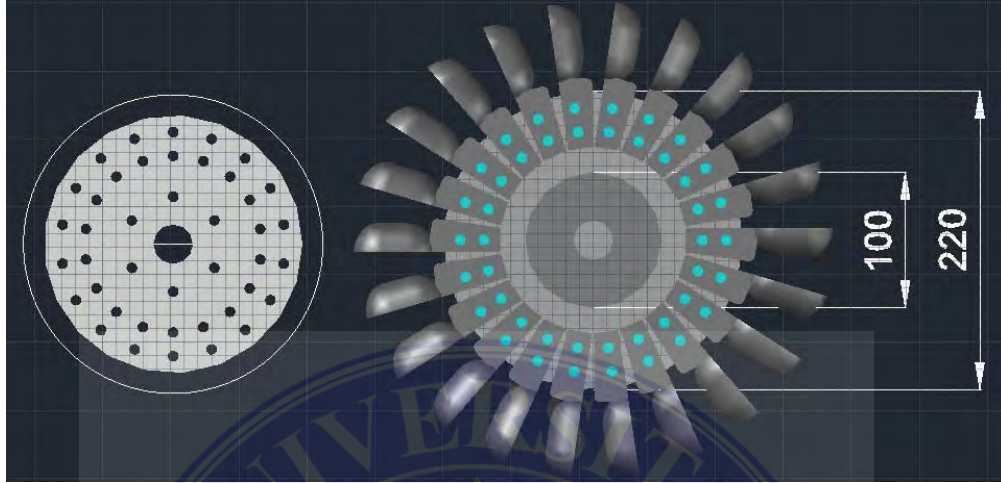
Tabel 3. 4 Ukuran Variasi *Bucket* Turbin Pelton

No	Variasi <i>Bucket</i>	Ukuran
1	Variasi 1	Panjang = 0,077m, Lebar = 0,066m, Tebal = 0,028m, Ø Jet Circle 0,022m.
2	Variasi 2	Panjang = 0,070m, Lebar = 0,060m, Tebal = 0,025m, Ø Jet Circle 0,020m.
3	Variasi 3	Panjang = 0,063m, Lebar = 0,054m, Tebal = 0,022m, Ø Jet Circle 0,018m.

### 3.2.2.3. Gambar *Runner*

*Runner* turbin pelton yang digunakan pada simulasi ini memiliki diameter 0,22 m dengan diameter poros 0,10 m. Terdapat 1 lubang untuk poros dengan diameter 0,029 m dan juga 6 lubang baut untuk dudukan ke poros dan 44 lubang

baut untuk mengikat *bucket* dengan diameter 0,08 m. Adapun gambar *runner* yang akan disimulasikan pada penelitian ini dapat terlihat pada gambar 3.9.



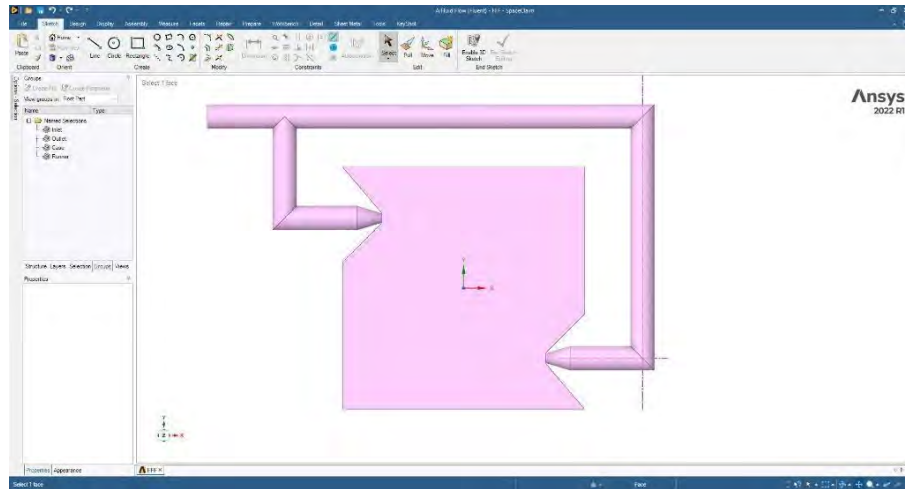
Gambar 3. 9 Desain *Runner* Turbin Pelton

### 3.3. Metode Penelitian

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah eksperimental semu atau *modelling experiment* menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent. Berikut adalah tahapan proses penelitian dengan menggunakan ANSYS Fluent:

#### 3.3.1. Proses Edit Geometry

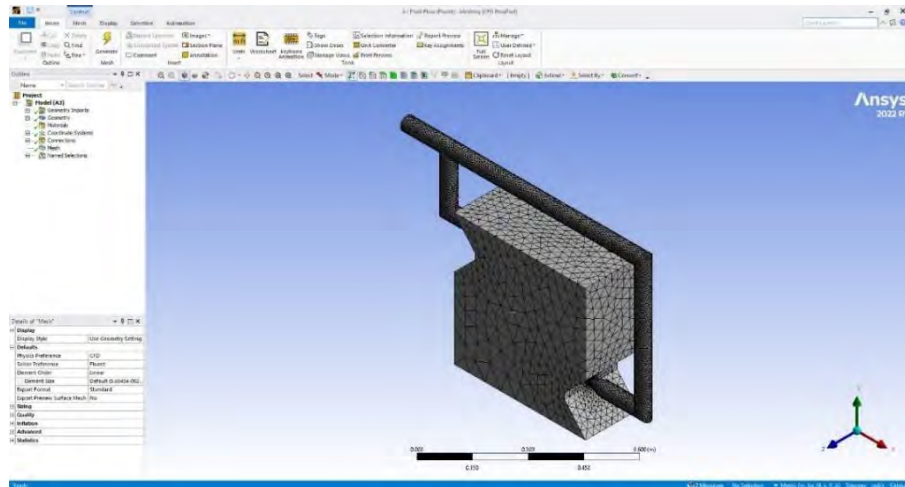
Gambar geometri yang telah dibuat menggunakan AutoCAD kemudian di *save as* “.sat” agar dapat diinput kedalam ANSYS. Setelah melakukan input gambar pada ANSYS Fluent tahap selanjutnya ada melakukan penentuan *Structures* dan *Groups* seperti yang terlihat pada gambar 3.10. Struktur yang dibuat pada proses ini diberi nama Dom Putar untuk struktur *runner* yang bergerak dan Dom Statis untuk struktur casing keseluruhan. *Groups* yang dibuat pada proses ini adalah *Inlet*, *Outlet*, *Case* dan *Runner*.



Gambar 3. 10 Penentuan Structures dan Groups

### 3.3.2. Proses Meshing

Setelah melakukan penentuan *Structures* dan *Groups* tahap selanjutnya adalah melakukan proses meshing seperti yang terlihat di gambar 3.11. Proses Meshing dilakukan secara otomatis menggunakan fitur *Generates* yang tersedia pada ANSYS Fluent. Meshing merupakan proses diskritisasi domain fluida yang kontinu menjadi domain komputasi yang diskrit sehingga dapat diselesaikan dengan persamaan-persamaan yang sudah tertanam didalam software, dalam meshing ini luas permukaan dari turbin pelton dicacah-cacah agar dapat dihitung, dimana semakin kecil proses pencacahan, maka hasil luas permukaan yang diperoleh akan semakin akurat. Namun, jika pencacahan terlalu banyak, maka persamaan yang dihasilkan akan semakin banyak dan membutuhkan proses komputasi yang terlalu lama. Pada bucket turbin pelton variasi 2, mesh report yang didapatkan dari hasil meshing adalah nodes all domain= 365020 dan elements all domain= 1896867.



Gambar 3. 11 Proses Meshing ANSYS Fluent

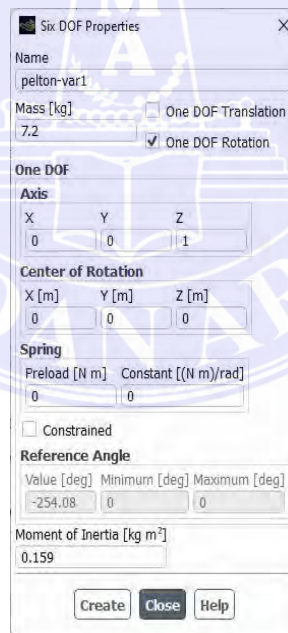
### 3.3.3. Proses Setup

Pada proses ini dilakukan penginputan variable-variable yang diinginkan seperti penentuan arah gravitasi sumbu Y sebesar  $-9,81 \text{ m/s}^2$  pada menu *General*, Penentuan *Viscous* pada menu *Models* dimana pada penelitian ini *viscous* yang dipilih adalah Spalart-Allmaras (1 eqn), *input variable* fluida *water-liquid* dengan *density*  $998,2 \text{ kg/m}^3$  dan *viscosity*  $0,00103 \text{ kg/(m.s)}$ , *input boundary conditions inlet* dengan *operating pressure*  $101325 \text{ Pa}$  dan *velocity magnitude*  $4 \text{ m/s}$  di dapat dengan menggunakan rumus seperti yang sudah dijelaskan pada BAB II.

Nilai  $Q$  atau debit pada penelitian ini didapatkan dengan melakukan konversi dari nilai kemampuan pompa air yang umumnya digunakan untuk membangun turbin pelton skala laboratorium yaitu  $500 \text{ liter per menit}$  kemudian dikonversi ke satuan SI menjadi  $0,008 \text{ m}^3/\text{s}$ . Sedangkan luas penampang dari pipa aliran air dengan diameter  $0,05 \text{ m}$  pada penelitian ini senilai  $0,002 \text{ m}^2$  yang didapatkan dengan menggunakan rumus yang sudah dijelaskan pada BAB II:

Langkah selanjutnya setelah melakukan input inlet adalah menginput *outlet* dengan melakukan centang pada pilihan *prevent reverse flow*, dilanjutkan dengan setting *mesh interface* dengan mencentang *Matching* pada *contact region* dan

*input* parameter-parameter pada *dynamic mesh*. Pada *Dynamic mesh* langkah awal yang dilakukan adalah mencentang *Dynamic Mesh*, *Smoothing*, *Layering* dan *Remeshing* lalu kemudian masuk ke setting dengan mencentang *Spring* pada halaman *Smoothing*, mencentang *Height Based* pada halaman *Layering* dan mengcopy nilai yang terdapat pada *mesh scale info* pada halaman *Remeshing*. Langkah selanjutnya adalah melakukan centang pada Six DOF pada *dynamic mesh* lalu kemudian pilih *setting* lalu pilih *create/edit* untuk membuat Six DOF *Properties*. Variabel-variabel yang di input pada proses pembuatan Six DOF *Properties* adalah pemberian nama pelton untuk turbin, masukan variable berat dari turbin pelton, centang *one DOF rotation*, masukan nilai axis 1 pada sumbu Z lalu dilanjutkan dengan menginput *moment of inertia*. Adapun gambar proses pembuatan Six DOF *Properties* terlihat pada gambar 3.12.



