

**KAJIAN EKSPERIMENTAL PENGARUH JARI-JARI KELENGKUNGAN
SUDU TERHADAP UNJUK KERJA TURBIN *VORTEX* (PUSARAN AIR)**

(Skripsi)

Oleh

**M FADHLY EFFENDI
NPM 2115021090**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2026

**KAJIAN EKSPERIMENTAL PENGARUH JARI-JARI KELENGKUNGAN
SUDU TERHADAP UNJUK KERJA TURBIN *VORTEX* (PUSARAN AIR)**

Oleh

M FADHLY EFFENDI

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2026

ABSTRAK

KAJIAN EKSPERIMENTAL PENGARUH JARI-JARI KELENGKUNGAN SUDU TERHADAP UNJUK KERJA TURBIN *VORTEX* (PUSARAN AIR)

Oleh

M FADHLY EFFENDI

Pemanfaatan energi air dengan *head* rendah sebagai sumber energi terbarukan memiliki potensi untuk dikembangkan di Indonesia terutama di daerah perbukitan dan pedesaan. Salah satu teknologi yang sesuai untuk kondisi tersebut adalah turbin *vortex*, yang mampu bekerja pada *head* rendah dengan memanfaatkan pusaran air untuk menghasilkan energi mekanik. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi jari-jari kelengkungan sudu terhadap unjuk kerja turbin *vortex*. Kajian dilakukan secara eksperimental di Laboratorium Mekanika Fluida, Program Studi Teknik Mesin, Universitas Lampung. Model turbin *vortex* skala laboratorium dirancang dengan parameter turbin meliputi tinggi (H) sudu turbin 288 mm, diameter bawah (D1) 200 mm, diameter atas (D2) 380 mm mengikuti bentuk *conical basin*, jumlah sudu (n) 6 sudu turbin, serta sudut kemiringan sudu (α) sebesar 18° . Variasi yang diuji adalah jari-jari kelengkungan sudu (R) sebesar 85 mm, 110 mm, dan 145 mm. Pengujian dilakukan pada wadah berbentuk kerucut dengan diameter saluran masuk 600 mm, diameter saluran keluar 100 mm, dan tinggi 1050 mm, menggunakan tiga variasi debit aliran air yaitu 8,84 L/s, 10,54 L/s, dan 10,80 L/s. Parameter yang diukur meliputi putaran turbin (rpm), torsi (Nm), daya poros turbin (W), dan efisiensi (%). Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi jari-jari kelengkungan sudu berpengaruh signifikan terhadap daya dan efisiensi turbin *vortex*. Jari-jari kelengkungan sudu 110 mm menghasilkan performa paling optimal dengan daya poros maksimum sebesar 27,72 W dan efisiensi tertinggi 33,12% pada debit 10,80 L/s. Sementara itu, jari-jari kelengkungan 85 mm dan 145 mm menghasilkan efisiensi masing-masing sebesar 23,84% dan 30,70%. Peningkatan jari-jari kelengkungan sudu meningkatkan efisiensi hingga mencapai titik optimum, kemudian menurun seiring bertambahnya nilai kelengkungan.

Kata kunci: Turbin *vortex*, jari-jari kelengkungan sudu, efisiensi, daya poros, energi air.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF BLADE CURVATURE RADIUS ON THE PERFORMANCE OF VORTEX TURBINE (WATER VORTEX)

By

M FADHLY EFFENDI

The use of low-head water energy as a renewable energy source has the potential to be developed in Indonesia, especially in hilly and rural areas. One technology that is suitable for these conditions is the vortex turbine, which is capable of operating at low heads by utilizing water vortices to generate mechanical energy. This study aims to examine the effect of variations in blade curvature radius on the performance of vortex turbines. The study was conducted experimentally at the Fluid Mechanics Laboratory, Mechanical Engineering Study Program, University of Lampung. A laboratory-scale vortex turbine model was designed with turbine parameters including blade height (H) of 288 mm, lower diameter (D1) of 200 mm, upper diameter (D2) of 380 mm following a conical basin shape, number of blades (n) of 6 turbine blades, and blade angle (α) of 18° . The variations tested were the blade curvature radius (R) of 85 mm, 110 mm, and 145 mm. The tests were conducted in a conical container with an inlet diameter of 600 mm, an outlet diameter of 100 mm, and a height of 1050 mm, using three variations of water flow rates, namely 8,84 L/s, 10,54 L/s, and 10,80 L/s. The parameters measured included turbine rotation (rpm), torque (Nm), turbine shaft power (W), and efficiency (%). The test results show that variations in the blade curvature radius have a significant effect on the power and efficiency of the vortex turbine. A blade curvature radius of 110 mm produces the most optimal performance with a maximum shaft power of 27,72 W and the highest efficiency of 33,12% at a flow rate of 10,84 L/s. Meanwhile, curvature radii of 85 mm and 145 mm produced efficiencies of 23,84% and 30,70%, respectively. Increasing the blade curvature radius increased efficiency until it reached an optimum point, then decreased as the curvature value increased.

Key words: Vortex turbine, blade curvature radius, efficiency, shaft power, water energy.

Judul Skripsi : KAJIAN EKSPERIMENTAL PENGARUH JARI-JARI
KELENGKUNGAN SUDU TERHADAP UNJUK
KERJA TURBIN *VORTEX* (PUSARAN AIR)

Nama Mahasiswa : M Fadhly Effendi

Nomor Pokok Mahasiswa: 2115021090

Program Studi : S1 Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I



Jofri Boike Sinaga, S.T., M.T.
NIP. 197101271998031004

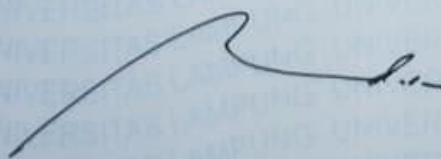
Pembimbing II



Agus Sugiri, S.T., M.Eng.
NIP. 197008041998031003

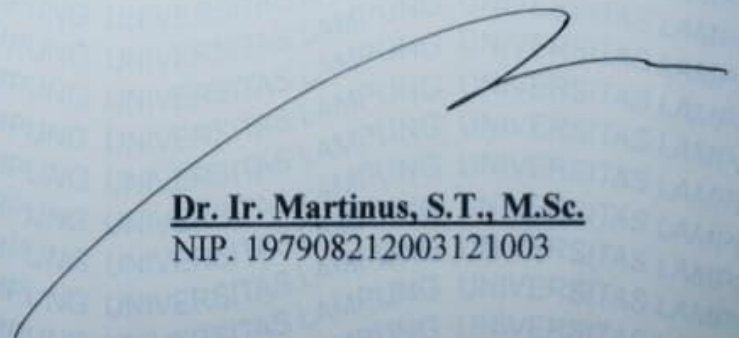
MENGETAHUI

Ketua Jurusan Teknik Mesin



Ahmad su'udi, S.T., M.T.
NIP. 197408162000121001

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin



Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.
NIP. 197908212003121003

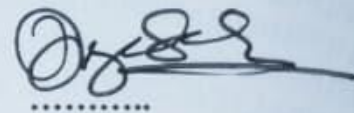
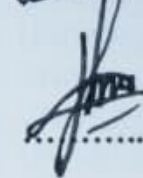
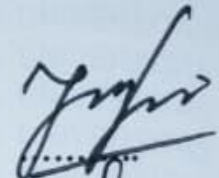
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua Penguji : **Jorfri Boike Sinaga, S.T., M.T.**

Anggota Penguji : **Agus Sugiri, S.T., M.Eng.**

Penguji Utama : **M. Dyan Susila ES, S.T., M.Eng.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. H. Ahmad Herison, S.T., M.T.
NIP. 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 19 Januari 2026

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:


Nama : M Fadhly Effendi

NPM : 2115021090

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujur-jujurnya, bahwa skripsi saya yang berjudul : **“Kajian Eksperimental Pengaruh Jari-Jari Kelengkungan Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin *Vortex* (Pusaran Air)”**.

Tugas akhir ini merupakan karya saya sendiri, baik gagasan, data, maupun pembahasannya. Karya ilmiah ini adalah hasil dari pengetahuan dan informasi yang saya dapatkan, karya ilmiah ini tidak berisi material yang telah dipublikasikan sebelumnya atau dengan kata lain bukan hasil plagiat karya seseorang. Dengan demikian karya ini saya buat dan dapat di pertanggung jawabkan apabila di kemudian hari terdapat kecurangan dalam karya ini.

Bandar Lampung, 19 Januari 2026

taan
A 2000 Indonesian Rupiah banknote is shown with a signature written over it. The signature is in black ink and appears to be 'M Fadhly Effendi'. The banknote features the Garuda Pancasila emblem and the text 'REPUBLIK INDONESIA' and 'METERAL TEMPERAN'.

M Fadhly Effendi
NPM. 2115021090

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung pada tanggal 30 Juni 2001, sebagai anak keempat dari empat bersaudara, dari pasangan Bapak Husni Efendi, S.H. dan Ibu Linda Ernani. Penulis memulai Pendidikan Taman Kanak-Kanak (TK) di TK Bangsa Ratu Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2007, Sekolah Dasar (SD) di SDN 1 Sukabumi Indah Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2013, penulis melanjutkan Sekolah Menengah Pertama di SMPN 5 Bandar Lampung dan lulus pada tahun 2016. Kemudian penulis melanjutkan pendidikannya di SMKN 5 Bandar Lampung Jurusan Otomotif (TKR) dan lulus pada tahun 2019. Penulis terdaftar sebagai mahasiswa Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung pada tahun 2021 melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai anggota Divisi Dana Usaha. Penulis melaksanakan Kerja Praktek (KP) di PT. Bukit Asam, Tbk Tanjung Enim, Sumatera Selatan pada 06 Januari 2025 – 16 Februari 2025 dan telah menyelesaikan laporan kerja praktek yang berjudul **“Perhitungan Efisiensi Pengoperasian Pompa Sentrifugal Tipe Sulzer WPP53-200 di PT. Bukit Asam, Tbk”**. Tahun 2024 penulis bergabung di laboratorium Mekanika Fluida dan membuat Tugas Akhir yang berjudul **“Kajian Eksperimental Pengaruh Jari-Jari Kelengkungan Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin *Vortex* (Pusaran Air)”** dibawah bimbingan Bapak Jorfri Boike Sinaga, S.T., M.T. dan Bapak Agus Sugiri, S.T., M.Eng.

PERSEMBAHAN

Alhamdulillahirobbil'alamin, dengan mengucapkan rasa syukur atas rahmat dan ridho Allah SWT atas segala limpahan rahmat, rizki dan karunia yang Engkau berikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Kupersembahkan karya ini untuk orang-orang yang sangat berharga dalam hidupku:

Ayah dan Ibu Tercinta

Senantiasa berdoa dan memotivasi putranya hingga kuat melewati semuanya sampai ke jenjang ini, dengan keikhlasan dan segala daya upaya yang beliau lakukan tanpa kenal lelah.

Bapak dan Ibu Dosen

Terima kasih Bapak dan Ibu Dosen yang selalu memberikan ilmu yang bermanfaat dan membimbingku dengan penuh kesabaran dan keikhlasannya.

