



DESAIN BANGUNAN TURBIN PIKOHIDRO DENGAN TENAGA AIR IRIGASI

ADLAN



**DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL DAN LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNOLOGI PERTANIAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2022**



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Desain Bangunan Turbin Pikohidro dengan Tenaga Air Irigasi” adalah karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka dibagian akhir tesis ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, September 2022

Adlan
F451194011

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



RINGKASAN

ADLAN. Desain Bangunan Turbin Pikohidro dengan Tenaga Air Irigasi.

Dibimbing oleh SATYANTO KRIDO SAPTOMO dan PRASTOWO.

Jaringan irigasi memiliki potensi sebagai pembangkit listrik tanpa emisi karbon. Penelitian ini bertujuan mendesain bangunan turbin pikohidro dengan tenaga air irigasi. Desain bangunan turbin pikohidro tenaga air irigasi telah dapat didesain dengan turbin reaksi kaplan yang terdiri dari desain turbin tunggal dengan daya 24,5 kWh/hari dan desain multi turbin dengan daya 122,75 kWh/hari. Kecepatan aliran irigasi berkisar antara 0,4 m/s – 0,74 m/s dengan potensi daya 1,4 kWh – 655,1 kWh. Hasil simulasi menunjukkan tipe Kaplan adalah turbin terbaik yang dapat digunakan pada desain bangunan turbin pikohidro tenaga irigasi. Pada kondisi debit *inlet* 18 l/s dan ketinggian terjun 0,5 m bangunan turbin pikohidro menghasilkan putaran poros turbin sebesar 106 rpm, tegangan 15,6 volt dan arus 1,1 ampere. Bangunan turbin pikohidro sebaiknya dipertimbangkan sebagai bagian dari bangunan terjun aliran irigasi untuk meredam energi.

Kata Kunci : Jaringan Irigasi, Pikohidro, Turbin, Daya

SUMMARY

ADLAN. Design of Pico Hydro Turbine Structure Utilizing Hydropower of Irrigation. Supervised by SATYANTO KRIDO SAPTOMO and PRASTOWO .

Irrigation networks have a potential to generate electricity without carbon emissions. This study aims to design of pico hydro turbine structure utilizing hydropower of irrigation. The pico hydro turbine structure has been designed with a Kaplan reaction turbine consisting of the single turbine design with power of 24.5 kWh/day and multi-turbine design with power of 122.75 kWh/day. Irrigation flow rates range from 0.4 m/s – 0.74 m/s with power potential of 1.4 kWh – 655.1 kWh. The simulation results show the Kaplan type is the best turbine that can be used in the design of pico hydro turbine structure. At the condition of the inlet discharge of 18 l/s and a waterfall height of 0.5 m the pico hydro turbine structure produces a turbine shaft rotation of 106 rpm, voltage of 15.6 volts and current of 1.1 amperes. The pico hydro turbine structure should be considered as part of drop structures of irrigation canal.

Keywords: Irrigation Networks, Pico hydro, Turbine, Power

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2022
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.



DESAIN BANGUNAN TURBIN PIKOHIDRO DENGAN TENAGA AIR IRIGASI

ADLAN

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister Teknik pada
Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan

**DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL DAN LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNOLOGI PERTANIAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2022**



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Tim Penguji pada Ujian Tesis:

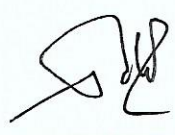
1. Dr. Ir. Moh. Yanuar Jarwadi Purwanto, MS, IPU



Judul Tesis : Desain Bangunan Turbin Pikohidro dengan Tenaga Air Irigasi.
Nama : Adlan
NIM : F451194011

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Dr. Satyanto Krido Saptomo, S.TP., M.Si., IPM



Pembimbing 2:
Dr. Ir. Prastowo, M.Eng

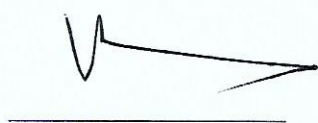


Diketahui oleh

Ketua Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan
Dr. Satyanto Krido Saptomo, S.TP., M.Si., IPM
NIP. 197304112005011002



Dekan Fakultas Teknologi Pertanian
Prof. Dr. Ir. Slamet Budijanto, M. Agr
NIP. 196105021986031002



Tanggal Ujian: 05 Desember 2022

Tanggal Lulus: 06 JAN 2023

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



PRAKATA

Tulisan ini diharapkan bisa menjadi pendukung dalam pengembangan keilmuan tentang perancangan pembangkit listrik tenaga air irigasi, apapun yang didapatkan dalam tulisan ini mungkin tidak akan memuaskan pembaca, akan tetapi saya pastikan apapun yang terdapat dalam tulisan ini adalah sebuah kejujuran dan memang begitu nyatanya. Tulisan ini saya pesembahkan untuk siapapun yang mencintai ilmu pengetahuan.