Gambar 3. 12 Six DOF *Properties* Turbin Pelton Variasi 1

Nilai Inersia masing- masing variasi bucket berbeda, hal itu dikarenakan massa atau berat turbin dan jarak bucket terhadap sumbu putar atau jari-jari masing-masing bucket berbeda. Menggunakan persamaan yang sudah dijelaskan

pada BAB II, maka nilai inersia dari masing- masing bucket dapat terlihat pada tabel 3.5.

Tabel 3. 5 Nilai inersia masing-masing variasi bucket

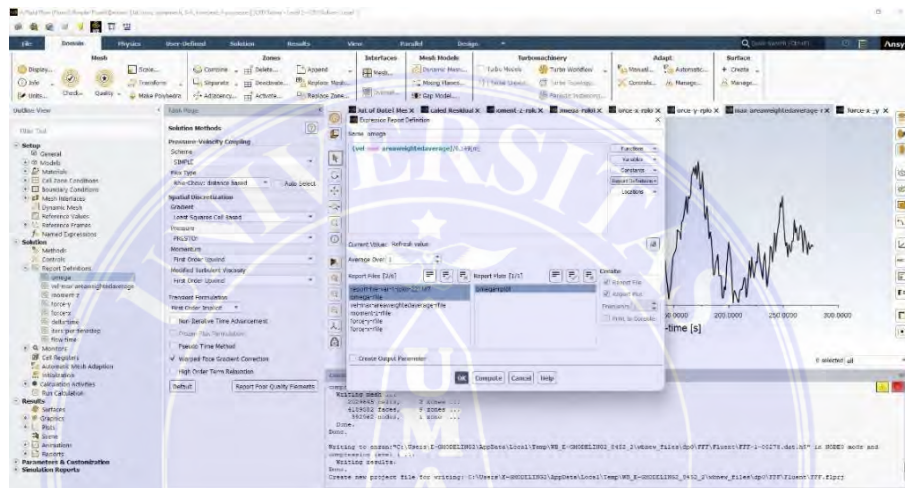
No	Varian	m [kg]	R [m]	I [kgm <sup>2</sup> ]
1	Variasi 1	7,189	0,022	0,159
2	Variasi 2	6,727	0,021	0,141
3	Variasi 3	6,270	0,020	0,126

Setelah selesai menginput variabel yang dibutuhkan untuk dynamic mesh turbin pelton kemudian klik OK dan centang *Write Motion History*. Langkah selanjutnya dari proses *setup dynamic mesh* adalah melakukan create pada *dynamic mesh zones* dengan langkah awal memilih dom statis (structure yang dibuat pada proses edit geometri) pada *Zones Names* lalu mencentang *Deforming* lalu pilih Six DOF turbin pelton yang sudah dibuat sebelum nya kemudian klik *create*, pilih lagi dom putar pada *Zones Names* kemudian centang *rigid body* dan centang *on* dan *passive* pada *Six DOF* pilih Six DOF turbin pelton yang sudah dibuat sebelum nya kemudian klik *create*, pilih lagi *runner* pada *Zones Names* lalu centang *rigid body* dan centang *on* pada *Six DOF* pilih Six DOF turbin pelton yang sudah dibuat sebelum nya kemudian klik *create*.

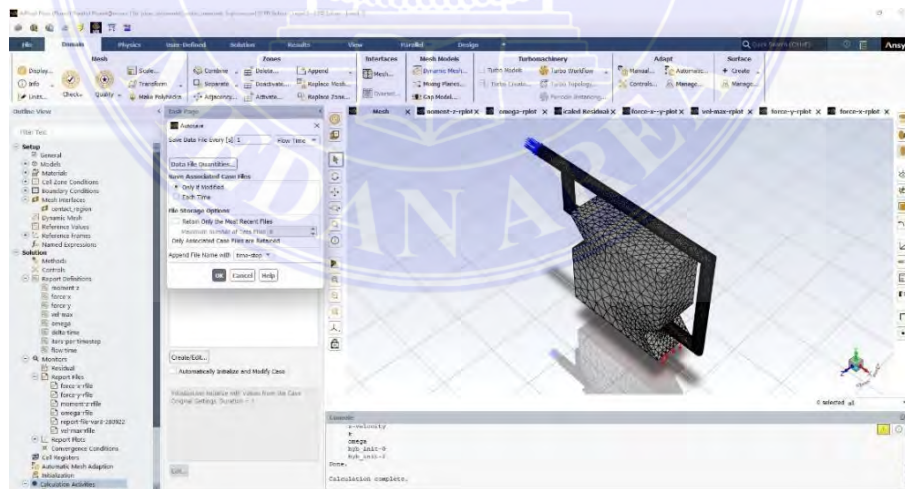
### 3.3.4. Proses Solution

Proses ini dilakukan untuk menentukan *methods* yaitu dengan memilih *SIMPLE* pada *Scheme*, *PRESTO* pada *Pressure*, *First Order* untuk *momentum*, *Turbulent Kinetic energy* serta yang terakhir pada proses *Solution Methods* adalah mencentang *Warped-Face Gradient Correction*. Proses Solution lainnya yang dilakukan pada penelitian ini adalah menentukan dan menginput data report yang diinginkan melalui menu *Report Definition* dan *Monitors*. Nilai omega dari hasil

simulasi didapatkan dengan menggunakan persamaan yang sudah dijelaskan pada BAB II, dimana nilai  $V$  ditentukan dengan memasukan *Area-Weighted average velocity* pada *Report Definitions* seperti yang terlihat pada gambar 3.13. Proses terakhir pada penguinputan *solution* adalah menentukan jumlah langkah dan waktu yang diinginkan pada simulasi. Adapun proses *solution* yang dilakukan pada penelitian ini terlihat pada gambar 3.14.



Gambar 3. 13 Report Omega Turbin Pelton Variasi 1



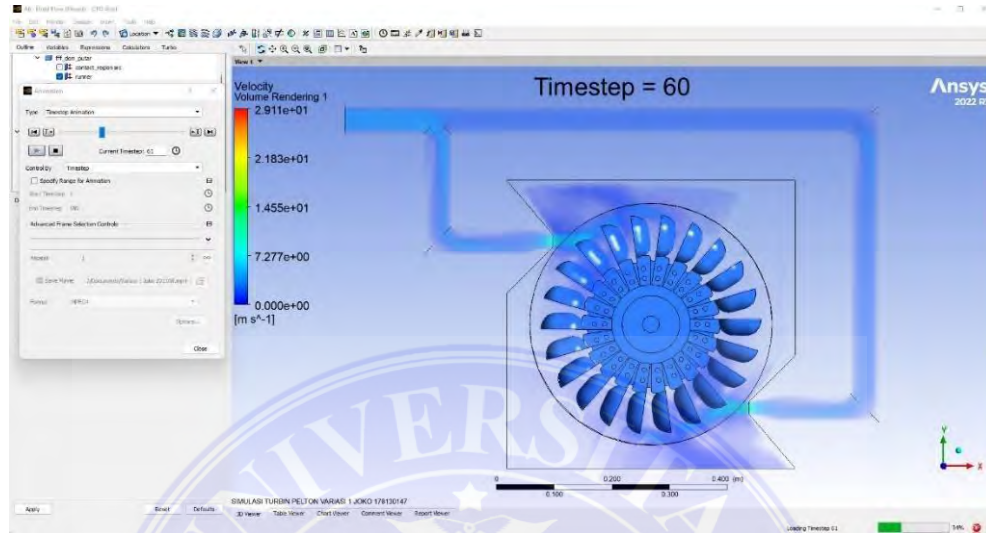
Gambar 3. 14 Proses Solution ANSYS Fluent

### 3.3.5. Proses Result

Proses ini dilakukan untuk membaca data hasil akhir dari simulasi yang sudah selesai dilaksanakan dan juga untuk dapat menentukan dan melihat animasi



dari simulasi yang sudah dijalankan baik itu animasi dari fluida maupun putaran turbin seperti yang terlihat pada gambar 3.15.



Gambar 3. 15 Proses Edit Result Animasi ANSYS Fluent

### 3.4. Variabel Diamati

Variabel yang diamati dan dianalisa selama penelitian ini berlangsung adalah nilai dari *Force* sumbu X & Y [N], *Moment/* torsi sumbu Z [Nm], *Omega/* Kecepatan sudut [rad/s] yang terlihat secara *real time* pada grafik yang tertera pada ANSYS Fluent. Setelah penelitian selesai dilaksanakan kemudian variable tersebut dikonversi kedalam Microsoft Excel agar dapat menentukan daya [W] yang dihasilkan dengan menggunakan rumus yang sudah dijelaskan pada BAB II.

### 3.5. Diagram Penelitian

Untuk memaksimalkan ketelitian hasil simulasi dibuat dua buah titik balik pada alur penelitian seperti yang ditunjukkan gambar 3.16. Titik balik pada alur penelitian yang pertama adalah pada tahap simulasi. Pada bagian ini *error* akan sering muncul baik itu berupa kegagalan perhitungan atau kesalahan hasil simulasi. Jika *error* terjadi maka kita harus kembali ke tahap studi literatur dan

pengumpulan data untuk memeriksa dan me *reviu* ulang studi literatur dan data. Titik balik yang kedua adalah pada tahapan proses hasil penelitian, apabila data hasil penelitian sudah dibandingkan dan mendapatkan inkonsistensi pada karakteristik data maka akan dicoba mitigasi kembali kesalahan yang mungki terjadi. Apabila terdapat inkonsistensi pada karakteristik data, maka kita harus kembali lagi ke tahap memeriksa data yang dikumpulkan dan juga perhitungan data yang telah dilakukan serta me *reviu* ulang studi literatur sebagai referensi untuk melakukan simulasi dan penelitian. Rincian dari diagram alir tersebut dijelaskan pada poin-poin dibawah ini:

#### 3.5.1. Identifikasi dan Perumusan Masalah

Penjelasan semua topik masalah dan tujuan penelitian yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah seperti yang sudah dijelaskan pada BAB I.