Para Sahabat

Selalu membantu dan ikut mengisi kehidupanku di dunia perkuliahan ini.

Serta Almamaterku tercinta, Universitas Lampung.

MOTTO

“Dan aku menyerahkan urusanku kepada Allah”

[QS. Al-Ghafir, 40 : 44]

“Dan bersabarlah kamu, sesungguhnya janji Allah adalah benar”

[QS. Ar-Rum, 30 : 60]

“Allah tidak membebani seseorang melainkan dengan kesanggupannya”

[QS. Al-Baqarah, 2 : 286]

“Setetes keringat orang tuaku yang keluar, ada seribu langkahku
untuk terus maju”

“Jangan takut nak, ayah dan ibu selalu berdoa yang terbaik untuk kamu”

-Ayah Ibu-

SANWACANA

Alhamdulillahirobbil'alamin, puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Kajian Eksperimental Pengaruh Jari-Jari Kelengkungan Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin *Vortex* (Pusaran Air)”** sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T) di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Skripsi ini dibuat sebagai sebuah karya tulis yang merupakan hasil dari pengerjaan tugas akhir yang telah dilakukan. Selama penyusunan skripsi ini, penulis telah banyak menerima bantuan, dukungan, motivasi dan arahan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis, Husni Efendi, S.H. dan Ibu Linda Ernani yang selalu mendampingi dan melimpahkan doa-doanya pada penulis sehingga tetap bersemangat dalam menjalankan Program Studi jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung.
2. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., IPM., ASEAN Eng. selaku Rektor Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. H. Ahmad Herison, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Bapak Ahmad su'udi, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Bapak Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc. selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
6. Bapak Jorfri Boike Sinaga, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I yang telah bersedia mendidik dan meluangkan waktu untuk membimbing penulis dalam penyusunan skripsi ini.

7. Bapak Agus Sugiri, S.T., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing II yang telah bersedia mendidik dan meluangkan waktu untuk membimbing penulis dalam penyusunan skripsi ini.
8. Bapak M. Dyan Susila Es, S.T., M.Eng. selaku Dosen Pembahas yang senantiasa berkenan memberikan masukan dan arahan kepada penulis. Terima kasih untuk masukan dan saran-saran pada seminar proposal dan seminar hasil.
9. Bapak Sugiman selaku teknisi laboratorium Mekanika Fluida yang selalu memberikan semangat dan bantuan kepada penulis.
10. Seluruh Bapak, Ibu Dosen dan seluruh Staff Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah mengajarkan banyak pengetahuan kepada penulis.
11. Saudari Khania Putri Frama Yudha, S.Si. yang selalu memberi dorongan semangat serta doa kepada penulis.
12. Teman-teman Angkatan 2021 dan Tim Laboratorium Mekanika Fluida: Randa Admiral, S.T., Fiki Bayu Fernando, S.T., Tri Topan Ramadani, S.T., David Sinaga, S.T., Gomes Bahtera Silaban, S.T., Surya Jonathan Sagala, A.Md.T., Yosafat Hasiholan Tampubolon, S.T., Al Azis, S.T., Darius L Simamora, S.T., Glenn Ananta V, Nando Kurniawan, Irfan Ahmad Syah, Muhammad Hussein, Aji, Kevin dan Rizal yang selalu memberi dorongan semangat kepada penulis. Serta semua pihak yang telah membantu penulis namun tidak bisa disebutkan namanya satu persatu, penulis ucapkan terima kasih semoga Allah SWT Yang Maha Pengasih membalas segala kebaikan kalian.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan dan masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu penulis sangat mengharapkan saran dan kritik dari semua pihak yang bersifat membangun dalam rangka penyempurna skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan bagi pembaca. Akhir kata penulis mengucapkan terima kasih.

Bandar Lampung, 19 Januari 2026
Penulis,

M Fadhly Effendi

DAFTAR ISI

Daftar Isi	Halaman
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	viii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Sistematika Penulisan.....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Turbin Air.....	5
2.1.1 <i>Head Turbin</i>	6
2.1.2 Prinsip Kerja Turbin.....	7
2.2 Sistem Pembangkit Listrik Turbin <i>Vortex</i> (Pusaran Air).....	9
2.2.1 Saluran Masuk.....	9
2.2.2 Tangki Sirkulasi	10
2.3 Turbin <i>Vortex</i> (Pusaran Air).....	12
2.3.1 Aliran <i>Vortex</i>	13
2.3.2 Sudu Turbin.....	14
2.4 Geometri dan Kelengkungan Sudu Turbin <i>Vortex</i> (Pusaran Air) ..	15
2.5 Interaksi Aliran Pusaran dan Permukaan Sudu Turbin <i>Vortex</i>	16
2.6 Rumus Pada Perhitungan Turbin.....	18
III. METODOLOGI PENELITIAN	22
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	22
3.2 Alat dan Bahan	22

3.3	Diagram Alir Penelitian	31
3.4	Tahap Pembuatan Turbin <i>Vortex</i> (Pusaran Air).....	32
3.5	Pembuatan Sistem Alat Pengujian	34
3.6	Pengujian dan Pengambilan Data.....	35
3.7	Pengolahan Data.....	35
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	36
4.1	Sistem Alat Pengujian	36
4.2	Pembuatan Turbin <i>Vortex</i> (Pusaran Air).....	39
4.2.1	Pembuatan <i>Hub</i> atau Poros Turbin <i>Vortex</i>	39
4.2.2	Pembuatan Sudu Turbin <i>Vortex</i>	40
4.2.3	Perakitan (<i>assembly</i>) Turbin <i>Vortex</i>	42
4.3	Hasil Pengujian	43
4.4	Pembahasan.....	47
V.	PENUTUP.....	58
5.1	Kesimpulan	58
5.2	Saran.....	59
	DAFTAR PUSTAKA	60
	LAMPIRAN.....	62

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Turbin <i>Impuls</i> Jenis Pelton	7
Gambar 2.2 Turbin Francis.....	8
Gambar 2.3 Sistem Pembangkit Listrik Turbin <i>Vortex</i>	9
Gambar 2.4 Jenis – Jenis Saluran Masuk Turbin <i>Vortex</i>	9
Gambar 2.5 Skema Tangki Sirkulasi Pada Turbin <i>Vortex</i>	11
Gambar 2.6 Komponen Sistem Turbin <i>Vortex</i>	12
Gambar 2.7 Jenis Aliran <i>Vortex</i>	13
Gambar 2.8 Bentuk Skema 3D Sudu Turbin.....	14
Gambar 2.9 Parameter Geometri Sudu Turbin <i>Vortex</i>	15
Gambar 2.10 Skema <i>Streamline Vortex</i> dan Segitiga Kecepatan Pada Sudu Turbin	17
Gambar 2.11 Tinggi <i>Vortex</i> pada Basin	19
Gambar 2.12 Skema Alat Ukur Torsi pada Turbin	20
Gambar 3.1 Plat Besi	22
Gambar 3.2 Besi Poros	23
Gambar 3.3 Hub Turbin	23
Gambar 3.4 Bantalan (<i>Bearing</i>)	24
Gambar 3.5 <i>Pulley</i>	24
Gambar 3.6 Mesin Gerinda	25
Gambar 3.7 Mesin Las	25
Gambar 3.8 Mesin Rol	26
Gambar 3.9 Sketsa Cetakan Sudu Menggunakan <i>Software Solidworks</i>	26
Gambar 3.10 Pompa Air.....	27

Gambar 3.11 <i>Tachometer</i>	27
Gambar 3.12 Gelas Ukur	28
Gambar 3.13 <i>Waterpass</i>	28
Gambar 3.14 Meteran	29
Gambar 3.15 Sabuk	29
Gambar 3.16 Siku Ukur.....	30
Gambar 3.17 Neraca Pegas.....	30
Gambar 3.18 Diagram Alir Penelitian.....	31
Gambar 3.19 Sketsa <i>Hub</i>	32
Gambar 3.20 Sketsa Sudu Turbin.....	33
Gambar 3.21 <i>Drawing</i> 2D Turbin	33
Gambar 3.22 Desain Skema Model Alat Uji Pembangkit Listrik Turbin <i>Vortex</i>	34
Gambar 4.1 Tangki Reservoir. (a). Tampak Luar Tangki Reservoir, (b). Tampak Dalam Tangki Reservoir	36
Gambar 4.2 Katup Gerbang Air	37
Gambar 4.3 (a). Tampak Luar Saluran Air, (b). Tampak Dalam Saluran Air	37
Gambar 4.4 Sudu Pengarah	38
Gambar 4.5 Tangki Sirkulasi.....	38
Gambar 4.6 Hub atau Poros Turbin <i>Vortex</i>	39
Gambar 4.7 (a). Mal Jari-Jari Kelengkungan Sudu 85 mm, (b). Mal Jari-Jari Kelengkungan Sudu 110 mm, (c). Mal Jari-Jari Kelengkungan Sudu 145 mm	40
Gambar 4.8 Membuat Pola Pada Plat Besi.....	40
Gambar 4.9 Pemotongan Plat Besi	41
Gambar 4.10 Proses Pelengkungan Pada Sudu Turbin	41
Gambar 4.11 Penandaan Jarak Antara Sudu Turbin.....	42
Gambar 4.12 Proses Penyambungan Hub Dengan Sudu Turbin.....	42
Gambar 4.13 Turbin <i>vortex</i> . (a). Jari-jari kelengkungan 85 mm, (b). Jari-jari kelengkungan 110 mm, (c). Jari-jari kelengkungan 145 mm	43

Gambar 4.14 Grafik Pengaruh Putaran Turbin Terhadap Torsi Turbin Pada Debit Aliran Air 8,84 L/s	48
Gambar 4.15 Grafik Pengaruh Putaran Turbin Terhadap Torsi Turbin Pada Debit Aliran Air 10,54 L/s	48
Gambar 4.16 Grafik Pengaruh Putaran Turbin Terhadap Torsi Turbin Pada Debit Aliran Air 10,80 L/s	49
Gambar 4.17 Grafik Pengaruh Putaran Turbin Terhadap Daya Poros Turbin Pada Debit Aliran Air 8,84 L/s	50
Gambar 4.18 Grafik Pengaruh Putaran Turbin Terhadap Daya Poros Turbin Pada Debit Aliran Air 10,54 L/s	50
Gambar 4.19 Grafik Pengaruh Putaran Turbin Terhadap Daya Poros Turbin Pada Debit Aliran Air 10,80 L/s	51
Gambar 4.20 Grafik Pengaruh Putaran Turbin Terhadap Efisiensi Turbin Pada Debit Aliran Air 8,84 L/s	52
Gambar 4.21 Grafik Pengaruh Putaran Turbin Terhadap Efisiensi Turbin Pada Debit Aliran Air 10,54 L/s	53
Gambar 4.22 Grafik Pengaruh Putaran Turbin Terhadap Efisiensi Turbin Pada Debit Aliran Air 10,80 L/s	53
Gambar 4.23 Fenomena Aliran <i>Vortex</i> Pada Debit Optimum 10,80 L/s Untuk Variasi jari-jari Kelengkungan Sudu: (a) 85 mm, (b) 110 mm, dan (c) 145 mm.....	55

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 4.1 Nilai Debit dan Kecepatan Aliran	44
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Turbin <i>Vortex</i> Jari-Jari Kelengkungan 85 mm	44
Tabel 4.3 Hasil Pengujian Turbin <i>Vortex</i> Jari-Jari Kelengkungan 110 mm	45
Tabel 4.4 Hasil Pengujian Turbin <i>Vortex</i> Jari-Jari Kelengkungan 145 mm	45

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kekawatiran akan krisis energi dan perubahan iklim serta usaha untuk mengurangi dampak lingkungan yang melanda dunia saat ini mengakibatkan energi baru dan terbarukan menjadi kebutuhan mendesak di masa depan. Salah satu potensi sumber energi terbarukan yang tersedia menjanjikan untuk diterapkan adalah energi air terutama di daerah perbukitan/pedesaan. Sebagian besar energi di Indonesia masih berasal dari energi fosil yang berupa gas alam dan minyak bumi.