Terima kasih saya ucapkan kepada Allah yang Maha Kuasa yang telah memberikan kesempatan kepada saya untuk menempuh Pendidikan di IPB. Alhamdulillah di IPB saya telah dipertemukan dengan dosen – dosen yang sangat luar biasa, khususnya kedua pembimbing saya Bapak Dr. Satyanto Krido Saptomo, S.TP., M.Si., IPM dan Bapak Dr. Ir. Prastowo, M.Eng. Saya berharap bekal ilmu ini dapat digunakan sebaik mungkin didalam membantu orang banyak.

Kepada keluarga saya, khususnya kedua orang tua saya Rusman Teguh dan Laila Sari, alhamdulillah kalian telah sukses menyekolahkan anak kalian sampai tahap ini, meski kalian hanya berpendidikan SMA dan SMP, semoga harapan kalian bisa terwujud untuk saya. Terima kasih juga untuk istriku tercinta Anisa Hasanah yang telah bersabar menunggu untuk proses kelulusan ini, terima kasih juga untuk abang dan adik-adikku atas semua support yang kalian berikan.

Selanjutnya saya mengucapkan terima kasih kepada teman-teman saya yang telah menemani saya selama perjalanan kuliah, serta bersedia bertukar pikiran. Perjalanan kita mungkin hanya sampai masuk dan lulus kuliah tapi pertemanan kita saya harapkan bisa untuk selamanya, maaf jika saya ada salah pada proses perkuliahan ini, begitu juga kepada civitas akademisi terima kasih atas semua bantuannya dan mohon maaf jika saya merepotkan kalian.

Terakhir ada satu kutipan yang saya dapatkan selama ini “belajarlah dengan ikhlas, meskipun itu hanya menulis atau mengucapkan huruf A”

Bogor, Desember 2022

Adlan

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR LAMPIRAN	v
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	2
1.5 Kerangka Penelitian	2
II. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro Irigasi (PLTPI)	4
2.2 Karakteristik Irigasi	4
2.3 Klasifikasi Pembangkit Listrik Tenaga Hidro	7
2.4 Perancangan Bangunan Turbin	7
2.5 Pendekatan Analisis	11
III. METODOLOGI	13
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian	13
3.2 Rancangan Penelitian	13
3.3 Komponen Perancangan	18
3.4 Prosedur Pengujian	20
3.5 Analisis Data	20
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	21
4.1 Karakteristik Saluran Irigasi	21
4.2 Simulasi <i>Computational Fluid Dynamics (CFD)</i> Turbin	22
4.3 Analisis Kecepatan dan Energi Aliran	27
4.4 Optimasi Posisi Turbin dan Saluran Bangunan Turbin	29
4.5 Desain Bangunan Turbin dan Hasil Uji Bangunan Turbin	32
V. SIMPULAN DAN SARAN	35
5.1 Simpulan	35
5.2 Saran	35
DAFTAR PUSTAKA	36
RIWAYAT HIDUP	43



DAFTAR TABEL

1.	Klasifikasi Pembangkit Daya Listrik Hidro	7
2.	Data Acuan Perancangan melalui sajian data Luas, kedalaman terjun, kecepatan aliran, Debit dan Tipe Turbin Terhadap Jenis Saluran.....	16
3.	Difinisi Operasional	18
4.	Alat Pengukuran dan pengujian	19
5.	Alat Pendukung	19
6.	Bahan Penelitian.....	19
7.	Karakteristik Saluran Irigasi sebagai Pembangkit Listrik.....	21
8.	Hasil Pengukuran Kecepatan dan Perhitungan dan Daya Aliran Irigasi.....	27
9.	Perbandingan nilai kecepatan aliran irigasi Manning, Chazy dan <i>current meter</i>	29
10.	Hasil hitungan menggunakan persamaan Bernoulli	31
11.	Nilai Mayor Losses pada pipa bangunan turbin pikohidro	31
12.	Nilai Minor losses pada pipa bangunan turbin pikohidro	31
13.	Spesifikasi Teknis Desain Bangunan Turbin Pikohidro Kedalaman Terjun 0,5 m dengan diameter turbin 5,5 inci	33
14.	Potensi Daya bangunan turbin pikohidro	39