#### 3.5.2. Studi Literatur dan Pengumpulan Data

Sebelum melakukan penelitian diperlukan referensi berbagai disiplin ilmu yang berhubungan topik masalah. Berbagai sumber pengetahuan harus dimanfaatkan untuk dijadikan berbagai macam pertimbangan nantinya.

#### 3.5.3. Penggambaran Model 3D Turbin Pelton

Pada tahap ini gambar 3D turbin pelton beserta 3 variasi *bucket* akan Digambar menggunakan perangkat lunak AutoCAD.

#### 3.5.4. Simulasi

Proses ini adalah proses yang paling rentan untuk terjadi error, karenanya setiap tahap sebelumnya harus dilakukan dengan teliti.

### 3.5.5. Analisa Data

Jika sudah masuk tahap ini berarti seluruh perhitungan iterasi simulasi telah selesai. Pada tahap ini dapat diambil data berupa gambar, grafik, dan tabel yang dapat dianalisis dan dibandingkan dengan data lainnya.

### 3.5.6. Evaluasi

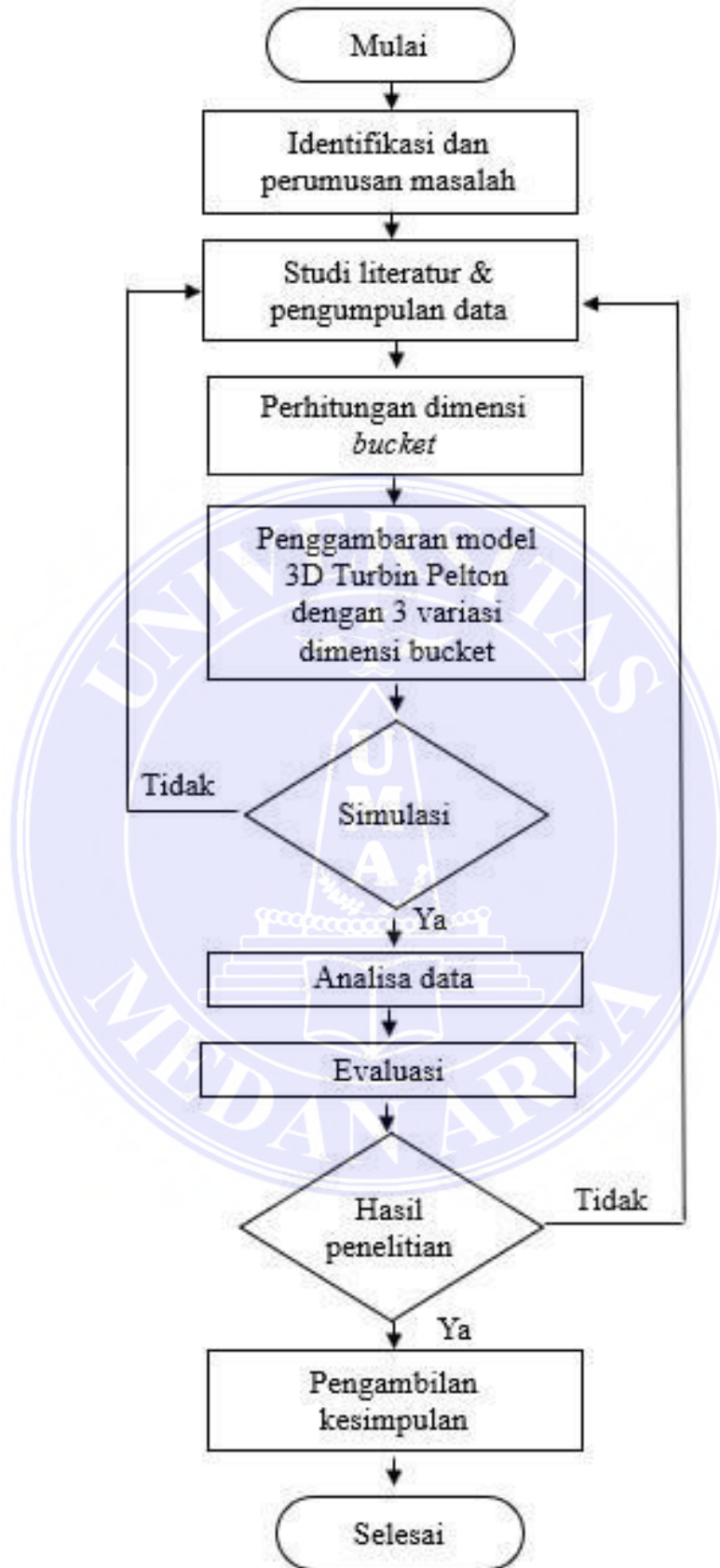
Pada tahap ini data yang sudah dianalisa dan dibandingkan akan dievaluasi terhadap karakteristik data yang didapat dari hasil studi literatur sebelumnya dan didiskusikan dengan dosen pembimbing.

### 3.5.7. Hasil penelitian

Setelah dilakukan evaluasi data maka hasil dari evaluasi tersebut akan menentukan apakah hasil penelitian dapat diterima atau tidak.

### 3.5.8. Pengambilan Kesimpulan

Apabila data hasil penelitian dapat diterima maka tahap selanjutnya adalah membuat kesimpulan dari penelitian yang sudah dilakukan.



Gambar 3. 16 Diagram Penelitian

## BAB V

### SIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Simpulan

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan tentang Simulasi aliran air pada *bucket* turbin pelton dengan variasi dimensi *bucket* menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) ANSYS Fluent dengan pengaturan *timestep* simulasi selama 300 detik, dapat disimpulkan:

1. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa nilai torsi atau *moment* yang paling optimal didapatkan pada hasil simulasi bucket turbin pelton variasi 2.
2. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa nilai kecepatan sudut yang paling optimal didapatkan pada hasil simulasi bucket turbin pelton variasi 2.
3. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa nilai daya yang paling optimal didapatkan pada hasil simulasi bucket turbin pelton variasi 2.
4. Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa *bucket* variasi 1 gagal pada *timestep* ke 179 detik, sehingga data yang diperoleh pada simulasi *bucket* turbin pelton variasi 1 menjadi tidak relevan. Nilai yang didapatkan dari hasil penelitian bucket turbin pelton variasi 3 lebih kecil daripada nilai yang didapatkan pada penelitian bucket turbin pelton variasi 2. Sesuai dengan semua kesimpulan dan penjelasan diatas, maka penentuan bucket turbin pelton yang paling optimal yang dapat diaplikasikan, jatuh kepada *bucket* turbin pelton variasi 2.

## 5.2. Saran

1. Untuk penelitian dengan menggunakan metode CFD akan jauh lebih baik apabila peneliti dibekali dengan ilmu pengoperasian software terkait.
2. Penggunaan komputer dengan spesifikasi yang lebih tinggi sangat disarankan untuk penelitian ini agar proses dan hasil simulasi dapat berjalan dengan lebih baik, detail, cepat dan optimal. Pada penelitian ini pemilihan parameter dibatasi dengan *time step size* [second] senilai 1 detik dan *number of steps* (total Langkah) hanya 300 yang apabila kita konversikan ke waktu normal, maka lamanya turbin disimulasikan atau beroperasi adalah 5 menit. Serta pada penelitian ini pengaturan *autosave* pada menu *calculation activities* dipilih *save data file every 1 flowtime*. Apabila penelitian dilakukan dengan menggunakan komputer yang memiliki spesifikasi lebih tinggi, maka peneliti dapat mengubah *time step size* [second] dan *autosave* (*every “flowtime” or “timestep”*) menjadi lebih kecil daripada 1 detik agar pembacaan data, trend grafik dan animasi yang dihasilkan lebih detail serta *number of steps* (total langkah) ditambahkan agar waktu turbin disimulasikan atau beroperasi menjadi lebih lama.

## DAFTAR PUSTAKA

- E. Eswanto, S. J. Sitompul, T. Siangian, I. Gunawan, and A. Aminur, "Aplikasi Pptm Penghasil Energi Listrik Di Sungai Lawang Desa Simbang Jaya Kecamatan Bahorok," *Din. J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 11, no. 2, p. 56, 2020, doi: 10.33772/djitm.v11i2.11678.
- R. Gunawan, "Optimasi Kinerja Turbin Pelton Respon Kemiringan Bucket Dengan Diameter Nosel Menggunakan Software Statistika," vol. 5035, pp. 76–81, 2020, [Online]. Available: <http://jurnal.harapan.ac.id/index.php/JSR>.
- B. Suyesh, V. Parag, D. Keshav, A. M. Ahmed, and O. Abdul-Ghani, "Novel trends in modelling techniques of Pelton Turbine bucket for increased renewable energy production," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 112, no. August 2018, pp. 87–101, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.05.045.
- S. Sabu, N. J. George, T. A. Antony, and A. C. Alex, "Design and Modeling of a Pelton Wheel Bucket," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 3, no. 3, p. 3, 2014.
- Bono and Indarto, "Karakterisasi Daya Turbin Pelton Mikro dengan Variasi Bentuk Sudu," *Semin. Nas.*, no. gambar 4, pp. 187–196, 2008.
- M. M. Alnakhilani, Mukhtar, D. A. Himawanto, A. Alkurtehi, and D. Danardono, "Effect of the bucket and nozzle dimension on the performance of a pelton water turbine," *Mod. Appl. Sci.*, vol. 9, no. 1, pp. 25–33, 2015, doi: 10.5539/mas.v9n1p25.
- B. L. Gaol, "Uji Performasi Turbin Pelton Dengan 24 Sudu Pada Head 5,23 Meter Dengan Menggunakan Satu Nosel Dan Analisa Perbandingan Menggunakan Variasi Bentuk Sudu," *Skripsi Dep Tek Mes, Fak Tek USU*. 2013.
- Hadimi, Supandi, and A. Rohermanto, "Rancang Bangun Model Turbin Pelton Mini Sebagai Media Simulasi / Praktikum Mata Kuliah Konversi Energi Dan Mekanika Fluida," *J. Ilm. Semesta Tek.*, vol. 9, no. 1, pp. 16–24, 2006.
- M. R. Barus and F. Kurniawan, "RESPON KINERJA TURBIN PELTON DENGAN DIAMETER NOZLE ALIRAN TEKANAN AIR," *ISSN : 2598–3814 (Online), ISSN : 1410–4520 (Cetak)* vol. 3814, pp. 148–152, 1800.
- D. Luknanto, "Bangunan Tenaga Air," *Diktat Kuliah*, pp. 1–14, 2017.
- A. Mahmudi, "Buku Bahan Ajar Pompa Dan Kompresor," *Poltek Negeri Bandung*, p. 112, 2006.