Energi fosil tersebut sangat dibutuhkan sebagai bahan bakar kendaraan dan pembangkit listrik. Akibat pertumbuhan industriomotif dan perkembangan manusia menyebabkan pasokan energi fosil semakin menipis. Oleh sebab itu maka perlu dipikirkan untuk mencari energi alternatif. Dari permasalahan di atas maka harus dipikirkan berbagai opsi lain demi terciptanya energi alternatif yang dapat meminimalkan penggunaan energi fosil.

Salah satu sumber energi terbarukan yang mulai diminati adalah Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA). Turbin air berfungsi sebagai mesin konversi energi yang mengubah energi potensial air menjadi energi mekanik untuk menggerakkan generator dan menghasilkan listrik. Turbin ini memanfaatkan aliran sungai dengan perbedaan ketinggian (*head*) yang cukup tinggi. Namun, tidak semua daerah memiliki aliran air dengan *head* yang memadai. *Gravitational Water Vortex Power Plant* (GWVPP) merupakan salah satu jenis teknologi energi terbarukan menggunakan sumber energi air dan dikategorikan sebagai mikrohidro dengan *head* rendah dimana struktur

saluran dan cekungan digunakan untuk membuat pusaran, yang kemudian di ekstraksi melalui *runner*. Turbin *vortex* (*pusaran air*) dirancang untuk mampu bekerja dengan memanfaatkan pusaran air yang terbentuk di dalam basin, menggunakan pusaran air sebagai penggerak sudunya sehingga dapat beroperasi pada kondisi aliran rendah (Ikhsan et al., 2020).

Studi ini merupakan kelanjutan dari penelitian Sinaga (2024), yang merancang model turbin *vortex* untuk sistem pembangkit listrik skala laboratorium. Pengujian dilakukan pada turbin dengan bentuk sudu *flat*, *twisted*, dan *curved* yang dirancang untuk turbin dengan jumlah enam sudu, pada bentuk sudu *curved* menggunakan jari-jari kelengkungan sudu 130 mm. Dari hasil pengujian, turbin dengan bentuk sudu lengkung (*curved*) mencapai efisiensi maksimum sebesar 30,46% pada laju aliran 0,0108 m³/s, sedangkan turbin dengan sudu *flat* dan *twisted* masing-masing mencapai efisiensi maksimum sebesar 18,63% dan 19,80% pada debit aliran yang sama. Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa bentuk sudu lengkung (*curved*) memberikan kinerja terbaik dibandingkan bentuk sudu *flat* dan *twisted*.

Pada penelitian tersebut belum dikaji jari-jari kelengkungan sudu, Oleh sebab itu maka pada penelitian ini akan dikaji secara eksperimen pengaruh jari-jari kelengkungan sudu terhadap unjuk kerja turbin *vortex* sehingga diperoleh kelengkungan sudu yang optimal untuk pengoprasian pada turbin *vortex* tersebut. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Mekanika Fluida, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung. Pembuatan model turbin *vortex* ini diharapkan dapat memperluas wawasan dan pengetahuan. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat mendorong penelitian- penelitian lanjutan oleh mahasiswa atau dosen terkait pengembangan turbin *vortex* di masa depan.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh jari-jari kelengkungan sudu terhadap karakteristik unjuk kerja turbin *vortex*. Tujuan tersebut diperoleh dengan mengetahui:

1. Mengetahui hubungan putaran turbin (rpm) terhadap torsi (Nm).
2. Mengetahui hubungan putaran turbin (rpm) terhadap daya poros (Watt).
3. Mengetahui hubungan putaran turbin (rpm) terhadap efisiensi (%).

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian yang akan dilakukan adalah:

1. Jari-jari kelengkungan sudu yang divariasikan adalah 85 mm, 110 mm, dan 145 mm.
2. Bentuk sudu yang digunakan adalah bentuk sudu lengkung (*curved*), dengan menggunakan 6 sudu turbin.
3. Pengujian dilakukan dengan menggunakan 3 variasi debit aliran air yaitu 8,84 L/s, 10,54 L/s, dan 10,80 L/s.

1.4 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada laporan penelitian ini terdiri dari beberapa bab sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab pendahuluan ini berisikan latar belakang, tujuan, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini mengulas teori dasar dalam penelitian ini mengenai turbin air, turbin *vortex*, sudu turbin, parameter turbin *vortex*.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisi mengenai waktu, tempat penelitian, beserta langkah-langkah dalam melakukan proses penelitian dan pengambilan data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisi tabel, grafik, dan pembahasan hasil proses pengujian.

BAB V PENUTUP

Pada bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran selama penelitian dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

Berisi seluruh sumber literatur yang dijadikan referensi dalam penyusunan skripsi ini.

Lampiran: Memuat data pendukung penelitian berupa data pengujian, perhitungan, gambar desain dan spesifikasi alat, serta dokumentasi pelaksanaan penelitian yang tidak disajikan secara rinci pada bab pembahasan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Turbin Air

Turbin air dikembangkan pada abad 19 dan digunakan secara luas untuk sistem pembangkit listrik untuk merancang pembangkit menggunakan turbin air memerlukan rancangan yang sangat spesifik yaitu pada dimensi kincirnya, debit aliran dan tingginya untuk memaksimalkan kerja dari turbin. Pada turbin aliran air diubah menjadi energi kinetik yang akan memutar rotor dengan *belt*, *pulley* atau *gearbox*. Pada rotor dihubungkan dengan generator yang akan akan mengubah putaran yang dihasilkan menjadi energi listrik (Husen, 2021).

Turbin air adalah turbin yang menggunakan fluida kerja air. Sedangkan turbin itu sendiri adalah alat mekanik yang mengubah energi fluida menjadi putaran poros. Turbin terdiri dari poros dan sudu-sudu. Sudu tetap atau *stationary blade* berfungsi untuk mengarahkan aliran fluida. Sedangkan sudu putar atau *rotary blade*, mengubah arah dan kecepatan aliran fluida sehingga menghasilkan gaya yang memutar poros. Sudut aliran yang sesuai dapat meminimalkan *losses* dan mempercepat putaran turbin (Pamuji, 2021).

Turbin air merupakan salah satu turbin yang digunakan untuk memutar sebuah generator untuk menghasilkan energi listrik. Turbin air dapat didefinisikan sebagai mesin penggerak yang menggunakan air sebagai fluida kerjanya. Prinsip kerja turbin air melibatkan aliran air dalam pipa yang memiliki energi potensial dan energi kinetik. Aliran ini diarahkan ke roda turbin melalui sudu pengarah, di mana energi dalam air tersebut diubah menjadi energi mekanik yang berupa putaran poros roda turbin (Prasetyo, 2023).

Fluida sebagai peran penting dalam kinerja turbin air yaitu aliran fluidanya, fluida akan mengalir dari dataran tinggi ke dataran yang lebih rendah sehingga menghasilkan perbedaan ketinggian yang mengakibatkan energi potensial. Kemudian dari turbin akan mengubah energi potensial menjadi energi kinetik, yang akan menghantam penampang di baling-baling turbin sehingga turbin tersebut terdorong bergerak memutar lalu pada poros dihubungkan ke generator yang bertujuan untuk menghasilkan energi listrik.

2.1.1 *Head* Turbin

Head turbin adalah ketinggian jatuh air dari tempat yang tinggi ke tempat yang lebih rendah untuk menentukan jenis turbin yang akan digunakan. Jenis turbin harus disesuaikan dengan tempat yang memiliki potensi ketinggian jatuh air. Beberapa faktor yang menentukan jenis turbin yang akan digunakan adalah *head* turbin, kecepatan aliran, kedalaman pemasangan turbin dan estimasi biaya pembuatan turbin. Dapat disimpulkan bahwa *head* turbin perlu di perhatikan sebelum menentukan jenis turbin air yang akan digunakan. *Head* turbin dapat di klasifikasikan berdasarkan ketinggiannya adalah sebagai berikut:

a. Turbin *head* sangat rendah

Turbin yang memiliki *head* sangat rendah memiliki ketinggian $\leq 4\text{m}$, jika ketinggian *head* hanya 4m biasanya turbin yang digunakan berjenis *Propeller* dan *Kaplan*.

b. Turbin *head* rendah

Turbin yang memiliki *head* yang rendah memiliki ketinggian 5-10m, biasanya jenis turbin yang digunakan turbin *Crossflow*.

c. Turbin *head* sedang

Turbin yang memiliki *head* yang sedang memiliki ketinggian kurang lebih 20-100m, biasanya jenis turbin dengan *head* sedang memakai jenis turbin *Pelton*.

d. Turbin *head* tinggi

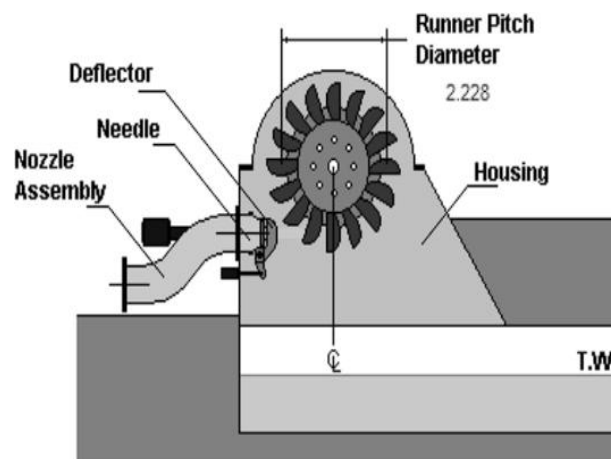
Turbin yang memiliki *head* yang tinggi memiliki ketinggian 100m, turbin yang digunakan pada *head* ini adalah turbin *Pelton* dan *Turgo*.