DAFTAR GAMBAR

1.	Kerangka Pemikiran Penelitian	3
2.	Saluran-Saluran Primer dan Sekunder.....	5
3.	Bangunan Terjun Tegak	6
4.	Klasifikasi <i>Water Turbine</i>	10
5.	Diagram Alir Pelaksanaan Penelitian.....	17
6.	Turbin yang digunakan.....	18
7.	Diagram Prosedur Pengujian.....	20
8.	Hasil simulasi desain bangunan turbin impuls	23
9.	Hasil simulasi desain bangunan turbin impuls (<i>Side View</i>)	23
10.	Hasil simulasi desain bangunan turbin <i>Helix</i>	24
11.	Hasil simulasi desain bangunan turbin <i>Helix (Side View)</i>	24
12.	Hasil Simulasi Desain Bangunan Turbin Kaplan.....	25
13.	Hasil Simulasi Desain Bangunan Turbin Kaplan (<i>Side View</i>)	25
14.	Pengukuran Sub-Kritis dan Super-Kritis (<i>Side View</i>)	27
15.	Grafik Kecepatan dan Daya yang dihasilkan oleh Energi Aliran Irigasi	28
16.	Sketsa Saluran pada Bangunan Terjun (<i>Side View</i>)	30
17.	Hasil simulasi rancangan optimasi posisi turbin	30
18.	Desain satu bangunan turbin pikohidro dengan tenaga air irigasi.....	32
19.	Desain bangunan multi turbin pikohidro dengan tenaga air irigasi.....	32
20.	Desain bangunan turbin tunggal piko-hidro dengan tenaga air irigasi 3D.....	39
21.	Desain bangunan multi-turbin piko-hidro dengan tenaga air irigasi 3D	39
22.	Pemasangan Trasmisi, Turbin, dan Generator	40
23.	Pemasangan komponen Elektronika Pikohidro.....	40
24.	Pemasangan bangunan pikohidro untuk pengujian	41

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

@Hak cipta milik IPB University
 IPB University

25. Pengukuran Daya yang dihasilkan pada Pengujian	41
26. Pengukuran Kecepatan aliran menggunakan Current Meter	42

DAFTAR LAMPIRAN

1. Tabel Potensi Daya dan Desain Bangunan Turbin	39
2. Dokumentasi Penelitian	40

@Hak cipta milik IPB University

IPB University





@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sumber penghasil energi dapat dibedakan menjadi energi terbarukan dan tidak terbarukan, sebagian besar pasokan energi di Indonesia masih menggunakan energi dari turunan fosil seperti minyak bumi, batu bara dan gas, termasuk kebutuhan energi di sektor Pertanian. Bahan bakar (energi tidak terbarukan) juga digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik, sehingga memiliki dampak emisi karbon yang besar terhadap lingkungan. Berdasarkan dokumen *NDC* yang disampaikan kepada *United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)* Indonesia memiliki target penurunan emisi sebesar 41% di tahun 2030, sedangkan permintaan listrik di Indonesia pada tahun 2025 - 2050 akan tumbuh sekitar 11-12% dan 6-7% pada sektor pertanian (Suharyati *et al.* 2019).

Energi terbarukan dapat membantu dalam memenuhi kebutuhan energi tanpa dampak emisi karbon, diantaranya memanfaatkan energi matahari dengan panel surya, memanfaatkan energi angin menggunakan kincir angin dan memanfaatkan energi air menggunakan kincir air. Sektor pertanian yang memiliki potensi pembangkit listrik salah satunya yaitu lahan pertanian yang memiliki saluran pengairan (Irigasi). Aliran air irigasi pada umumnya memiliki kecepatan aliran antara 0,4 – 0,7 m/dt yang debitnya tergantung dari luas hamparan lahan operasional (Effendy 2012; Kementerian PUPR 2013a).

Pembangkit energi listrik tenaga air umumnya menggunakan turbin dan motor listrik (generator) sebagai pengkonversi energi. Poros dari turbin akan menghasilkan energi mekanik yaitu berupa gerak berputar, dimana semakin cepat putaran pada tekanan tertentu maka semakin besar energi yang dapat dihasilkan, kemudian gerak putar ini selanjutnya diubah menjadi energi listrik dengan menggunakan motor listrik, oleh sebab itu dibutuhkan sebuah rancangan turbin yang baik pada pembangkit listrik tenaga air irigasi. Peneliti disini hendak melakukan perancangan pikohidro pada aliran irigasi agar dapat menjadi energi listrik.