## LAMPIRAN

### Data Hasil Simulasi Bucket Turbin Variasi 1

Time [s]	Force X [N]	Force Y [N]	Moment Z [Nm]	Omega [rad/s]	Daya [W]
a	b	c	d	e	f=d*e
-			-	-	-
1	9,172	6,080	4,494	0,000	0,000
2	2,520	3,421	8,672	9,687	84,005
3	0,460	(0,884)	5,714	4,639	26,507
4	(2,691)	(2,687)	9,625	0,212	2,036
5	(3,984)	(4,355)	10,911	1,576	17,190
6	(2,709)	(3,318)	11,607	11,028	128,002
7	(0,869)	(1,133)	6,724	15,145	101,842
8	(1,649)	0,034	2,745	13,486	37,022
9	(3,719)	(2,844)	4,753	4,555	21,654
10	(4,547)	(2,135)	10,736	5,922	63,581
11	(3,552)	(5,960)	6,640	14,840	98,541
12	(5,448)	(4,648)	16,651	25,570	425,783
13	(1,478)	(2,870)	4,287	16,797	72,005
14	(0,693)	(0,551)	1,620	13,750	22,279
15	(4,113)	(2,844)	8,740	24,741	216,241
16	(3,410)	(1,118)	14,199	35,099	498,381
17	(1,151)	(0,576)	1,670	28,428	47,480
18	(2,669)	(2,654)	7,217	38,288	276,313
19	(2,295)	(1,716)	3,293	30,587	100,734
20	(2,548)	(1,960)	7,881	28,838	227,264
21	(3,651)	(2,163)	8,242	24,238	199,768
22	(20,281)	(31,340)	11,307	19,645	222,115
23	(6,412)	0,318	1,758	12,358	21,720
24	(3,803)	(1,113)	1,526	17,862	27,253
25	(3,447)	(0,221)	4,959	13,363	66,268
26	(3,104)	(0,832)	7,736	12,944	100,138
27	(1,879)	(4,588)	11,880	22,213	263,875
28	0,403	(4,918)	11,852	11,997	142,190
29	(1,991)	(2,956)	4,468	9,458	42,262
30	(2,158)	(1,437)	2,805	11,743	32,941
31	(3,762)	(3,269)	6,180	8,399	51,905
32	(1,714)	(1,982)	7,609	10,984	83,572
33	(1,474)	(2,068)	3,780	5,068	19,158
34	(2,418)	(2,560)	7,693	7,659	58,919
35	(1,170)	0,225	1,733	1,980	3,432
36	3,267	2,703	2,846	5,951	16,938
37	(1,061)	(2,877)	5,425	3,500	18,986
38	(3,510)	(2,321)	8,233	2,728	22,458
39	(2,985)	(2,205)	10,908	12,962	141,378
40	(4,392)	(2,835)	9,133	22,563	206,075
41	(5,529)	(3,057)	14,014	32,935	461,536
42	(2,627)	(3,426)	8,094	35,762	289,452
43	(3,790)	(3,053)	9,539	25,461	242,871
44	(6,088)	(4,673)	17,586	36,372	639,619
45	(1,773)	(2,802)	5,461	38,743	211,572
46	(2,137)	(2,059)	7,321	30,231	221,332
47	249,642	280,864	15,313	27,299	418,026
48	(15,711)	11,985	16,186	20,684	334,789



49	(19,789)	1,940	1,513	22,279	33,707
50	(18,262)	(35,728)	5,682	17,239	97,945
51	(6,387)	(6,252)	2,899	24,818	71,955
52	(5,959)	(3,324)	6,817	17,817	121,460
53	(2,952)	(1,291)	4,694	9,091	42,670
54	0,139	0,052	0,449	3,298	1,482
55	0,134	(1,106)	2,981	10,945	32,627
56	(1,922)	(1,286)	4,648	1,688	7,844
57	(1,742)	(1,179)	6,560	2,695	17,678
58	(5,273)	(3,501)	7,405	6,211	45,995
59	(2,370)	(1,773)	4,289	0,621	2,664
60	(3,285)	(1,998)	8,394	11,260	94,523
61	(4,201)	(2,449)	6,080	1,730	10,521
62	(3,895)	(4,644)	12,600	2,451	30,885
63	(1,763)	(2,364)	4,640	5,014	23,266
64	(2,849)	(4,868)	5,798	13,641	79,095
65	(2,424)	(1,334)	3,470	15,266	52,971
66	(4,600)	(3,252)	13,067	25,465	332,754
67	(3,957)	(2,914)	7,045	20,329	143,214
68	(2,477)	(1,160)	1,417	12,507	17,727
69	(2,091)	(1,854)	4,964	10,927	54,245
70	(2,625)	(2,008)	8,735	15,666	136,841
71	(2,556)	(2,007)	7,667	22,272	170,749
72	(5,319)	(1,657)	9,338	20,838	194,583
73	0,082	0,882	0,634	26,253	16,632
74	(3,150)	(1,808)	9,025	34,665	312,835
75	(2,362)	(0,868)	4,143	36,347	150,598
76	(4,262)	(3,199)	12,508	37,851	473,425
77	(2,687)	(2,830)	3,408	30,393	103,590
78	(2,816)	(2,899)	3,460	36,194	125,247
79	(0,362)	(1,600)	6,699	27,093	181,486
80	(1,528)	(1,236)	5,082	33,305	169,269
81	(4,950)	(4,490)	11,003	43,586	479,585
82	(5,732)	(3,382)	14,434	44,665	644,705
83	(1,270)	(1,926)	4,736	47,912	226,926
84	(2,678)	(1,884)	5,104	53,928	275,241
85	(3,806)	(3,327)	4,596	61,853	284,302
86	(2,128)	(1,722)	8,032	66,213	531,855
87	(2,012)	(2,344)	0,336	57,291	19,228
88	(2,520)	(2,628)	7,752	54,191	420,098
89	(4,120)	(2,492)	5,848	54,879	320,929
90	(3,847)	(3,447)	8,958	62,387	558,841
91	(3,214)	(2,298)	3,747	67,144	251,594
92	(2,497)	(2,387)	9,943	74,735	743,074
93	(2,004)	(2,520)	8,325	73,840	614,717
94	(4,739)	(4,627)	20,150	74,766	1.506,566
95	(1,661)	(0,704)	1,631	70,489	114,992
96	(3,264)	(2,508)	13,287	77,421	1.028,703
97	(21,945)	(18,518)	8,409	87,654	737,107
98	(4,733)	2,497	16,391	95,722	1.568,968
99	(2,355)	(1,360)	4,928	105,753	521,193
100	(4,640)	(2,856)	13,564	100,801	1.367,304
101	(1,746)	(2,388)	3,284	105,341	345,975
102	0,017	(0,957)	13,931	113,593	1.582,421
103	(2,326)	(0,419)	5,955	111,142	661,823
104	(2,656)	(0,878)	15,908	110,231	1.753,590
105	(3,563)	(2,960)	0,729	116,528	84,920
106	(5,023)	(3,129)	18,193	125,124	2.276,417
107	(3,088)	(1,542)	5,967	126,471	754,698

108	(7,193)	(2,159)	27,862	127,397	3.549,592
109	(2,193)	(1,399)	2,057	132,431	272,402
110	(4,507)	(3,802)	14,793	128,097	1.894,951
111	(5,567)	(4,278)	1,486	128,501	190,952
112	(2,852)	(2,874)	18,062	136,276	2.461,482
113	(1,855)	(1,828)	6,668	139,186	928,129
114	(3,567)	(3,416)	30,098	139,118	4.187,146
115	(2,791)	(1,889)	12,499	147,092	1.838,448
116	(5,040)	(3,171)	28,996	136,162	3.948,075
117	(0,816)	(0,358)	3,985	130,851	521,474
118	(3,152)	(0,610)	19,684	131,880	2.595,931
119	(2,935)	(0,874)	5,169	132,923	687,028
120	(2,248)	(1,663)	19,385	136,738	2.650,713
121	(2,222)	(2,184)	10,892	146,092	1.591,243
122	(3,617)	(1,814)	18,131	140,246	2.542,799
123	(1,082)	0,940	3,267	145,394	475,065
124	(3,194)	(1,234)	28,499	145,435	4.144,726
125	(4,647)	(1,370)	1,856	145,765	270,525
126	(6,373)	(3,910)	34,409	146,431	5.038,539
127	(2,922)	(3,293)	4,029	153,192	617,237
128	(2,912)	(1,990)	21,649	161,067	3.486,885
129	(2,348)	(3,077)	4,609	153,320	706,697
130	(3,939)	(2,946)	31,101	153,618	4.777,624
131	(1,600)	(2,446)	7,121	163,205	1.162,180
132	(3,292)	0,063	18,108	168,778	3.056,274
133	(3,064)	(2,988)	6,969	171,507	1.195,219
134	(2,581)	(3,233)	27,903	173,902	4.852,444
135	(1,914)	(2,898)	11,719	171,798	2.013,222
136	(4,457)	(2,615)	31,152	181,771	5.662,452
137	(5,534)	(2,190)	6,313	181,904	1.148,386
138	(5,693)	(0,287)	34,207	191,967	6.566,595
139	(2,582)	(1,499)	12,321	195,139	2.404,284
140	(5,376)	(4,098)	33,616	186,908	6.283,131
141	0,022	(1,802)	2,881	181,924	524,102
142	(3,381)	(2,514)	23,658	175,617	4.154,763
143	(1,582)	(1,666)	0,163	169,647	27,576
144	(2,715)	(2,357)	18,449	162,776	3.003,097
145	(3,103)	(2,288)	7,058	154,359	1.089,510
146	(1,998)	(6,084)	21,123	146,088	3.085,859
147	(1,150)	(3,010)	3,588	136,323	489,156
148	(3,435)	(5,209)	27,977	147,109	4.115,601
149	(2,297)	(2,049)	2,969	141,758	420,863
150	(3,267)	(2,451)	26,446	143,113	3.784,794
151	(3,052)	(1,880)	0,411	143,230	58,930
152	(4,939)	(3,739)	20,787	138,797	2.885,159
153	(3,815)	(16,500)	2,157	138,957	299,679
154	2,311	(7,520)	18,534	141,442	2.621,485
155	0,324	(4,080)	2,225	147,372	327,854
156	(3,047)	(2,995)	21,672	139,454	3.022,311
157	(0,927)	(1,003)	8,526	135,730	1.157,169
158	(1,531)	(1,927)	20,260	137,721	2.790,264
159	(2,039)	(1,499)	6,625	138,236	915,823
160	(3,811)	(1,774)	14,879	133,863	1.991,778
161	(2,406)	(2,179)	7,683	132,457	1.017,688
162	(3,071)	(2,606)	19,763	135,342	2.674,704
163	(3,960)	(5,412)	0,316	141,570	44,791
164	(2,961)	(1,424)	18,275	136,570	2.495,781
165	(3,548)	(3,076)	6,233	134,490	838,310
166	(3,859)	(2,215)	21,057	142,022	2.990,531
167	(3,877)	(2,844)	1,031	142,489	146,891