2.1.2 Prinsip Kerja Turbin

Secara umum, klasifikasi turbin terdiri dari dua jenis: turbin reaksi dan turbin *impuls*. Turbin reaksi dirancang untuk *head* rendah dan laju aliran tinggi, sementara turbin *impuls* digunakan dalam situasi dengan *head* tinggi dan laju aliran rendah (Pritchard, 2004). Berdasarkan aplikasinya, turbin diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, yaitu turbin *impuls* dan turbin reaksi (Dietzel, 1980). Terdapat prinsip kerja pada turbin *impuls* dan turbin reaksi, yaitu:

a. Turbin *Impuls*

Turbin *impuls* adalah turbin air yang memiliki tekanan sama di setiap sudunya (*runner*). Energi potensial air diubah menjadi energi kinetik pada *nozzle* yang disebarkan. Air keluar *nozzle* yang mempunyai kecepatan tinggi membentur sudu turbin yang mengakibatkan tekanan pada sudu. Setelah membentur sudu arah kecepatan aliran berubah sehingga terjadi perubahan momentum (*impuls*), akibatnya pada rotor turbin akan berputar. Turbin *impuls* disebut turbin tak bertekanan karena sudu gerak beroperasi pada tekanan atmosfer. Jenis dari turbin *impuls* yaitu turbin *Pelton*, turbin *Turgo* dan juga turbin *Crossflow*.



Gambar 2.1 Turbin *impuls* jenis pelton (Darto, 2013)

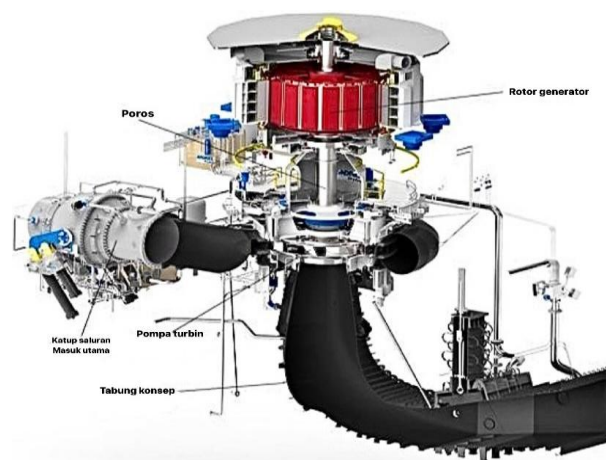
b. Turbin Reaksi

Pada turbin reaksi ini memakai air dengan head sedang, yang arah masuk alirannya yaitu *mixedradial*. Turbin reaksi adalah turbin yang cara kerjanya merubah seluruh energi air menjadi energi kinetik. Turbin jenis ini sangat banyak digunakan. Sudu pada turbin reaksi ini mempunyai profil khusus yang dapat menyebabkan terjadinya perbedaan tekanan air selama melalui sudu.

Perbedaan tekanan ini memberikan gaya pada sudu sehingga bagian turbin yang berputar. Turbin yang bekerja berdasarkan prinsip ini dikelompokkan sebagai turbin reaksi. *Runner* turbin reaksi sepenuhnya tercelup dalam air dan berada dalam rumah turbin (Saputra, 2018).

Oleh karena itu putaran runner menyebabkan perubahan momentum oleh air tersebut. Salah satu contoh turbin reaksi adalah turbin Francis dan Kaplan (propeller), Darrieus (Patty, 1995).

Contoh turbin Francis diperlihatkan pada gambar 2.2 dibawah yang menjelaskan nama-nama part yang terdapat pada turbin francis adalah sebagai berikut:



Gambar 2.2 Turbin francis (Hidayat, 2019)

2.2 Sistem Pembangkit Listrik Turbin *Vortex* (Pusaran Air)

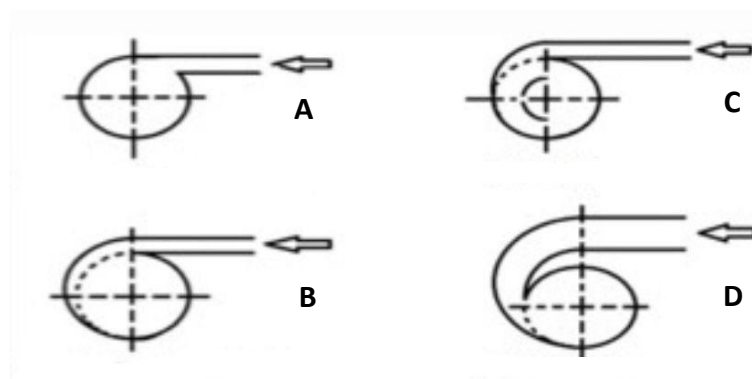
Pembangkit listrik turbin air pada prinsipnya memanfaatkan beda ketinggian jatuh air (*head*) dan jumlah debit aliran air yang disalurkan. Air mengalir selanjutnya menggerakkan sebuah turbin yang dimana turbin dihubungkan dengan generator bertujuan untuk menghasilkan energi listrik. Gambar 2.3 menampilkan komponen-komponen pada sistem pembangkit listrik turbin *vortex*..:



Gambar 2.3 Sistem pembangkit listrik turbin *vortex* (Bajracharya, 2020)

2.2.1 Saluran Masuk

Terdapat beberapa jenis saluran pada aliran masuk (*inlet area*), sebagai tujuan untuk meningkatkan sebuah kinerja pada turbin dan efisiensi sudu turbin.



Gambar 2.4 Jenis-jenis saluran masuk turbin *vortex* (Gibran, 2017)

Keterangan gambar:

A : *Outer wall tangential*

B : *Ramped entry or scrolled involute*

C : *Involute*

D : *Involute Ramp*

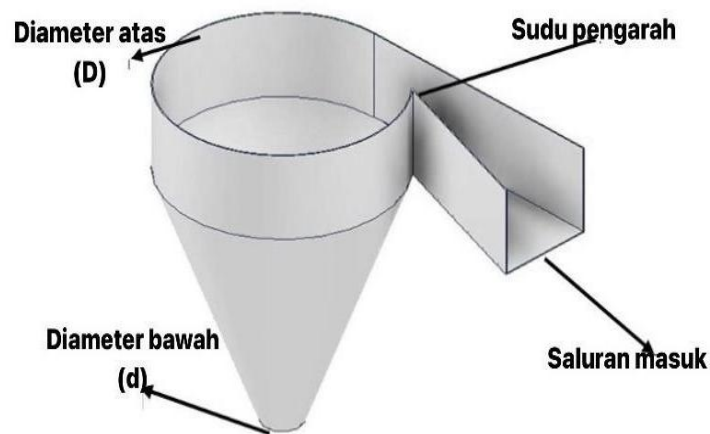
Dimensi saluran masuk ditetapkan berdasarkan ukuran dari tempat pengujian dan debit aliran air yang akan disuplai. Pada suplai saluran masuk dan sistem terdapat sudu pengarah yang diameternya sama dengan saluran keluar air atau diameter bagian bawah pada sistem sirkulasi dan menurut penelitian yang dilakukan oleh Huda dan Prastyo (2017) yang menyatakan bahwa berpengaruh sudu pengarah terhadap efisiensi pada sudu. Hal ini karena dengan meningkatkan sudu pengarah aliran air yang masuk menjadi kecil, sehingga aliran air dapat membentuk sebuah pusaran dahulu sebelum menyentuh bagian sudu turbin. Diameter yang sama antara saluran masuk dan saluran keluar air membuat laju aliran masuk dan keluar air sama.

2.2.2 Tangki Sirkulasi

Pada pembangkit listrik dengan menggunakan turbin *vortex* laju aliran masuk adalah air yang dialirkan ke saluran yang terhubung ke tanki sirkulasi. Saluran itu berfungsi untuk mengarahkan aliran air ke dalam bak secara tangensial horizontal atau miring pada sudut yang diinginkan. Bentuk saluran masuk (*inlet*) dan saluran keluar (*outlet*) juga mempengaruhi kecepatan aliran pusaran sehingga parameter ini harus ekstensif untuk menghasilkan pusaran air yang lebih efektif.

Desain tangki sirkulasi mampu mempengaruhi bentuk aliran pusaran gravitasi yang dapat digunakan untuk sumber energi terbarukan. Air masuk ke dalam tangki sirkulasi melingkar secara tangensial yang menciptakan pusaran bebas dan energi diekstraksi dari pusaran bebas dengan menggunakan turbin. Desain tangki sirkulasi yang banyak digunakan yaitu kerucut dan silinder.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Wanchat et al., 2013) yang menyatakan bahwa bentuk dari tabung sirkulasi akan mempengaruhi aliran *vortex* pada turbin. Penelitian ini juga menyatakan bahwa parameter pada tabung sirkulasi seperti bentuk tabung sirkulasi, diameter aliran masuk dan keluar air, dan tinggi tabung sirkulasi dapat menentukan besar energi kinetik yang dapat dihasilkan. Skema tangki sirkulasi dan saluran masuk dapat dilihat pada gambar 2.5.

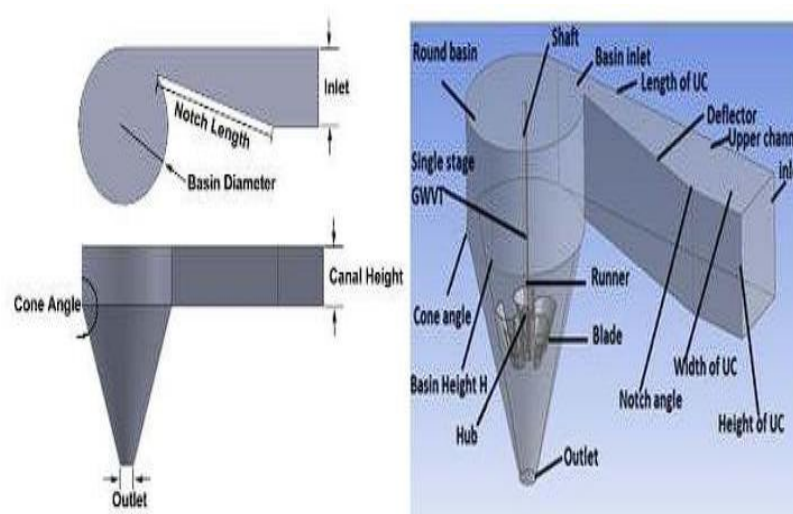


Gambar 2.5 Skema tangki sirkulasi pada turbin *vortex* (Christina, 2022)

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Wanchat et al., 2013) yang menggunakan diameter tabung silinder sirkulasi sebesar 0.10 m sampai 0.40 m didapatkan dengan menggunakan diameter 0.2 m akan dihasilkan daya keluar sebesar 60W, tinggi aliran vortex sebesar 0.40 m dan menghasilkan efisiensi sebesar 30%. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Sagar et al., 2014) yang menyatakan bahwa turbin *vortex* dengan bentuk tangki sirkulasi kerucut akan meningkatkan kecepatan air keluar turbin. Kecepatan terbesar didapatkan dari rasio diameter atas tangki sirkulasi (D) dan diameter bawah (d) antara 14% - 18% dengan derajat kemiringan pada tangki sirkulasi kerucut sebesar 23° dan diameter sebesar 80 cm yang menghasilkan efisiensi sebesar 36,84%.