Rekayasa bangunan pikohidro tenaga irigasi dapat dilakukan dengan mempertimbangkan jenis turbin terhadap karakteristik saluran irigasi, dimana penelitian ini lebih memfokuskan pada pengoptimalan perancangan bangunan pikohidro terhadap kemampuan turbin di setiap jenis karakteristik aliran irigasi. Energi aliran air umumnya dipengaruhi oleh laju aliran air, debit aliran air, dan kedalaman terjun. Melalui pertimbangan ini maka diperlukan pemilihan jenis turbin yang sesuai untuk digunakan pikohidro tenaga air irigasi, adapun jenis turbin pikohidro tenaga air irigasi yang menjadi pertimbangan yaitu turbin *impuls (Michell-Banki)*, turbin Kaplan, dan turbin *Helix*, selanjutnya dari ketiga jenis turbin ini akan diseleksi berdasarkan pertimbangan karakteristik saluran irigasi dan hasil simulasi.

Menentukan desain bangunan turbin yang baik dalam merancang pikohidro tenaga air irigasi ini merupakan kunci dari terwujudnya pemanfaatan air irigasi sebagai sumber energi terbarukan yang dapat mendukung kebutuhan energi listrik tanpa emisi karbon, khususnya pada lahan pertanian. Kita ketahui bahwa menerapkan pembangkit listrik tenaga air dengan menggunakan aliran irigasi



masih kurang diminati karena nilai potensi dayanya masih jarang dilakukan pengkajian, sehingga sulit dalam memanfaatkan irigasi menjadi energi listrik. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi batu loncatan dalam mendukung terwujudnya pembangkit listrik tenaga air irigasi.

1.2 Perumusan Masalah

Melalui uraian pada latar belakang, maka rumusan masalah pada penelitian ini yaitu bagaimana mendesain bangunan turbin pikohidro dengan pertimbangan jenis turbin dan keberagaman karakteristik aliran air irigasi, hal ini untuk mempertimbangkan kondisi optimal desain dalam mengkonversi tenaga air menjadi energi listrik.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Tujuan Umum

Mendesain bangunan turbin pikohidro dengan tenaga air irigasi, serta analisis hubungan antara aliran irigasi dan daya yang dihasilkan pikohidro.
2. Tujuan Khusus
 - a) Melakukan analisis terhadap karakteristik aliran irigasi dan daya hidrolis yang dihasilkan oleh saluran irigasi.
 - b) Melakukan simulasi terhadap tiga jenis turbin pada desain bangunan turbin pikohidro.
 - c) Melakukan uji fungsional dan uji kinerja terhadap salah satu jenis turbin pada desain bangunan turbin pikohidro.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Manfaat akademis