168	(3,162)	(3,607)	18,697	134,045	2.506,212
169	(3,359)	(2,887)	0,742	136,205	101,115
170	(1,431)	(1,663)	23,660	146,066	3.455,868
171	(2,738)	(2,851)	4,319	138,727	599,229
172	(5,618)	(4,862)	28,258	139,707	3.947,776
173	(3,613)	(2,269)	9,374	147,913	1.386,596
174	(2,599)	(2,320)	18,499	153,919	2.847,330
175	(1,291)	(0,971)	3,724	159,076	592,421
176	(2,384)	(2,590)	17,176	154,132	2.647,436
177	0,042	(0,749)	1,620	148,715	240,939
178	17.478,630	618,271	797,286	140,197	111.777,288
179	6.797,148	2.024,968	848,609	137,683	116.838,638



### Data Hasil Simulasi Bucket Turbin Variasi 2

Time [s]	Force X [N]	Force Y [N]	Moment Z [Nm]	Omega [rad/s]	Daya [W]
a	b	c	d	e	f=d*e
0			-	-	-
1	6,548	3,555	2,780	0,000	0,000
2	3,818	0,966	7,278	8,513	61,951
3	2,094	(0,718)	7,699	4,094	31,521
4	(0,365)	(0,515)	2,356	1,641	3,866
5	0,602	(0,896)	6,137	7,445	45,685
6	(1,230)	(1,470)	3,264	9,954	32,494
7	(1,566)	(1,846)	5,693	18,831	107,209
8	(2,849)	(1,447)	11,378	18,846	214,433
9	(1,784)	(1,468)	6,350	11,724	74,450
10	(0,715)	(1,548)	3,381	20,799	70,325
11	0,915	(0,048)	10,023	30,700	307,705
12	(0,707)	(0,668)	3,757	36,765	138,119
13	(0,497)	(1,047)	3,165	27,130	85,878
14	(2,344)	(2,155)	12,333	16,779	206,945
15	(1,723)	(1,928)	3,925	8,977	35,236
16	0,187	(0,948)	1,206	6,344	7,654
17	0,719	(0,229)	3,308	9,369	30,991
18	(0,325)	(0,249)	10,382	20,212	209,841
19	(1,798)	(2,256)	5,394	21,707	117,090
20	(0,453)	(0,149)	2,819	16,793	47,339
21	(1,315)	(1,063)	3,783	8,356	31,609
22	(0,346)	(0,709)	4,107	14,833	60,910
23	(0,817)	0,038	0,509	9,325	4,750
24	(0,214)	0,157	1,965	19,945	39,196
25	(0,732)	(1,693)	6,079	9,334	56,742
26	(3,643)	(2,771)	16,916	9,438	159,661
27	(2,476)	(1,969)	1,359	17,569	23,884
28	(1,079)	(0,641)	7,175	13,277	95,265
29	(1,290)	(4,379)	12,094	12,856	155,474
30	(0,810)	(2,099)	6,189	14,950	92,530
31	(1,838)	(3,095)	7,319	19,332	141,486
32	(0,420)	(1,226)	3,346	26,113	87,380
33	0,328	(1,697)	2,727	28,245	77,022
34	(1,203)	(1,440)	11,644	18,264	212,661
35	(0,533)	(1,130)	3,930	25,740	101,164
36	(1,590)	(2,673)	5,794	35,081	203,246
37	0,062	(0,540)	2,883	38,097	109,847
38	(0,659)	(0,469)	1,919	43,842	84,153
39	(0,903)	(1,582)	2,359	35,969	84,849
40	(1,314)	(1,808)	8,189	37,738	309,018
41	(0,816)	(0,679)	9,948	37,962	377,635
42	(2,393)	(3,022)	11,478	36,715	421,404
43	(1,223)	(1,476)	4,002	28,889	115,616
44	(1,099)	(1,016)	4,272	32,220	137,652
45	(2,797)	(2,991)	4,947	36,519	180,665
46	(0,947)	(1,067)	4,258	43,760	186,350
47	(1,322)	(1,967)	1,798	49,533	89,071

48	(0,231)	(1,135)	6,278	40,430	253,807
49	(0,254)	(0,465)	3,433	49,403	169,612
50	(0,712)	(1,028)	3,742	51,072	191,128
51	0,179	(0,153)	2,174	57,706	125,431
52	(2,571)	(1,614)	6,366	54,389	346,245
53	(0,733)	(1,586)	4,849	58,566	284,013
54	(2,600)	(3,280)	15,128	59,004	892,623
55	(0,756)	(2,063)	1,646	67,272	110,739
56	(0,410)	(1,671)	12,474	76,681	956,487
57	(0,719)	(1,270)	5,207	75,062	390,885
58	(1,616)	(2,088)	8,045	66,113	531,909
59	(2,199)	(2,352)	4,960	61,274	303,929
60	(2,826)	(3,446)	10,155	50,815	516,024
61	(3,163)	(3,037)	7,582	60,573	459,252
62	(0,793)	(0,310)	8,355	58,731	490,724
63	0,285	(0,025)	0,082	55,174	4,510
64	(0,611)	0,089	3,468	49,703	172,363
65	(1,420)	(1,127)	4,600	47,473	218,391
66	(1,690)	(1,022)	12,378	58,033	718,343
67	(1,034)	0,050	4,295	59,061	253,657
68	(1,805)	(0,281)	3,480	63,500	220,995
69	(0,701)	0,557	1,517	68,816	104,390
70	(0,291)	(0,629)	6,980	67,794	473,179
71	(2,462)	(3,296)	3,038	66,731	202,717
72	(1,129)	(0,172)	13,447	76,209	1.024,824
73	(0,203)	0,808	2,393	82,777	198,053
74	(1,969)	(1,389)	12,507	78,688	984,143
75	(1,124)	(1,569)	2,179	82,492	179,776
76	(1,388)	(0,866)	9,581	81,201	777,993
77	(0,875)	(1,112)	2,272	71,674	162,809
78	(1,922)	(1,813)	7,455	65,647	489,418
79	(2,665)	(2,673)	0,084	72,645	6,088
80	(1,669)	(0,449)	5,881	77,884	458,045
81	(0,897)	(0,960)	0,837	70,591	59,094
82	(1,854)	(0,005)	4,041	65,876	266,198
83	(1,520)	(1,194)	1,849	74,144	137,094
84	(2,262)	(1,642)	7,381	71,056	524,484
85	(0,184)	0,299	1,152	76,094	87,685
86	(0,843)	(1,664)	9,636	78,447	755,884
87	(2,371)	(2,308)	2,432	77,739	189,069
88	(2,315)	(1,512)	4,980	80,625	401,541
89	(1,135)	(1,916)	1,202	72,282	86,889
90	(0,697)	(2,357)	16,904	82,402	1.392,935
91	(3,396)	(4,591)	11,421	81,549	931,388
92	(2,671)	(2,624)	23,810	92,140	2.193,847
93	(1,877)	(2,127)	11,651	102,546	1.194,796
94	(1,104)	(3,509)	21,541	92,696	1.996,787
95	(0,365)	(1,498)	1,844	95,747	176,548
96	(0,392)	(1,317)	8,171	93,069	760,478
97	(0,041)	(0,913)	0,080	89,510	7,152
98	0,623	(0,578)	7,935	80,541	639,095
99	(0,313)	(1,119)	2,313	74,211	171,617
100	0,939	(0,128)	6,902	68,025	469,481