2.3 Turbin *Vortex* (Pusaran Air)

Turbin *vortex* (pusaran air) memiliki bentuk melingkar di dalam basin untuk menciptakan pusaran air yang kemudian akan mendorong turbin. Turbin ini beroperasi dengan memanfaatkan tinggi jatuh air (*head*) yang telah ditentukan dan memiliki keunggulan dalam kemampuannya untuk berfungsi dengan debit air yang kecil. Turbin ini termasuk dalam kategori aliran radial dengan jenis turbin reaksi. Gerakan *vortex* disebabkan oleh perbedaan kecepatan antara lapisan-lapisan fluida yang berdekatan, yang dapat diartikan sebagai gerakan alami fluida akibat variasi kecepatan dan tekanan. Aliran *vortex* juga dikenal sebagai aliran pulsating atau pusaran yang dapat terjadi pada berbagai jenis fluida, termasuk air, minyak, dan udara. Jumlah sudu pada turbin mempengaruhi kinerjanya, karena jumlah sudu yang dipilih menentukan daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh putaran turbin (Dhakal dkk., 2015).



Gambar 2.6 Komponen sistem turbin *vortex* (Suarda et al., 2023)

Prinsip kerja turbin *vortex* melibatkan air yang memasuki saluran masuk berukuran besar dan mengalir melalui saluran menuju tangki sirkulasi berbentuk lingkaran. Selanjutnya, air bergerak secara tangensial di dalam tangki berbentuk lingkaran tersebut. Di bawah tangki sirkulasi berbentuk lingkaran ini terdapat saluran keluar untuk air keluar, dengan diameter pada

saluran keluar lebih kecil dibandingkan dengan diameter saluran masuk. Turbin *vortex* tidak bergerak karena perbedaan tekanan, melainkan bergerak karena gaya dinamik pada *vortex* (Fernando, 2023).

2.3.1 Aliran *Vortex*

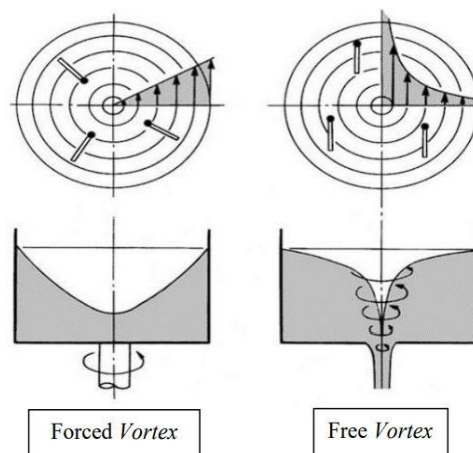
Vortex adalah aliran fluida di mana partikel berputar dengan pola lingkaran konsentris, menciptakan gerakan berputar. Gerakan pusaran yang berputar ini disebabkan oleh perbedaan kecepatan antara partikel fluida yang berdekatan. Turbin *vortex* tidak bergerak karena perbedaan tekanan, melainkan bergerak karena gaya dinamik pada *vortex*. Ini juga dapat dipahami sebagai gerakan alami fluida yang dipengaruhi oleh parameter kecepatan dan tekanan. (Fernando, 2023). Aliran *vortex* dibagi menjadi dua yaitu:

a. Aliran *vortex* bebas (*Free vortex*)

Aliran *vortex* bebas terbentuk secara alami tanpa adanya pengaruh gaya eksternal. Aliran ini biasanya terjadi ketika fluida mengalir keluar dari lubang atau saluran, membentuk pusaran.

b. Aliran *vortex* paksa (*Forced vortex*)

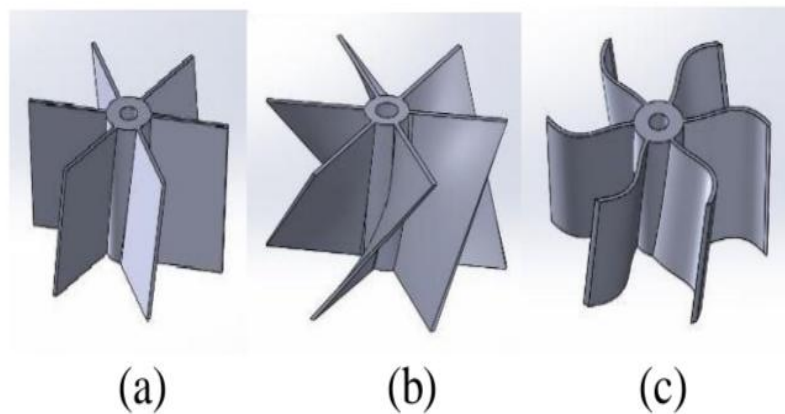
Aliran *vortex* paksa terjadi ketika aliran fluida diputar dengan bantuan gaya eksternal, seperti yang dihasilkan oleh pompa sentrifugal atau alat mekanis lainnya.



Gambar 2.7 Jenis aliran *vortex* (Maulana, 2023)

2.3.2 Sudu Turbin

Sudu turbin adalah bagian dari turbin di mana konversi energi terjadi. Sudu terdiri dari akar bilah, badan bilah, dan ujung bilah. Bilah-bilah tersebut kemudian disusun untuk membentuk lingkaran lengkap dengan jarak yang sama. Sudu (*blade*) merupakan bagian turbin yang berfungsi untuk merubah gerak pancar air menjadi gerak rotasi air yang masuk turbin dan mengenai sudu turbin akibat adanya fluida kerja (air, angin, uap, dll) yang dimana akan terjadi konversi energi yaitu energi kinetik menjadi energi mekanis yang menggerakkannya atau mengubah energi potensial menjadi energi kinetik (Dhakal, 2017).

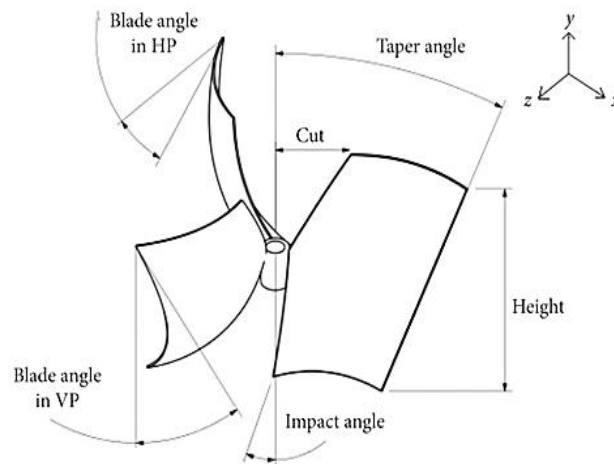


Gambar 2.8 Bentuk skema 3D sudu turbin
(a). *flat*, (b). *twisted*, (c). *curved* (Christina, 2022)

Gambar 2.8 menunjukkan bentuk sudu pada turbin *vortex*, terdiri dari sudu *flat*, *twisted*, *curved*. Setiap bentuk sudu akan mempengaruhi kinerja turbin *vortex* yaitu hasil keluaran torsi turbin, daya poros turbin dan efisiensi turbin. Bagian dari sudu turbin meliputi panjang sudu, diameter sudu, bentuk sudu, dan jumlah sudu. Menurut Dhakal dkk. (2017), sudu turbin dengan bentuk melengkung lebih cocok untuk aliran *vortex* dibandingkan dengan bentuk sudu lainnya.

2.4 Geometri dan Kelengkungan Sudu Turbin *Vortex* (Pusaran Air)

Sudu (*blade*) merupakan salah satu komponen terpenting pada turbin *vortex* karena berfungsi untuk mengubah energi kinetik aliran pusaran air menjadi energi mekanik putar. Efisiensi sangat dipengaruhi oleh bentuk geometri sudu, khususnya dimensi, dan kelengkungannya terhadap arah aliran *vortex*. Desain sudu pada turbin *vortex* sangat dipengaruhi oleh *radius of curvature* (R), yaitu jari-jari kelengkungan dari permukaan sudu. Menurut Maika et al. (2023), bentuk sudu melengkung (*curved blade*) meningkatkan kelancaran aliran pusaran air dan cenderung meningkatkan efisiensi turbin dibanding sudu lurus (*flat blade*) karena lebih sesuai dengan *streamline* pusaran *vortex*.



Gambar 2.9 Parameter geometri sudu turbin *vortex* (Bajracharya, 2020)

Gambar 2.9 menunjukkan parameter utama dari geometri sudu turbin *vortex* seperti sudut sudu pada bidang horizontal (*blade angle in HP*), bidang vertikal (*blade angle in VP*), sudut impact (*impact angle*), sudut ketirusan (*taper angle*), serta tinggi sudu (*height*). Parameter ini sangat memengaruhi bentuk kelengkungan. Menurut Bajracharya et al. (2020) dalam penelitiannya mengenai pengaruh parameter geometri pada turbin *vortex* menjelaskan bahwa sudu turbin harus didesain dengan memperhatikan beberapa parameter utama seperti:

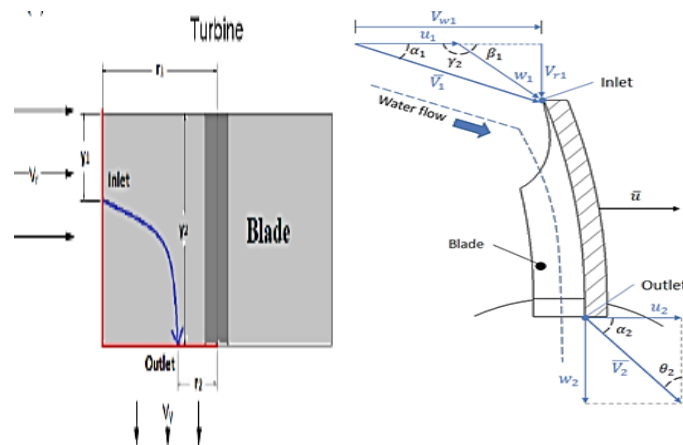
- a. Jari-jari *inlet* dan *outlet* (R_1 dan R_2): yang mengacu pada posisi sudu terhadap sumbu pusat.
- b. Sudut sudu pada bidang horizontal (*blade angle in horizontal plane*) dan bidang vertikal (*blade angle in vertical plane*): yang mempengaruhi arah dan kecepatan relatif fluida yang mengenai permukaan sudu.
- c. Sudut impak (*impact angle*): yaitu sudut antara arah datangnya aliran air dan permukaan sudu, yang sangat menentukan efisiensi transfer momentum dari air ke sudu.

Jari-jari kelengkungan sudu pada turbin *vortex* adalah parameter penting yang menentukan bentuk lengkungan sudu, dan secara langsung mempengaruhi bagaimana fluida mengalir melalui turbin dan seberapa efisien energi pusaran air diubah menjadi energi mekanik. (David et al., 2024) melakukan penelitian tentang pengaruh bentuk sudu terhadap efisiensi turbin air gravitasi aliran *vortex* yang dimana efisiensi terbaik berada disudu lengkung (*curved*). Penggunaan sudu melengkung ini meningkatkan efisiensi aliran *vortex* secara signifikan, sehingga dipilih sebagai desain yang optimal untuk turbin *vortex*.

2.5 Interaksi Aliran Pusaran dan Permukaan Sudu Turbin *Vortex*

Pada turbin *vortex*, aliran air memasuki kolam pusaran (*vortex basin*) dan membentuk aliran melingkar akibat efek gravitasi dan geometri saluran masuk. Aliran ini tidak bergerak lurus, melainkan berputar membentuk lintasan spiral menuju pusat runner. Karakteristik pusaran ini menyebabkan arah datang fluida ke sudu memiliki komponen kecepatan radial dan tangensial.