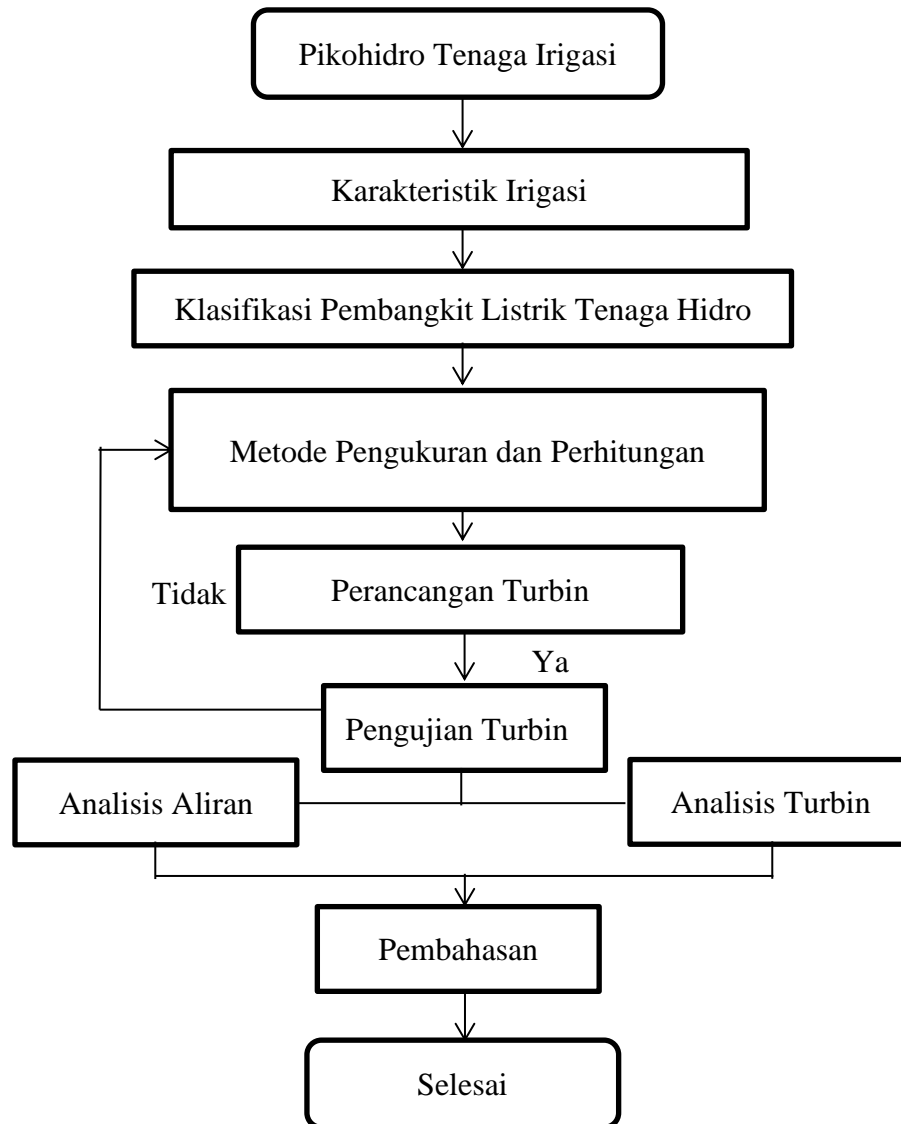
Manfaat akademis dari penelitian ini, yaitu dapat menunjang penelitian terkait rancangan pikohidro pada jaringan irigasi melalui gagasan informasi yang didapatkan mengenai desain bangunan turbin pikohidro yang telah dilakukan.
2. Manfaat praktis

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan sebuah solusi dari pemanfaatan energi hidrolis pada jaringan irigasi yang masih perlu pengkajian lebih lanjut sebagai pembangkit listrik, oleh sebab itu dengan adanya penelitian ini kedepannya dapat menjadi bagian dari terwujudnya pemanfaatan energi hidrolis pada saluran irigasi sebagai pembangkit listrik, seperti penerangan, *USB charging station*, dst.

1.5 Kerangka Penelitian

Turbin pikohidro dengan tenaga air irigasi memiliki prinsip kerja yaitu memanfaatkan energi hidrolis pada saluran irigasi sebagai sumber tenaga putar turbin. Air kemudian memutar turbin yang menghasilkan daya listrik dari motor

listrik (generator). Desain bangunan turbin pikohidro selanjutnya dilakukan pengukuran, perhitungan, analisis terhadap karakteristik irigasi, dan daya yang dihasilkan irigasi.



Gambar 1. Kerangka Pemikiran Penelitian

II. TINJAUAN PUSTAKA

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) adalah suatu sistem pembangkit listrik yang biasanya terintegrasi dengan memanfaatkan energi hidrolis untuk memutar turbin yang kemudian akan diubah menjadi tenaga listrik oleh motor listrik (generator) (Dwi Irawan 2014). Pembangkit listrik tenaga air tidak menimbulkan peningkatan emisi karbon yang dapat merusak lingkungan (Siswanto *et al.* 2016), selain mikrohidro dan minihidro ada juga pikohidro dimana fungsionalitas lain dari pembangkit listrik pikohidro yaitu sebagai pengurangan laju aliran air irigasi (peredam aliran), khususnya saat terjadi terjunan (Du *et al.* 2017).