101	(2,353)	(1,658)	2,643	68,698	181,573
102	(1,973)	(1,528)	8,029	75,691	607,732
103	(1,817)	(0,457)	2,487	65,497	162,900
104	(2,486)	0,213	9,233	75,916	700,921
105	(2,215)	(1,525)	1,176	68,479	80,544
106	(2,390)	(3,373)	10,976	58,764	644,974
107	(2,131)	(2,183)	8,687	58,049	504,284
108	0,610	(1,687)	7,675	55,357	424,845
109	0,087	(0,931)	0,165	59,848	9,881
110	0,272	(2,043)	7,664	68,059	521,601
111	0,283	(0,741)	1,136	64,423	73,176
112	(4,850)	(5,119)	9,620	67,500	649,377
113	(2,199)	(0,771)	7,337	66,988	491,519
114	(1,777)	(2,661)	11,816	76,403	902,745
115	(1,350)	(2,180)	0,716	69,051	49,433
116	(1,283)	(2,824)	13,455	70,576	949,589
117	(0,330)	0,347	1,455	76,940	111,924
118	(2,339)	(2,734)	8,961	72,723	651,672
119	(0,709)	(0,550)	0,307	67,679	20,769
120	(1,666)	(1,724)	9,183	57,734	530,144
121	(1,473)	(1,804)	3,100	56,250	174,362
122	(0,175)	(1,838)	7,524	58,054	436,776
123	(1,131)	(1,670)	2,547	61,282	156,068
124	(0,913)	(1,209)	7,015	59,795	419,466
125	1,318	0,337	2,776	56,291	156,284
126	(0,305)	(0,944)	8,653	65,640	567,996
127	0,997	(0,745)	5,189	56,165	291,439
128	(2,458)	(2,268)	6,466	53,363	345,021
129	(1,026)	(0,965)	0,546	47,429	25,915
130	(1,279)	(1,523)	3,063	39,609	121,309
131	(1,259)	(1,214)	0,921	36,547	33,643
132	(2,382)	(3,233)	10,288	38,064	391,611
133	0,529	(0,898)	3,994	39,662	158,394
134	(0,825)	(2,426)	3,566	46,818	166,929
135	(0,495)	(0,701)	0,301	41,434	12,464
136	(0,937)	(0,785)	5,048	35,377	178,566
137	(1,894)	(2,479)	2,956	44,263	130,849
138	(1,983)	(0,834)	5,070	39,738	201,457
139	(2,448)	(2,558)	8,341	49,942	416,551
140	(1,758)	(3,357)	18,675	39,206	732,161
141	(2,564)	(0,977)	5,763	43,516	250,799
142	(2,184)	(1,969)	12,849	33,567	431,308
143	(1,362)	(1,882)	9,133	23,425	213,945
144	0,022	0,359	3,250	17,774	57,773
145	(0,377)	(0,784)	1,325	20,147	26,688
146	(1,671)	(2,048)	12,480	30,949	386,258
147	1,952	(0,433)	4,319	33,024	142,614
148	(0,032)	(1,149)	10,148	24,047	244,018
149	0,239	(0,676)	0,614	20,251	12,440
150	(0,579)	(0,644)	8,216	15,663	128,693
151	(1,304)	(2,242)	3,866	7,615	29,441
152	(0,358)	(0,546)	3,811	1,209	4,608
153	(1,302)	(2,236)	3,236	3,016	9,759
154	(1,045)	(0,959)	4,467	2,892	12,922

155	(1,634)	(1,402)	0,505	4,779	2,413
156	(1,188)	(0,961)	4,009	1,697	6,806
157	(2,568)	(2,345)	9,838	12,126	119,292
158	(2,457)	(1,380)	8,259	10,579	87,374
159	(0,090)	(1,022)	4,667	1,431	6,678
160	(1,795)	(2,468)	12,752	2,392	30,501
161	(0,470)	(1,033)	1,809	7,543	13,642
162	(0,167)	(1,130)	3,118	12,977	40,466
163	(1,153)	(1,099)	6,660	23,811	158,573
164	(3,257)	(3,922)	8,292	33,056	274,088
165	(1,002)	(0,761)	6,900	34,427	237,563
166	0,014	(0,413)	3,539	27,563	97,555
167	0,077	(0,190)	2,875	26,105	75,044
168	(0,037)	(0,922)	1,841	19,360	35,637
169	(2,687)	(2,553)	4,408	16,780	73,958
170	(2,021)	(2,132)	9,474	7,491	70,973
171	(0,018)	(1,275)	6,408	13,312	85,303
172	(0,873)	(1,401)	5,697	3,163	18,019
173	(1,301)	(1,409)	5,455	12,200	66,546
174	(2,255)	(1,259)	4,422	18,760	82,960
175	(2,158)	(1,268)	2,362	11,485	27,126
176	(3,031)	(1,038)	7,395	11,146	82,420
177	(2,152)	(1,241)	1,851	18,730	34,669
178	(3,053)	(2,827)	7,606	18,065	137,406
179	(2,110)	(0,751)	5,107	10,895	55,642
180	0,384	(0,039)	5,035	15,282	76,947
181	(0,870)	(0,688)	7,300	15,772	115,135
182	(2,552)	(1,457)	5,348	11,563	61,844
183	(1,403)	(1,237)	3,676	5,464	20,087
184	(1,046)	(0,975)	6,829	10,306	70,381
185	(1,153)	(0,702)	4,693	0,159	0,747
186	0,111	(1,089)	4,034	7,966	32,135
187	(2,561)	(2,107)	9,442	18,756	177,091
188	0,108	(1,371)	5,463	26,787	146,330
189	0,295	(1,099)	3,557	18,853	67,062
190	(0,274)	(0,610)	11,951	18,633	222,680
191	(1,950)	(2,330)	11,197	28,853	323,058
192	(4,711)	(5,695)	12,475	30,481	380,244
193	(3,433)	(2,284)	10,476	20,301	212,680
194	(2,540)	(5,246)	6,655	17,931	119,330
195	0,162	(1,121)	3,226	12,824	41,366
196	(0,724)	(1,711)	4,439	22,027	97,772
197	(1,525)	(0,353)	2,174	23,144	50,326
198	0,148	0,822	4,928	21,711	106,996
199	(1,067)	(1,593)	14,420	21,739	313,460
200	(0,444)	0,115	2,451	27,528	67,474
201	(0,724)	(0,849)	4,819	24,129	116,275
202	(0,540)	(0,368)	1,036	18,716	19,396
203	(0,521)	(0,647)	3,731	20,915	78,037
204	(1,052)	(1,480)	4,350	29,592	128,719
205	(0,521)	(1,288)	5,392	38,555	207,892
206	(0,675)	(1,076)	6,777	40,124	271,930
207	(1,999)	(2,023)	9,632	40,542	390,501
208	1,051	(0,108)	9,841	39,424	387,966
209	(1,349)	(2,340)	3,558	41,905	149,083

210	(0,212)	(0,802)	1,176	47,280	55,586
211	(0,522)	(0,361)	0,053	54,021	2,872
212	(2,087)	(2,725)	6,270	50,725	318,044
213	(0,856)	(0,309)	2,923	55,443	162,048
214	(1,047)	(1,290)	5,330	46,619	248,480
215	(0,728)	(1,669)	0,102	43,756	4,442
216	(1,801)	(2,158)	10,749	48,122	517,257
217	(1,017)	(2,175)	0,479	50,208	24,025
218	(0,878)	(0,780)	4,578	48,555	222,279
219	(1,282)	(2,630)	3,231	50,805	164,167
220	(0,583)	(1,055)	5,554	55,494	308,207
221	(1,550)	(1,769)	2,010	58,214	117,037
222	(2,505)	(2,437)	12,250	48,835	598,242
223	(3,717)	(1,697)	11,407	38,235	436,136
224	(2,584)	(0,768)	1,152	41,240	47,523
225	(3,056)	(3,406)	5,777	40,620	234,676
226	(0,241)	(0,292)	9,729	46,670	454,079
227	0,336	(0,160)	5,068	44,216	224,090
228	0,794	0,523	5,482	40,685	223,023
229	(1,083)	(0,860)	0,158	35,023	5,538
230	(1,580)	(2,211)	5,307	35,484	188,314
231	(1,641)	(1,674)	8,074	45,388	366,447
232	(4,118)	(4,035)	10,610	43,851	465,264
233	(0,841)	(2,374)	5,420	35,061	190,030
234	(0,776)	(2,845)	15,320	24,364	373,268
235	(0,499)	(1,715)	7,826	17,442	136,491
236	0,734	(1,171)	4,427	20,194	89,391
237	(0,779)	(1,000)	0,419	17,322	7,254
238	(1,006)	(0,535)	6,026	13,810	83,217
239	(2,540)	(1,555)	12,502	3,358	41,980
240	(2,489)	(3,622)	11,678	5,015	58,561
241	(2,836)	(3,483)	10,921	3,919	42,802
242	(0,764)	(1,988)	12,304	13,690	168,446
243	(0,618)	(2,289)	11,286	14,023	158,256
244	(0,154)	(1,962)	6,629	22,253	147,508
245	(0,004)	(1,923)	11,176	32,602	364,354
246	(1,298)	(1,470)	13,340	43,092	574,855
247	(1,856)	(1,949)	13,618	53,679	730,993
248	(0,462)	(0,380)	4,194	59,091	247,840
249	(2,396)	(3,476)	1,779	60,555	107,755
250	(0,351)	(1,490)	5,226	51,365	268,445
251	(0,631)	(1,421)	0,314	56,894	17,872
252	(1,739)	(0,720)	10,224	56,352	576,164
253	(1,541)	(2,456)	4,811	62,724	301,781
254	(1,795)	(1,394)	7,370	64,852	477,980
255	(0,389)	(0,975)	0,209	59,256	12,356
256	0,386	(1,098)	7,412	49,025	363,376
257	(0,842)	(2,036)	11,204	59,839	670,466
258	1,113	0,348	6,900	56,772	391,749
259	0,383	(1,442)	1,411	63,771	89,991
260	(0,649)	(0,805)	6,476	62,692	405,991
261	(2,834)	(1,439)	2,040	69,968	142,708
262	(1,888)	(0,745)	4,628	68,361	316,408
263	(0,233)	(0,736)	0,175	69,778	12,212



264	(0,122)	(0,885)	8,833	68,499	605,017
265	(0,690)	(1,748)	6,249	66,520	415,686
266	(1,176)	0,902	2,869	60,915	174,763
267	(1,976)	(2,429)	3,569	53,812	192,029
268	(2,178)	(2,433)	5,465	56,688	309,826
269	(0,752)	(1,770)	1,454	57,782	84,006
270	0,499	0,314	4,365	51,242	223,670
271	(0,540)	(2,559)	2,131	53,383	113,780
272	(0,312)	(0,806)	4,635	56,937	263,902
273	(1,340)	(0,908)	8,101	50,590	409,810
274	(1,401)	(2,493)	14,191	40,625	576,494
275	(0,013)	(2,020)	3,202	49,334	157,980
276	(0,015)	(2,131)	13,167	49,322	649,430
277	(0,750)	(0,265)	0,187	44,206	8,276
278	(1,360)	(0,681)	5,889	45,113	265,669
279	(0,410)	(0,802)	1,761	38,598	67,988
280	(1,904)	(1,777)	4,580	46,486	212,908
281	(1,213)	(2,492)	0,031	38,037	1,195
282	1,044	(0,463)	4,640	34,843	161,660
283	(0,919)	(1,134)	7,043	44,374	312,509
284	(0,506)	(1,006)	3,071	50,066	153,745
285	0,249	(1,056)	2,795	46,008	128,579
286	0,247	(1,458)	7,135	44,541	317,799
287	(2,105)	(1,546)	1,587	50,969	80,906
288	0,274	(0,004)	8,548	52,535	449,061
289	(2,942)	(2,614)	5,854	43,606	255,260
290	(3,685)	(2,942)	8,254	42,507	350,847
291	(0,949)	(0,156)	0,327	44,095	14,431
292	(0,932)	(0,551)	1,758	38,139	67,037
293	(1,533)	(1,521)	5,281	33,351	176,123
294	(0,835)	(1,797)	5,928	31,904	189,121
295	(2,691)	(2,947)	3,039	24,119	73,288
296	(4,013)	(2,284)	9,525	13,532	128,890
297	(2,304)	(0,059)	7,895	3,237	25,556
298	0,243	(0,909)	2,009	8,527	17,131
299	(1,815)	(1,140)	4,162	0,098	0,408
300	(1,092)	(0,722)	1,375	2,709	3,725
<b>Rata-rata</b>	<b>(1,096)</b>	<b>(1,410)</b>	<b>5,859</b>	<b>40,822</b>	<b>242,970</b>