Dalam kondisi seperti ini, desain permukaan sudu sangat menentukan seberapa baik aliran *vortex* dapat diarahkan dan dimanfaatkan untuk menghasilkan daya. Permukaan sudu yang melengkung, jika disesuaikan dengan arah *streamline* aliran pusaran, dapat mengurangi deviasi arah aliran dan menghindari kejutan aliran (*shock*) pada saat fluida menabrak sudu. Kejutan ini dapat menyebabkan turbulensi dan energi hilang yang menurunkan efisiensi turbin.



Gambar 2.10 Skema *Streamline vortex* dan segitiga kecepatan pada sudu turbin *vortex* (Kueh et al., 2017)

Gambar 2.10 menunjukkan arah lintasan aliran pusaran menuju sudu (kiri), serta hubungan antara kecepatan absolut (V), kecepatan relatif (W), dan kecepatan sudu (u) melalui segitiga kecepatan (kanan). Sudut-sudut ini penting untuk menyelaraskan aliran dengan bentuk sudu agar kehilangan energi akibat deviasi atau kejutan dapat diminimalkan.

Menurut Kueh et al. (2017) menunjukkan bahwa analisis *velocity triangle* pada sudu turbin *vortex* sangat bermanfaat untuk mengetahui sudut masuk dan keluar aliran, serta mengkaji apakah aliran air selaras dengan geometri sudu. Parameter V , U , dan W dihubungkan melalui sudut α dan β , yang merepresentasikan kondisi aliran masuk (*inlet*) dan keluaran (*outlet*) aliran ini membantu mengidentifikasi potensi gangguan aliran (*shock*) dan kerugian energi akibat tidak selarasnya aliran dengan sudu. Penelitian oleh Maika et al. (2023) menunjukkan bahwa sudu melengkung lebih cocok digunakan dalam sistem *vortex* dibandingkan sudu lurus, karena mampu menyesuaikan bentuknya dengan arah lintasan pusaran air. Sudu yang mengikuti pola aliran cenderung memiliki efisiensi yang lebih tinggi karena mengurangi energi sisa dan tekanan balik (*back pressure*) di bagian *outlet*.

2.6 Rumus Pada Perhitungan Turbin

1. Pengukuran Kecepatan Aliran

Pengukuran kecepatan aliran air dilakukan untuk mengetahui besar daya air yang keluar dari turbin. Kecepatan aliran dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut :

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2.1)$$

Dimana:

v : Kecepatan aliran (m/s)

Q : Debit aliran air (L/s)

A : Luas penampang aliran (m²)

Untuk menghitung nilai debit air dapat menggunakan persamaan (M. Bruce, 2006), sebagai berikut:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (2.2)$$

Dimana:

Q : Debit air (L/s)

V : Volume bak penampung (m³)

t : Waktu (s)

2. Perhitungan Daya *Hydro*

Daya *hydro* yang dapat dihasilkan oleh turbin sesuai dengan kapasitas tinggi jatuh air. Daya *hydro* dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (Dietzel, 1980), sebagai berikut:

$$P_h = \gamma \cdot Q \cdot H \quad (2.3)$$

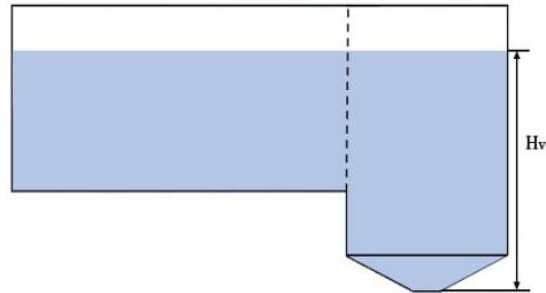
Dimana:

P_h : Daya *hydro* (watt)

γ : Berat jenis air (N/m^3)

Q : Debit aliran air (L/s)

H : *Head vortex* (m)



Gambar 2.11 Tinggi *vortex* pada *basin* (Rahman et al., 2017)

3. Perhitungan Daya Turbin

Energi mekanik dari aliran air, yang merupakan hasil transformasi energi potensial gravitasi, digunakan untuk menggerakkan turbin atau kincir. Secara umum, turbin berfungsi untuk menghasilkan energi listrik, sedangkan kincir dimanfaatkan untuk penggunaan energi mekanik secara langsung. Untuk aliran yang melewati turbin, daya yang dihasilkan dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$P_t = T \cdot \omega \quad (2.4)$$

Dimana:

P_t : Daya poros turbin (watt)

T : Torsi turbin (Nm)

ω : Kecepatan sudut turbin (rad/s)

Nilai kecepatan sudut turbin dapat diperoleh melalui persamaan berikut:

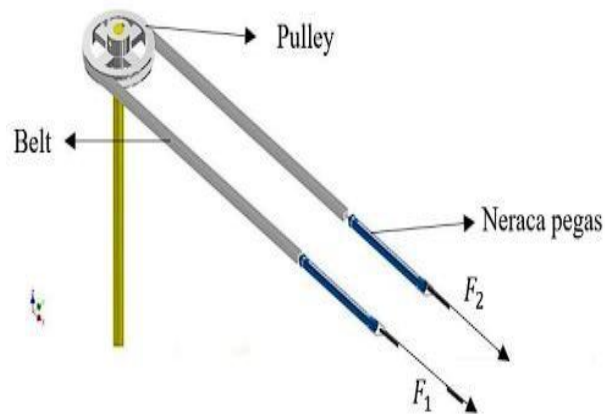
$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (2.5)$$

4. Pengukuran Putaran Turbin

Pengukuran putaran turbin dilakukan untuk mengetahui putaran poros turbin yang selanjutnya digunakan untuk mengetahui besar daya poros turbin. Alat yang digunakan dalam mengukur putaran turbin adalah *tachometer*.

5. Pengukuran Torsi Turbin

Torsi turbin dapat diukur dengan melakukan pengereman terhadap turbin saat berputar dengan metode sistem pengereman sabuk. Sistem pengereman sabuk menggunakan neraca pegas sebagai pengukur besar tegangan tali yang diberikan.



Gambar 2.12 Skema alat ukur torsi pada turbin (Christina. Y, 2022)

Besar torsi dihitung dengan menggunakan selisih tegangan tali antara sisi ketat dan sisi kendur yang merupakan gaya (F) pengereman yang ditunjukkan pada persamaan berikut :

$$T = \Sigma F \cdot r \quad (2.6)$$

Dimana:

T : Torsi (Nm)

Σ : $F_2 - F_1$ (N)

r : Jari-jari *pulley* pengereman (m)

6. Perhitungan Efisiensi Turbin

Efisiensi turbin dapat dicari dengan persamaan (M. Bruce, 2006), sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_t}{P_h} \times 100 \% \quad (2.7)$$

Dimana:

η : Efisiensi

P_t : Daya Turbin (watt)

P_h : Daya *Hydro* (watt)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini mulai dilaksanakan pada bulan Januari 2025 di Laboratorium Mekanika Fluida, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan untuk pembuatan dan pengujian unjuk kerja turbin *vortex* adalah sebagai berikut.

1. Bahan pembuatan turbin *vortex*

Bahan yang digunakan dalam pembuatan turbin *vortex* adalah sebagai berikut:

a. Plat besi

Plat besi digunakan sebagai bahan dalam pembuatan sudu turbin *vortex*.



Gambar 3.1 Plat besi

b. Besi poros

Besi poros digunakan sebagai poros turbin, dudukan turbin, dan sistem pengereman. Diameter pada besi poros yaitu 20 mm.



Gambar 3.2 Besi poros

c. *Hub* Turbin

Hub (pipa besi) digunakan sebagai tempat terletaknya sudu-sudu turbin *vortex*. Pada *hub* yang digunakan dengan diameter terbesar 57 mm, diameter terkecil 33 mm, diameter lubang tengah 20 mm, dan tinggi keseluruhan 348 mm.



Gambar 3.3 *Hub* turbin

d. Bantalan (*Bearing*)

Bantalan (*bearing*) digunakan sebagai tumpuan poros yang memiliki beban, sehingga putaran atau gerak bolak-balik dapat berlangsung secara halus dan aman. Pada diameter lubang tengah *bearing* yaitu 20 mm.



Gambar 3.4 Bantalan (*Bearing*)

e. *Pulley*

Pulley merupakan elemen mekanis yang mentransmisikan daya dan putaran antara poros menggunakan sabuk atau belt menuju komponen beban atau sistem yang dituju. *Pulley* yang digunakan diameter luar 6 inch dan diameter lubang tengah (lubang as) yaitu 20 mm



Gambar 3.5 *Pulley*

2. Alat pembuatan turbin *vortex*

Alat yang digunakan dalam pembuatan turbin *vortex* adalah sebagai berikut:

a. Mesin gerinda

Mesin gerinda digunakan untuk memotong, mengasah, dan menghaluskan benda kerja.



Gambar 3.6 Mesin gerinda

b. Mesin las

Mesin las digunakan untuk menyambung atau meleburkan logam atau material sejenis dengan cara memberikan panas tinggi pada area sambungan, sehingga menghasilkan ikatan permanen antara dua bagian logam.



Gambar 3.7 Mesin las

c. Mesin rol

Mesin rol digunakan untuk membengkokkan atau melengkungkan plat besi agar membentuk sudu turbin sesuai dengan desain yang diinginkan.



Gambar 3.8 Mesin rol

d. Cetakan sudu

Cetakan sudu digunakan sebagai acuan dalam pembuatan sudu turbin, dalam pemotongan sudu turbin yaitu menggunakan mesin gerinda. Cetakan sudu yang dibuat yaitu jari- jari kelengkungan sudu 85 mm, 110 mm, dan 145 mm.



(a)

(b)

(c)

Gambar 3.9 Cetakan sudu. (a). Jari-jari kelengkungan 85 mm, (b). Jari-jari kelengkungan 110 mm, (c). Jari-jari kelengkungan 145 mm

3. Alat ukur dan perlengkapan untuk pengujian unjuk kerja turbin *vortex*. Alat yang digunakan dalam pengujian model unjuk kerja turbin *vortex* adalah sebagai berikut:

a. Pompa air

Pompa berfungsi sebagai pengalir air menuju tangki penampungan (*Reservoir*).



Gambar 3.10 Pompa air

b. *Tachometer*

Tachometer berguna untuk mengukur kecepatan putaran pada turbin.



Gambar 3.11 *Tachometer*

c. Gelas ukur

Gelas ukur digunakan untuk mengukur debit air dalam pengambilan data, memberikan informasi akurat tentang volume air yang mengalir selama suatu periode waktu.



Gambar 3.12 Gelas ukur

d. *Waterpass*

Waterpass adalah alat ukur yang digunakan untuk mengukur kemiringan atau ketidakrataan permukaan suatu bidang dengan bidang lainnya menjadi posisi yang sejajar.



Gambar 3.13 *Waterpass*

e. Meteran

Meteran berguna sebagai alat pengukur panjang sebuah benda kerja.