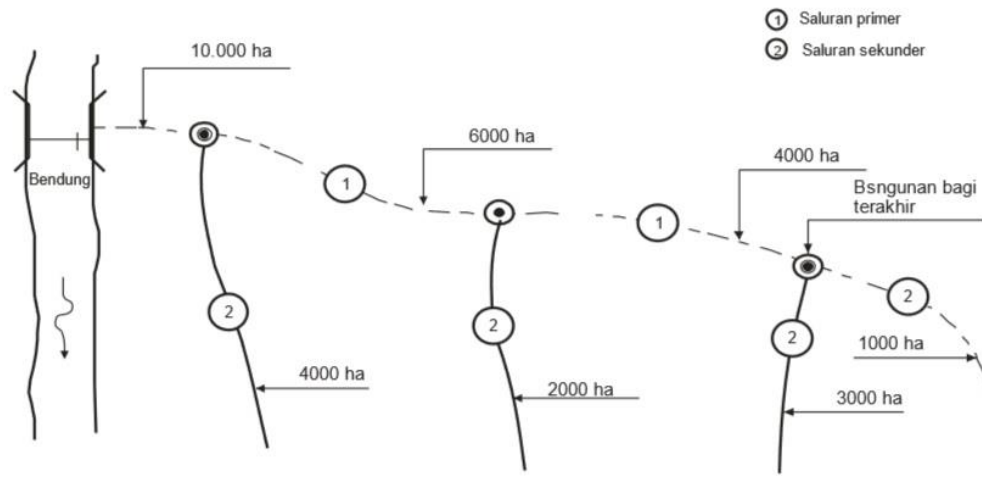
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro Irigasi (PLTPI)

Mikrohidro, minihidro, dan pikohidro adalah istilah yang digunakan untuk instalasi pembangkit listrik yang menggunakan energi air (Rompas 2011), dimana energi dari aliran air (hidrolis) diubah menjadi energi mekanis, kemudian energi mekanis ke listrik (Gómez-Llanos *et al.* 2018). Pembangkit listrik tenaga pikohidro irigasi ini istilah baru yang dikembangkan oleh peneliti, dimana pembangkit listrik tenaga pikohidro yang menggunakan tenaga air irigasi secara umum masih jarang terdengar, seperti diketahui bahwa saluran irigasi memiliki kecepatan aliran air yang relatif kecil untuk memutar turbin. (Sukamta dan Kusmantoro 2013).

Kondisi air yang bisa dimanfaatkan sebagai sumber daya (*resources*) penghasil listrik diantaranya memiliki kapasitas aliran dan ketinggian tertentu (Rompas 2011). Beberapa sistem tenaga air diklasifikasikan sebagai sistem tenaga mikrohidro ketika kapasitas pembangkit energi kurang dari 100 kW (Nasir 2013), sedangkan pembangkit listrik yang kurang dari 5kW disebut pikohidro. Sistem tenaga mikrohidro adalah sumber daya yang relatif kecil yang dapat digunakan untuk memasok daya ke unit pengguna skala kecil, yang tidak tergantung pada jaringan pasokan listrik umum, sehingga pembangkit listrik pikohidro lebih kecil lagi (Jawahar dan Michael 2017).

2.2 Karakteristik Irigasi

Jaringan irigasi utama terdiri atas saluran primer, sekunder, dan tersier. Saluran primer adalah saluran yang membawa air dari bendung ke saluran sekunder dan ke petak-petak tersier yang diairi. Batas ujung saluran primer adalah pada bangunan bagi saluran primer yang terakhir, sedangkan batas ujung saluran sekunder adalah pada bangunan sadap saluran sekunder terakhir.



Sumber : Kementerian PUPR (2013b)
Gambar 2. Saluran-Saluran Primer dan Sekunder

Saluran tersier membawa air dari bangunan sadap ke dalam petak tersier lalu ke saluran kuarter. Batas ujung saluran ini adalah bok bagi kuarter yang terakhir. Sebuah petak tersier terdiri atas sejumlah sawah dengan luas keseluruhan yang idealnya 50 ha, tetapi dalam keadaan tertentu masih bisa ditolerir sampai seluas 75 ha (Kementerian PUPR 2013c). Perlunya batasan luas petak tersier yang ideal agar pembagian air di saluran tersier lebih efektif dan efisien hingga mencapai lokasi sawah terjauh.

Petak tersier dibagi menjadi petak-petak kuarter, masing-masing seluas 8-15 ha (Kementerian PUPR 2013c). Panjang saluran tersier sebaiknya kurang dari 1,5 km, tetapi dalam kenyataan kadang-kadang panjang saluran ini mencapai 2,5 km. Panjang saluran kuarter lebih baik dibawah 0,5 km, tetapi prakteknya kadang-kadang sampai 0,8 km. Bangunan pengatur diperlukan di tempat-tempat yang tinggi muka air saluran dipengaruhi oleh bangunan terjun atau got miring (*chute*). Aliran yang melalui bangunan ini adalah aliran superkritis.