### Data Hasil Simulasi Bucket Turbin Variasi 3

Time [s]	Force X [N]	Force Y [N]	Moment Z [Nm]	Omega [rad/s]	Daya [W]
a	b	c	d	e	f=d*e
1	6,298	3,101	2,403	-	-
2	0,527	(2,300)	8,389	8,005	67,149
3	0,207	(1,695)	9,640	1,760	16,968
4	(4,297)	(4,977)	15,955	1,476	23,557
5	(2,747)	(2,641)	5,448	0,608	3,311
6	(0,974)	(0,128)	1,847	7,393	13,656
7	(3,209)	(2,427)	3,324	10,499	34,901
8	(1,133)	0,290	3,100	6,725	20,850
9	(2,675)	(2,317)	7,121	14,066	100,164
10	(0,594)	1,369	0,670	19,977	13,378
11	(2,063)	(2,130)	4,630	17,359	80,374
12	(0,935)	(0,869)	1,212	21,387	25,928
13	(3,879)	(4,313)	7,670	22,437	172,099
14	(0,749)	0,190	1,504	28,242	42,471
15	(2,097)	(2,425)	4,966	25,580	127,029
16	(1,380)	(1,417)	2,135	17,062	36,436
17	(0,378)	0,255	0,051	22,569	1,161
18	(1,815)	(1,001)	3,772	26,904	101,487
19	(1,907)	(1,418)	3,346	23,645	79,124
20	(1,314)	(1,026)	0,083	21,160	1,761
21	(4,710)	(3,466)	9,260	31,255	289,416
22	(4,124)	(2,379)	14,684	41,497	609,348
23	(0,057)	0,351	4,667	47,511	221,735
24	(2,042)	(0,912)	0,355	38,036	13,506
25	(1,218)	0,248	5,903	29,615	174,834
26	(2,995)	(1,882)	4,501	33,419	150,414
27	(0,629)	0,064	3,591	37,401	134,290
28	(2,435)	(0,195)	3,285	31,738	104,275
29	(1,145)	(2,900)	4,394	29,738	130,680
30	(2,051)	(0,553)	1,342	38,030	51,050
31	(3,490)	(1,551)	10,472	48,336	506,157
32	0,431	0,054	4,434	54,296	240,726
33	(3,731)	(3,107)	15,876	64,816	1.029,029
34	(2,491)	(1,508)	0,535	66,113	35,403
35	(2,339)	(2,063)	4,737	69,077	327,197
36	(1,482)	(1,035)	1,833	75,050	137,604
37	(2,832)	(2,242)	7,111	71,823	510,736
38	(1,564)	(1,649)	1,232	63,441	78,160
39	(2,715)	(2,642)	10,653	64,639	688,622
40	(1,601)	(0,982)	3,572	72,213	257,975
41	(3,656)	(2,840)	8,758	72,959	638,999
42	(0,399)	(0,972)	1,662	70,880	117,829
43	(1,193)	(0,915)	4,250	74,242	315,553
44	(1,581)	0,314	0,002	82,039	0,131
45	(3,236)	(3,463)	13,846	72,555	1.004,584
46	(0,375)	1,249	3,722	79,039	294,194
47	(0,628)	(0,702)	5,275	77,093	406,679
48	(0,540)	(0,864)	1,239	75,741	93,872
49	(3,692)	(3,597)	6,270	71,318	447,151
50	(2,820)	(1,879)	0,242	80,260	19,414
51	(2,830)	(2,095)	10,650	89,514	953,323
52	(1,024)	(0,928)	2,600	92,814	241,341

53	(1,620)	(1,804)	9,337	91,320	852,686
54	(2,428)	(2,115)	0,732	99,875	73,141
55	(0,902)	(0,565)	6,008	103,505	621,811
56	(1,056)	0,082	2,632	103,916	273,544
57	(0,458)	(0,495)	9,664	95,788	925,677
58	(2,908)	(1,240)	1,036	96,388	99,859
59	(0,454)	0,134	5,749	100,015	575,007
60	(1,770)	(1,396)	1,526	91,341	139,355
61	(2,598)	(1,803)	4,337	84,443	366,265
62	(3,063)	(2,465)	2,237	93,679	209,526
63	(1,967)	(1,114)	8,732	89,176	778,674
64	0,001	(0,375)	0,812	80,120	65,072
65	(1,053)	(1,078)	7,249	83,353	604,216
66	(2,705)	(2,320)	0,662	85,747	56,739
67	(0,396)	(0,263)	7,490	77,756	582,391
68	(1,310)	(1,820)	1,935	75,961	146,972
69	(0,825)	(1,299)	9,216	74,293	684,695
70	1,582	(0,847)	0,353	76,526	27,028
71	(1,881)	(2,041)	5,693	81,453	463,726
72	(0,523)	0,554	1,787	86,347	154,326
73	(0,607)	(1,107)	5,586	78,589	439,006
74	(2,090)	(1,404)	2,143	72,537	155,431
75	(0,799)	(1,915)	8,349	70,477	588,438
76	(2,543)	(3,142)	9,419	69,941	658,792
77	(1,670)	(1,707)	12,607	60,729	765,615
78	(1,733)	(1,831)	1,204	54,822	65,986
79	(1,395)	(0,261)	3,726	46,841	174,510
80	(2,009)	(1,342)	0,550	53,955	29,700
81	(1,970)	(1,831)	6,518	58,370	380,475
82	(1,989)	(1,884)	0,984	49,552	48,756
83	(1,453)	(1,551)	1,223	52,028	63,643
84	(1,923)	(1,384)	0,061	60,796	3,688
85	(2,074)	(1,511)	8,025	61,495	493,471
86	(3,698)	(4,679)	2,703	70,907	191,693
87	(1,249)	(1,477)	4,645	62,118	288,544
88	(1,126)	(0,455)	1,173	67,830	79,533
89	(1,659)	(1,263)	4,695	60,456	283,850
90	(2,643)	(1,955)	1,764	64,560	113,877
91	(1,372)	(0,444)	4,696	61,589	289,217
92	(1,254)	(1,236)	0,034	65,400	2,196
93	(1,545)	(2,425)	8,301	66,734	553,969
94	(3,325)	(3,751)	3,853	66,276	255,373
95	(0,806)	(1,466)	6,726	61,999	417,012
96	0,709	(0,243)	3,202	57,616	184,471
97	(1,448)	(1,452)	10,135	56,980	577,497
98	(0,427)	0,228	0,565	50,724	28,680
99	(1,056)	(1,091)	4,381	40,203	176,137
100	(2,094)	(2,048)	5,085	39,556	201,153
101	(1,028)	0,421	1,852	34,388	63,677
102	(1,024)	(1,188)	3,891	30,906	120,265
103	(2,575)	(0,681)	3,686	34,344	126,578
104	(2,999)	(3,673)	4,605	33,081	152,330
105	(2,281)	(3,270)	3,567	23,685	84,488

106	(1,819)	(0,974)	4,510	24,628	111,071
107	(0,153)	(2,216)	4,632	32,848	152,137
108	(0,177)	0,004	2,903	39,788	115,488
109	(2,421)	(3,095)	11,132	40,591	451,852
110	(1,338)	(0,604)	2,941	48,341	142,191
111	(1,417)	(0,541)	2,616	50,947	133,281
112	(0,499)	(0,971)	3,554	53,443	189,922
113	(0,758)	(1,940)	11,999	52,575	630,836
114	(2,163)	(2,601)	11,510	62,508	719,492
115	(3,196)	(1,831)	8,276	70,137	580,465
116	(3,992)	(3,032)	6,742	80,144	540,344
117	(1,582)	(2,038)	16,791	80,781	1.356,363
118	(2,524)	(1,793)	4,859	81,977	398,354
119	(0,783)	(1,184)	4,905	77,955	382,332
120	(1,727)	(1,520)	1,006	81,133	81,642
121	(1,383)	(1,748)	7,435	89,031	661,991
122	(1,607)	(0,543)	2,504	86,747	217,223
123	(3,530)	(1,074)	16,278	86,679	1.410,934
124	(2,325)	(2,039)	8,456	85,763	725,208
125	(1,477)	(0,555)	12,573	84,993	1.068,655
126	(1,017)	(2,170)	0,928	90,522	83,966
127	(1,994)	(1,328)	7,629	81,635	622,773
128	(0,489)	(0,440)	1,275	88,347	112,685
129	(1,350)	(1,063)	8,798	80,344	706,849
130	(1,468)	(1,611)	0,484	71,277	34,525
131	(0,987)	(0,247)	6,634	69,790	462,987
132	(2,436)	(0,861)	0,448	77,259	34,643
133	(0,642)	(0,370)	4,702	70,895	333,350
134	(1,665)	(2,087)	1,953	69,840	136,377
135	(1,709)	(0,616)	5,984	76,752	459,295
136	(3,370)	(2,997)	4,287	76,250	326,862
137	(2,184)	(2,061)	4,231	79,392	335,943
138	(2,077)	(2,166)	2,459	75,546	185,805
139	(3,013)	(0,193)	6,347	70,926	450,187
140	(3,249)	(2,486)	3,893	63,880	248,707
141	(1,279)	(1,516)	5,854	70,768	414,260
142	(1,373)	(0,590)	1,858	67,169	124,812
143	(1,881)	(2,305)	6,545	75,902	496,742
144	(0,991)	(1,080)	1,221	78,652	96,028
145	(0,586)	(1,461)	5,816	72,374	420,936
146	(1,413)	(0,234)	2,502	69,499	173,910
147	(2,010)	(2,719)	5,948	67,127	399,255
148	(1,111)	(1,732)	0,796	70,917	56,419
149	(0,524)	(0,403)	6,200	75,380	467,376
150	(1,095)	(1,507)	2,558	74,488	190,545
151	(1,914)	(2,370)	8,718	65,098	567,521
152	(1,640)	(2,144)	2,205	56,838	125,337
153	(1,069)	(2,305)	3,769	54,443	205,214
154	(0,550)	(1,210)	1,590	49,834	79,213
155	(2,134)	(1,709)	6,159	58,885	362,667
156	(1,596)	(2,083)	0,341	51,301	17,484
157	(2,290)	(0,804)	4,185	53,618	224,369
158	(4,246)	(2,673)	2,935	45,833	134,501
159	(5,247)	(4,429)	13,554	35,929	486,975
160	(1,957)	(0,284)	3,174	40,084	127,222