Gambar 3.14 Meteran

f. Sabuk

Sabuk adalah bahan fleksibel yang melingkar tanpa ujung, yang digunakan untuk menghubungkan secara mekanis dua poros yang berputar.



Gambar 3.15 Sabuk

g. Siku ukur

Siku ukur digunakan untuk memastikan turbin terpasang secara tegak lurus pada tangki sirkulasi (*conical basin*).



Gambar 3.16 Siku ukur

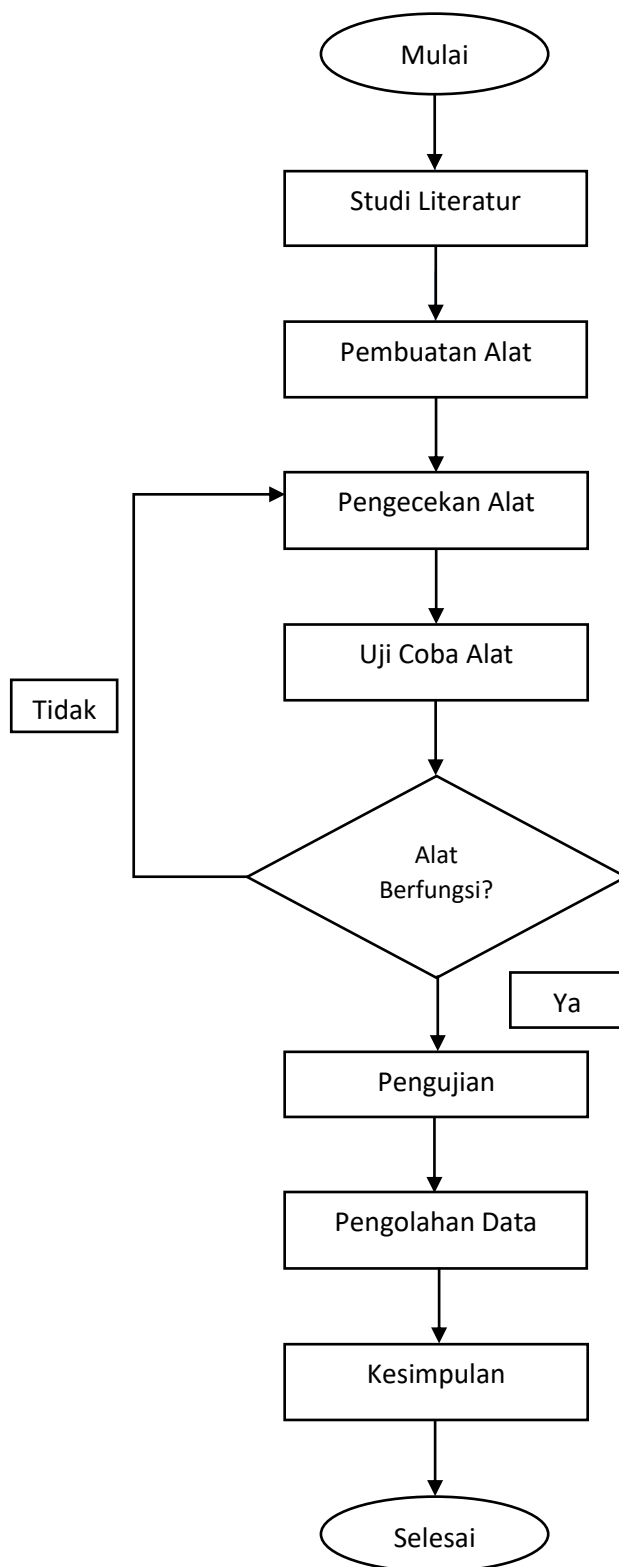
h. Neraca pegas

Neraca pegas digunakan untuk mengukur massa dan besar gaya atau berat suatu benda.



Gambar 3.17 Neraca pegas

3.3 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.18 Diagram alir penelitian

3.4 Tahap Pembuatan Turbin *Vortex* (Pusaran Air)

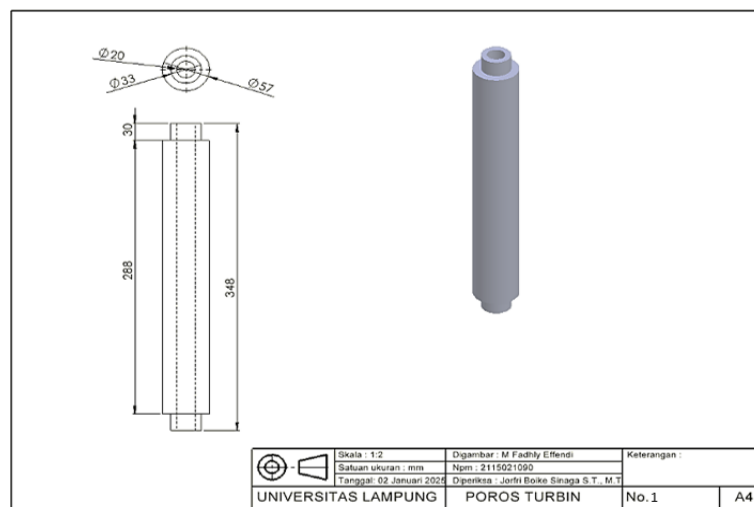
Tahapan pembuatan alat pengujian turbin *vortex* adalah sebagai berikut:

1. Tahap Persiapan

Tahap awal ini meliputi penelusuran literatur dan persiapan seluruh material serta peralatan yang diperlukan untuk proses pembuatan dan pengujian turbin *vortex*.

2. Tahap Pembuatan Sketsa

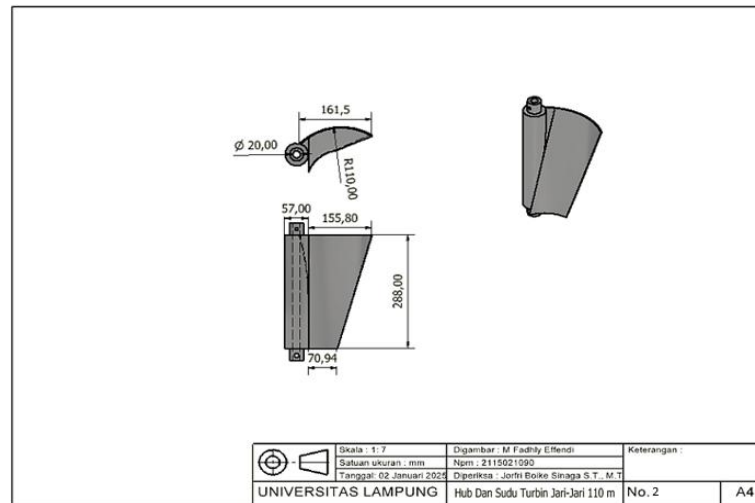
Tahap ini adalah pembuatan rancangan visual turbin *vortex* menggunakan *software solidworks*. Langkah pertama dalam perancangan sketsa adalah membuat bagian tengah (*hub*) dengan ukuran diameter terbesar 57 mm, diameter terkecil 33 mm, dan diameter lubang tengah (diameter dalam) sebesar 20 mm. Gambar 3.19 menampilkan Sketsa *hub* turbin, untuk memperjelas dimensi dan detail teknis, gambar lengkap disajikan kembali pada lampiran.



Gambar 3.19 Sketsa *hub* turbin

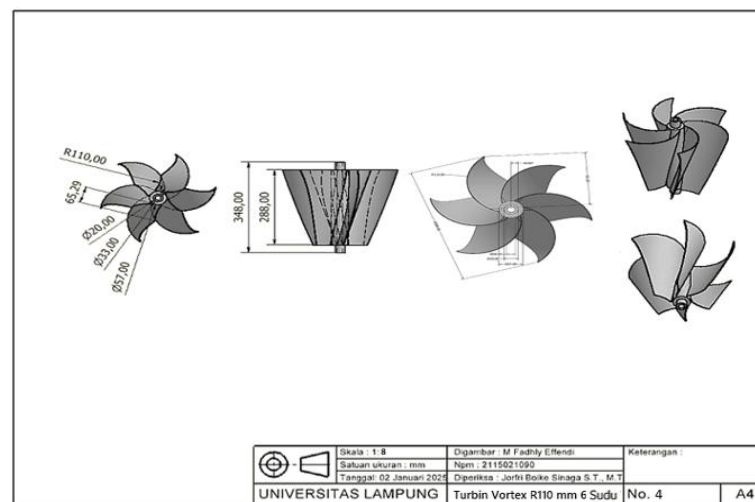
Selanjutnya adalah pembuatan sketsa sudu turbin pada jari-jari kelengkungan sudu 85 mm dengan tinggi sudu turbin 288 mm, lebar sudu bagian atas 162 mm dan lebar bagian bawah turbin 87 mm. Selanjutnya adalah pembuatan sketsa sudu turbin pada jari-jari kelengkungan sudu 110 mm dengan tinggi sudu turbin 288 mm, lebar sudu bagian atas 191 mm dan

lebar bagian bawah turbin 65 mm. Selanjutnya adalah pembuatan sketsa sudu turbin pada jari-jari kelengkungan sudu 145 mm dengan tinggi sudu turbin 288 mm, lebar sudu bagian atas 184 mm dan lebar bagian bawah turbin 94 mm. Gambar 3.20 menampilkan sketsa sudu turbin untuk memperjelas dimensi dan detail teknis, gambar lengkap disajikan kembali pada lampiran.



Gambar 3.20 Sketsa sudu turbin

Proses selanjutnya adalah pembuatan gambar *drawing* 2D turbin. Gambar 3.21 menampilkan *drawing* 2D turbin, untuk memperjelas dimensi dan detail teknis, gambar lengkap disajikan kembali pada lampiran.



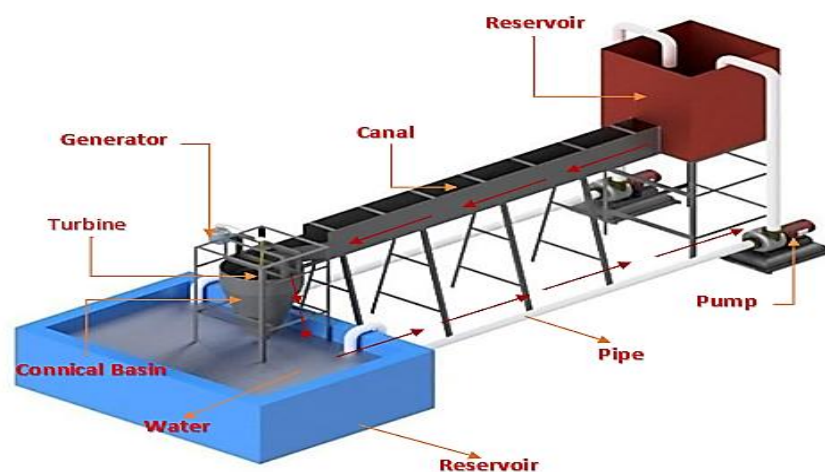
Gambar 3.21 *Drawing* 2D turbin

3. Tahap pembuatan turbin *vortex* (pusaran air)

Tahap ini adalah proses pembuatan fisik bagian tengah (*hub*) turbin *vortex* menggunakan pipa besi serta pembuatan sudu-sudu turbin. Langkah pertama dalam membuat *hub* adalah membubut pipa besi menjadi bentuk bertingkat dengan diameter terbesar 57 mm, diameter terkecil 33 mm, diameter lubang tengah 20 mm, dan tinggi keseluruhan 348 mm. Setelah itu, langkah berikutnya ialah memotong pelat menggunakan mesin gerinda yang akan digunakan sebagai sudu dengan cetakan sudu (*mal*) yang sudah ditentukan. Setelah kedua bagian selesai langkah selanjutnya ialah menyambungkan *hub* dengan sudu turbin menggunakan mesin las.