2.2.1 Bangunan Terjun

Bangunan terjun dipakai apabila kemiringan medan pada daerah irigasi lebih besar daripada kemiringan saluran dan diperlukan penurunan muka air (Kementerian PUPR 2013d). Andaikan suatu potongan saluran dengan panjang L dan kemiringan i serta muka air hulu yang diinginkan (H_{hulu}) dan muka air hilir (H_{hilir}) maka jumlah kehilangan tinggi energi pada bangunan terjun adalah:

$$Z = H_{hulu} - H_{hilir} - I \times L \dots\dots\dots \{ 1 \}$$

Perencanaan bangunan terjun harus sederhana, tapi bangunan harus kuat. Tipe biasa yang dipakai di saluran tersier adalah bangunan terjun tegak. Bangunan ini dipakai untuk terjun kecil ($Z < 100$ cm) dan debit kecil.

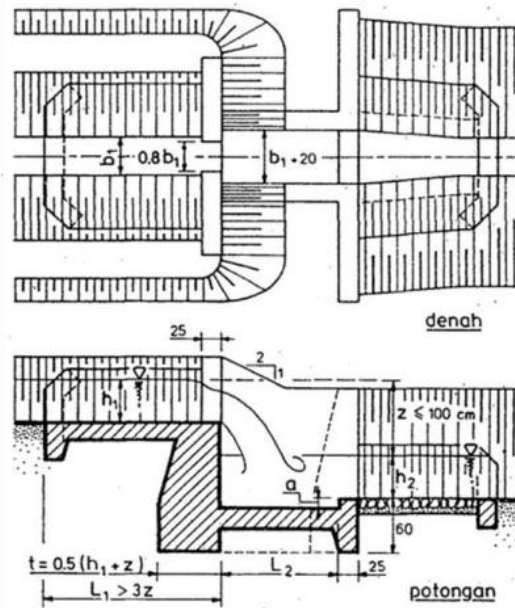
1) Bangunan Terjun Tegak

Bangunan terjun tegak sangat berpengaruh terhadap kedalaman terjun dan debit saluran, dimana kemampuan hidrolis tergantung pada kondisi kedalaman terjun dan perubahan debit. Bangunan terjun sebaiknya tidak dipakai apabila

perubahan tinggi energi, melebihi 1,5 m, karena aliran yang jatuh dari bangunan terjun akan terkena lantai yang mengakibatkan luapan dan turbulensi (pusaran air) di dalam kolam luapan, sehingga terkadang diperlukan bangunan peredam setelah bangunan terjun. Bangunan terjun dengan bidang tegak sering dipakai pada saluran induk dan sekunder, bila tinggi terjun tidak terlalu besar.

Menurut Perencanaan Teknis Direktorat Irigasi (1980) dalam Kementerian PUPR (2013d) tinggi terjun tegak dibatasi sebagai berikut:

- 1) Tinggi terjun maksimum 1,50 meter untuk $Q < 2,50 \text{ m}^3/\text{dt}$.
- 2) Tinggi terjun maksimum 0,75 meter untuk $Q > 2,50 \text{ m}^3/\text{dt}$



Sumber : Kementerian PUPR (2013d)
Gambar 3 Bangunan Terjun Tegak

2) Bangunan Terjun Miring

Bangunan terjun miring dibuat securam mungkin dan relatif pendek pada bagian permukaan belakang. Jika peralihan ujung runcing dipakai di antara permukaan pengontrol dan permukaan belakang (hilir), disarankan untuk memakai kemiringan yang tidak lebih curam dari 1:2, alasannya adalah untuk mencegah pemisahan aliran pada sudut miring.

2.2.2 Got Miring

Got miring dibuat apabila trase saluran melewati ruas medan dengan kemiringan yang tajam dengan jumlah perbedaan tinggi energi yang besar. Got miring berupa potongan saluran yang diberi pasangan (*lining*) dengan aliran superkritis, dan umumnya mengikuti kemiringan medan alamiah, akan tetapi pada medan terjal yang beda tinggi energi bernilai besar harus ditanggulangi dalam jarak pendek dan saluran tersiernya mengikuti kemiringan medan. Got miring ini terdiri dari bagian masuk, bagian peralihan, bagian normal dan kolam olak (Kementerian PUPR 2013d).