161	(2,152)	(2,007)	9,162	30,769	281,910
162	(2,889)	(1,188)	8,191	31,412	257,310
163	(0,392)	(0,791)	2,435	37,357	90,964
164	(3,568)	(3,840)	3,259	40,225	131,080
165	(1,972)	(0,956)	4,971	46,284	230,062
166	(1,520)	(1,495)	0,268	44,409	11,917
167	(1,609)	(2,548)	7,419	45,403	336,859
168	(1,302)	(1,541)	0,417	41,699	17,403
169	(0,697)	(0,490)	2,550	40,453	103,172
170	(3,144)	(3,036)	11,253	29,935	336,873
171	(3,410)	(3,196)	14,116	29,562	417,294
172	(0,299)	(0,261)	1,908	33,840	64,558
173	(1,898)	(1,026)	2,737	39,359	107,724
174	(3,405)	(1,971)	4,683	39,395	184,477
175	(1,321)	(1,559)	5,473	41,365	226,396
176	(1,750)	(1,572)	3,855	34,650	133,578
177	(1,875)	(1,374)	1,309	39,754	52,041
178	(1,794)	(0,537)	1,796	40,730	73,139
179	(1,937)	0,489	0,414	33,308	13,788
180	(2,276)	(1,379)	5,736	37,336	214,151
181	(3,614)	(1,343)	14,487	47,655	690,392
182	(0,858)	0,049	1,623	40,797	66,207
183	(3,281)	(3,114)	8,214	32,113	263,789
184	(3,886)	(1,546)	10,100	21,747	219,645
185	(3,538)	(2,509)	14,092	22,727	320,261
186	(1,005)	(1,059)	4,124	15,660	64,577
187	(1,516)	(0,922)	1,659	8,048	13,349
188	(1,675)	(0,938)	6,845	11,215	76,768
189	(3,966)	(4,549)	6,316	2,651	16,743
190	(0,298)	(0,314)	0,281	1,002	0,282
191	(1,646)	(2,344)	5,144	0,123	0,631
192	(1,107)	(1,409)	4,829	3,149	15,205
193	(1,658)	(2,203)	3,967	8,972	35,597
194	(0,915)	(0,192)	2,076	3,920	8,137
195	(1,902)	(0,499)	1,326	4,886	6,478
196	(1,351)	(1,173)	2,680	6,449	17,285
197	(0,307)	0,156	0,099	1,302	0,129
198	(1,689)	(1,914)	4,317	7,298	31,509
199	(1,139)	(0,217)	1,846	0,252	0,465
200	(3,467)	(0,042)	7,831	0,315	2,469
201	(3,920)	(0,666)	14,434	10,821	156,193
202	(2,282)	(1,312)	9,966	20,494	204,240
203	(2,027)	(4,019)	7,137	18,585	132,648
204	(0,978)	(4,045)	10,475	8,828	92,475
205	(2,264)	(3,272)	7,731	7,644	59,096
206	0,425	(1,882)	6,711	16,097	108,031
207	(1,099)	(0,317)	0,832	10,910	9,078
208	(1,422)	(1,043)	1,495	11,697	17,492
209	(5,597)	(3,395)	10,707	11,607	124,285
210	(4,060)	(0,181)	11,068	11,033	122,110
211	(3,418)	(2,051)	3,712	19,303	71,653
212	(1,890)	(2,210)	6,260	15,850	99,221
213	(0,950)	(1,833)	2,043	17,364	35,474
214	(2,529)	(2,256)	11,006	18,265	201,022
215	(1,360)	(0,643)	0,308	25,191	7,767

216	(2,117)	(1,662)	9,718	21,504	208,981
217	(2,636)	(2,656)	7,356	11,887	87,441
218	(3,736)	(2,041)	3,805	15,623	59,440
219	(0,699)	(1,056)	3,387	21,552	73,005
220	(3,092)	(1,202)	3,171	17,778	56,372
221	(3,385)	(0,894)	2,241	25,161	56,387
222	(0,899)	0,423	1,433	20,098	28,792
223	(0,694)	(0,417)	0,236	13,233	3,123
224	(3,757)	(2,106)	6,805	23,399	159,240
225	(1,940)	(1,103)	3,114	21,148	65,859
226	(2,712)	(1,965)	6,207	30,192	187,394
227	1,085	(0,446)	4,733	21,948	103,887
228	(0,617)	(1,081)	3,862	25,992	100,388
229	(1,908)	(1,639)	2,782	23,731	66,020
230	0,509	0,675	6,031	17,423	105,071
231	(1,087)	(0,461)	2,496	11,926	29,764
232	(1,527)	(0,935)	4,583	1,865	8,549
233	(2,711)	(2,809)	6,762	0,616	4,169
234	(0,311)	0,951	0,352	3,785	1,332
235	(2,774)	(2,291)	6,691	3,529	23,611
236	(0,230)	(1,289)	3,399	3,512	11,935
237	(0,695)	(1,587)	1,492	8,998	13,422
238	(1,190)	(1,293)	2,086	16,903	35,254
239	(2,044)	(2,422)	9,795	16,107	157,764
240	(1,680)	(0,356)	0,413	7,607	3,140
241	(0,875)	(0,603)	0,766	5,297	4,057
242	(0,811)	(0,616)	2,567	4,123	10,582
243	(0,694)	(1,005)	5,652	10,974	62,030
244	(0,825)	0,255	0,871	16,401	14,278
245	(0,949)	(1,038)	2,009	9,861	19,810
246	(0,599)	(0,006)	0,200	15,026	3,008
247	(1,154)	(1,170)	3,114	19,805	61,681
248	(0,597)	(0,651)	2,996	12,329	36,935
249	(1,004)	(2,327)	4,465	9,510	42,464
250	(1,414)	(0,739)	3,705	15,341	56,841
251	(0,694)	(0,280)	1,836	20,729	38,059
252	(2,585)	(2,490)	4,792	18,821	90,184
253	(0,874)	0,532	0,155	22,389	3,463
254	(2,358)	(1,625)	5,442	15,180	82,619
255	(1,376)	(0,748)	2,077	8,367	17,377
256	(1,573)	(1,231)	3,377	16,675	56,309
257	(2,860)	(2,237)	7,294	7,350	53,609
258	(3,999)	(3,287)	14,074	7,097	99,886
259	(1,709)	(1,981)	9,647	6,112	58,958
260	(0,802)	(0,129)	3,044	9,611	29,256
261	(1,655)	0,011	4,243	11,404	48,386
262	(0,391)	(1,100)	4,214	12,869	54,231
263	(2,877)	(2,304)	5,942	22,248	132,202
264	(3,476)	(1,937)	14,480	32,675	473,136
265	(3,342)	(1,609)	3,287	25,873	85,041
266	(1,824)	(0,267)	1,546	33,300	51,475
267	(1,130)	(1,729)	3,267	24,186	79,023
268	(2,938)	(2,395)	4,358	23,737	103,452

269	(3,983)	(4,403)	6,231	14,148	88,152
270	(0,899)	(0,316)	0,771	21,119	16,281
271	(2,445)	(2,916)	4,900	18,845	92,341
272	(1,273)	(2,732)	3,221	21,138	68,081
273	(0,417)	(0,451)	2,174	15,099	32,824
274	(1,128)	(1,710)	2,638	23,965	63,208
275	(3,348)	(1,938)	5,527	23,294	128,752
276	(1,713)	(1,944)	3,538	24,996	88,436
277	(1,312)	(0,861)	5,584	29,189	162,996
278	(3,359)	(1,014)	5,942	22,289	132,432
279	(4,291)	(2,778)	8,130	23,702	192,701
280	(3,514)	(2,352)	8,142	23,170	188,659
281	(0,499)	0,984	1,298	28,104	36,487
282	(0,984)	(0,170)	2,490	24,434	60,840
283	(0,196)	(0,256)	4,413	26,233	115,761
284	(0,717)	(0,868)	4,523	17,853	80,745
285	(2,947)	(3,712)	5,145	15,669	80,625
286	(3,376)	(1,708)	4,961	16,533	82,014
287	(1,108)	(1,245)	4,527	13,091	59,268
288	(0,745)	(0,241)	0,010	18,516	0,187
289	(1,099)	(0,906)	3,652	8,561	31,265
290	(0,690)	(0,245)	1,495	3,636	5,435
291	(1,613)	(1,071)	2,284	0,316	0,723
292	(0,842)	(0,257)	1,938	8,824	17,101
293	(0,558)	0,040	3,621	5,239	18,971
294	(1,420)	(1,612)	0,187	2,660	0,496
295	(0,409)	(0,247)	4,232	6,997	29,607
296	(2,043)	(2,158)	8,373	6,477	54,229
297	(1,873)	(1,906)	3,597	14,826	53,330
298	(3,118)	(2,562)	9,051	25,041	226,637
299	(2,214)	(1,512)	0,392	17,212	6,749
300	(1,583)	(0,190)	0,585	14,244	8,331
<b>Rata-rata</b>	<b>(1,742)</b>	<b>(1,406)</b>	<b>4,735</b>	<b>40,404</b>	<b>196,794</b>