3.5 Pembuatan Sistem Alat Pengujian

Skema alat pengujian dapat dilihat pada gambar 3.22 Dimana komponen-komponen sistem pembangkit listrik turbin *vortex* terdapat pompa air untuk menaikkan air ke dalam tangki *reservoir* lalu dialirkan melewati saluran air menuju tangki sirkulasi, didalam tangki sirkulasi terdapat turbin yang memanfaatkan pusaran air gravitasi yang biasa disebut *water vortex* dimana disitu terjadi fenomena *water vortex* yang biasa disebut pemanfaatan energi air sistem pembangkit listrik turbin *vortex*.



Gambar 3.22 Desain skema model alat uji pembangkit listrik turbin *vortex*

3.6 Pengujian dan Pengambilan Data

Pengujian model turbin *vortex* dilakukan untuk memperoleh data pengujian sehingga diperoleh unjuk kerja turbin *vortex*. Adapun data yang akan diambil dalam pengujian turbin *vortex* di laboratorium adalah debit aliran air (l/s), putaran turbin (rpm), torsi turbin (Nm), dan *head vortex* (m). Langkah-langkah yang dilakukan dalam pengujian model turbin *vortex* adalah sebagai berikut:

1. Memasang turbin pada as poros menggunakan mur dan baut.
2. Memasang turbin kedalam tangki sirkulasi.
3. Pompa air dihidupkan untuk mengalirkan air dari bak penampungan ke dalam tanki *reservoir*.
4. Membuka *gate* saluran air pada tanki *reservoir* dengan menggunakan 3 variasi debit aliran air yaitu 8,84 L/s, 10,54 L/s, dan 10,80 L/s.
5. Mengukur debit pada setiap level ketinggian air dengan menggunakan ember yang sudah diukur volumenya dengan gelas ukur.
6. Mengukur torsi turbin dengan menggunakan sistem pengereman neraca pegas F_1 dan F_2 .
7. Memasukkan beban.
8. Mengukur tinggi aliran *vortex* dengan menggunakan meteran.
9. Mengukur putaran (rpm) pada turbin menggunakan *tachometer*.
10. Mencatat data hasil pengujian, data hasil pengujian akan disajikan dalam bentuk tabel pada Bab IV.

3.7 Pengolahan Data

Data yang diperoleh dari pengujian kemudian dihitung untuk menentukan daya *hidro* (P_h), daya turbin (P_t) dan efisiensi turbin (η_t). Daya *hidro* diperoleh dari data debit pada saluran air, yang kemudian dihitung menggunakan persamaan 2.3. Daya turbin diperoleh dari data torsi dan kecepatan sudut, yang kemudian dihitung menggunakan persamaan 2.4. Efisiensi turbin diperoleh melalui perbandingan antara daya turbin dan daya *hidro* yang kemudian dihitung dengan menggunakan persamaan 2.7.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Karakteristik unjuk kerja turbin *vortex* dipengaruhi oleh jari-jari kelengkungan sudu turbin dan debit aliran air.
2. Torsi maksimum sebesar 2,667 Nm diperoleh pada jari-jari kelengkungan sudu 110 mm dengan debit aliran 10,80 L/s pada putaran turbin 0 rpm. Kondisi ini menunjukkan bahwa jari-jari kelengkungan sudu berpengaruh terhadap kemampuan turbin menghasilkan torsi. Selain itu, peningkatan debit aliran terbukti meningkatkan gaya fluida yang mengenai sudu, sehingga torsi yang dihasilkan juga meningkat. Dengan demikian, jari-jari kelengkungan sudu dan debit aliran memiliki hubungan yang saling memengaruhi terhadap karakteristik torsi turbin *vortex*.
3. Daya poros maksimum terdapat pada turbin dengan jari-jari kelengkungan sudu 110 mm. Pada debit aliran 10,80 L/s dan putaran turbin 105,3 rpm, turbin menghasilkan daya poros sebesar 27,72 watt. Hal ini menunjukkan bahwa jari-jari kelengkungan sudu 110 mm memberikan kombinasi torsi dan kecepatan putaran yang paling optimal untuk menghasilkan daya maksimum.
4. Efisiensi terbaik terdapat pada turbin dengan jari-jari kelengkungan 110 mm sebesar 33,12% dengan menggunakan debit aliran 10,80 L/s pada putaran turbin 105,3 rpm. Turbin *vortex* dengan jari-jari kelengkungan 110 mm mampu mengarahkan aliran air lebih efektif sehingga mengurangi kehilangan energi, torsi meningkat, dan daya poros yang dihasilkan lebih besar, sehingga efisiensi turbin mencapai nilai maksimum.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan pada penelitian selanjutnya adalah :

1. Diharapkan pada penelitian berikutnya melakukan kajian eksperimental pengaruh jumlah sudu turbin *vortex* pada jari-jari kelengkungan 110 mm untuk memperoleh kombinasi desain yang menghasilkan efisiensi yang lebih optimal.
2. Diharapkan pengujian dapat diperluas dengan menghubungkan turbin ke generator untuk mengetahui kinerja sistem pembangkit listrik secara keseluruhan.
3. Diharapkan penelitian selanjutnya melakukan analisis numerik menggunakan metode CFD untuk memvisualisasikan aliran fluida di sekitar turbin dan membandingkan hasilnya dengan data eksperimen.
4. Diharapkan penelitian selanjutnya melakukan pengujian dengan variasi tinggi jatuh air dan debit yang lebih luas untuk memperoleh data performa turbin secara lebih menyeluruh.

DAFTAR PUSTAKA

- Bajracharya, T. R., Shakya, S. R., Timilsina, A. B., Dhakal, J., Neupane, S., Gautam, A., & Sapkota, A. (2020). *Effects of geometrical parameters in gravitational water vortex turbines with conical basin*. *Journal of Renewable Energy*, 2020, Article ID 5373784. <https://doi.org/10.1155/2020/5373784>.
- Christina, Y. (2022). Rancang Bangun Model Turbin *Vortex* Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Air Skala Laboratorium. (Skripsi). Universitas Lampung, Bandar Lampung.
- Dhakal, R., Nepal, A., Acharya, A., Kumal, B., Aryal, T., Williamson, S., and Devkota, L. (2017). *Technical and economic prospects for the site implementation of a gravitational water vortex power plant in Nepal*. In *2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA 2016): Proceedings of a meeting held 20-23 November 2016, Birmingham, United Kingdom* (pp. 1001-1006). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2016.7884485>
- Dhakal, S., Timilsina, A. B., Dhakal, R., Fuyal, D., Bajracharya, T. R., Pandit, H. P., Amatya, N., & Nakarmi, A. M. (2015). *Comparison of conical basin and cylindrical basin with optimum position of runner: Gravitational water vortex power plant*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Dietzel, Fritz., (1980), Turbin Pompa dan Kompresor. Terjemahan oleh Ir Dakso Sriyono, 1988, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Fernando, F.B. (2023). Kajian Ekperimental Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin *Vortex*. (Skripsi). Universitas Lampung, Bandar Lampung.
- Gibran, Syahril Gultom, Lubis, A. Z., & Pramio G. Sembiring. (2017). Rancang Bangun Turbin *Vortex* Dengan Casing Berpenampang Lingkaran Yang Menggunakan Sudu Diameter 46 Cm Pada 3 Variasi Jarak Antara Sudu Dan Saluran Keluar. *Dinamis: Scientific Journal of Mechanical Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 36-46, Jun. 2017, doi: 10.32734/dinamis.v5i2.7049.

- Hidayat Wahyu. 2019. Prinsip Kerja dan Komponen-komponen Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA). Universitas Jendral Achmad Yani. Jurnal Unjani Vol.3, No.1.
- Husen, A. 2021. Uji Eksperimental Bentuk Sudu-Sudu Pada Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Air Turbin Pelton. *Presisi*, 23(2), 32–42.
- Ikhsan, H. K., Nugroho, R., Wijaya, D. G., & Pamuji, D. S. (2020, Oktober). Kajian teknologi: Parameter desain dan pemodelan numerik pada turbin *vortex* berbasis gravitasi. *Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi (ReTII) XV*, 140–148. Institut Teknologi Nasional Yogyakarta.
- Kueh, T. C., Beh, S. L., Ooi, Y. S., dan Rilling, D. G. 2017. *Experimental study to the influences of rotational speed and blade shape on water vortex turbine performance*, *J. Phys.: Conf. Ser.* 822.
- Maika, N., Lin, W., dan Khatamifar, M. 2023. *A Review of Gravitational Water Vortex Hydro Turbine Systems for Hydropower Generation*, *Energies*, 16(14), 5394.
- Munson, Bruce, R., Young, Donald, F., Okiishi, Theodore, H. 2006. *Fundamentals Of Fluid Mechanics Fifth Edition*. Jhon Wiley & Sons Inc.
- Pamuji, D. S., Nugroho, H. L., dan Sugati, D. 2021. Studi Numerik Perbandingan Kinerja dan Medan Aliran Turbin *Vortex* Gravitasi dengan Tipe Sudu Lengkung *Backward* dan *Forward*. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 16(1), 48. <https://doi.org/10.32497/jrm.v16i1.2057>.
- Prasetyo, H. B., dan Rahmadian, R. 2023. Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Menggunakan Turbin *Vortex*. *Jurnal Teknik* <https://doi.org/10.26740/jte.v12n2.p65-73>.
- Rahman, M. M., Tan, J. H., Fadzlita, M. T., & Wan Khairul Muzammil, A. R. (2017). *A review on the development of gravitational water vortex power plant as alternative renewable energy resources*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 217, 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/217/1/012007>.
- Sinaga, J. B., Sinaga, D., Yonanda, A., Topan, T., & Bahtera, G. (2024). Pengaruh bentuk sudu terhadap efisiensi turbin air gravitasi aliran *vortex*. *TURBO: Jurnal Program Studi Teknik Mesin UM Metro*, 13(2), 574–582. <https://doi.org/10.24127/trb.v13i2.3689>.
- Sinaga, J. B., Irsyad, M., Yonanda, A., Ibrahim, G. A., Sinaga, D, 2024. *The effects of blade height on the efficiency of gravitational water vortex turbine*. *Engineering and Technology Journal*, vol. 9, no. 4, pp. 3717–3721. 2024, <https://doi: 10.47191/etj/v9i04.07>.
- Suarda, M., Rika, P., Wahyuni, A., Ketut, N., dan Dewi, R. 2023. Kajian Parameter Optimal Desain Turbin *Vortex* Pada Head Sangat Rendah. Seminar Nasional Sains Dan Teknologi (SENASTEK), November, 7–9.