Apabila tipe aliran turbulen di saluran berubah dari aliran superkritis menjadi subkritis, maka akan terjadi loncatan air. Loncatan air merupakan salah

satu contoh bentuk aliran berubah cepat (*rapidly varied flow*). Aliran di bagian hulu sebelum terjunan adalah subkritis sedang setelah melewati titik aliran kritis adalah superkritis. Di antara kedua tipe aliran tersebut terdapat daerah transisi dimana loncat air terjadi, jika bilangan *Froude* aliran (F_1), kedalaman aliran (y_1) dan kedalaman hilir (y_2), memenuhi persamaan sebagai berikut (R. A. Dita Nurjanah 2014):

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) \dots\dots\dots \{ 2 \}$$

Suatu loncatan hidrolis akan terbentuk pada saluran, jika bilangan *Froude* aliran (F_1), kedalaman aliran (y_1), dan kedalaman hilir (y_2), memenuhi persamaan sebagai berikut (R. A. Dita Nurjanah 2014):

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{(g \cdot h)}} \dots\dots\dots \{ 3 \}$$

2.3 Klasifikasi Pembangkit Listrik Tenaga Hidro

Berikut ini disampaikan klasifikasi pembangkit listrik hidro secara umum berdasarkan daya yang dihasilkannya:

Tabel 1. Klasifikasi Pembangkit Daya Listrik Hidro

Klasifikasi Pembangkit	Daya
<i>Microhydro</i>	100 kW < x < 1 MW
<i>Minihydro</i>	5 – 100 kW
<i>Picohydro</i>	< 5 kW

Sumber : (Jamali 2014)

Klasifikasi pembangkit listrik tenaga air dapat dikategorikan berdasarkan kapasitas pembangkit listrik dan ukuran pembangkit listrik tenaga air yang digunakan, *small hydropower* (SHP), umumnya bervariasi antara 2 dan 25 MW, dimana 10 MW adalah nilai yang paling banyak diterima. Sedangkan, *Microhydro* di antara 5–1000 kW (MHP), dan *Picohydro* hingga 5 kW (PHP) (Larentis *et al.* 2010; Haidar *et al.* 2012).

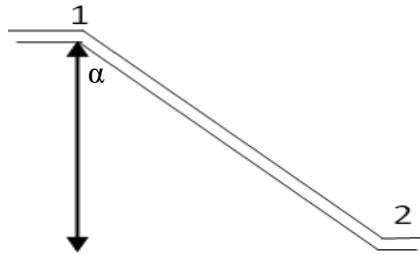
2.4 Perancangan Bangunan Turbin

Turbin air merupakan salah satu peralatan utama selain generator. Turbin air mengkonversikan energi dari energi air menjadi energi mekanik pada putaran poros turbin, poros tersebut akan memutar generator. Energi mekanis diubah dengan motor listrik (generator) menjadi tenaga listrik. Pemilihan turbin pada suatu pembangkit didasarkan pada beberapa pertimbangan antara lain *head* dari lokasi yang bersangkutan, daya yang ingin dibangkitkan, variasi debit air yang mengalir, serta kecepatan putaran turbin yang diinginkan untuk memutar generator.

Berdasarkan prinsip kerja turbin air dalam mengubah energi dibedakan menjadi dua jenis yaitu turbin *impuls* dan turbin reaksi. Turbin *impuls* adalah energi potensial air diubah menjadi energi kinetik pada aliran air. Aliran air yang mempunyai kecepatan membentur sudu turbin. Setelah membentur sudu, arah kecepatan aliran berubah sehingga terjadi perubahan momentum (*impuls*). Sedangkan pada turbin reaksi, konversi energi tidak hanya dengan energi kinetik dari kecepatan air saat menumbuk sudu turbin namun terjadi pula tambahan energi akibat adanya

perbedaan tekanan pada sudu bergerak turbin. Perhitungan daya hidrolis pada turbin perlu melakukan pengamatan terhadap energi yang bekerja pada turbin pembangkit listrik, pengamatan dapat menggunakan persamaan Bernoulli yang terlihat sebagai berikut (Berlamont 1986):

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{Konstan} \dots\dots\dots \{ 4 \}$$



$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 \dots\dots\dots \{ 5 \}$$

Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan tekanan pada titik 2 yaitu:

$$p_2 = \rho gh_1 - \frac{1}{2}\rho v_2^2 \dots\dots\dots \{ 6 \}$$

Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan daya hidrolis yaitu:

$$P = \left(p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \right) Q \dots\dots\dots \{ 7 \}$$

$$P = Q \cdot \rho \cdot g \cdot h_1 \dots\dots\dots \{ 8 \}$$

Persamaan 8 berlaku terhadap aliran jatuh tegak, apabila saluran miring maka dikalikan oleh faktor pengali sudut kemiringan (cos α).

Keterangan:

- P : Daya Hidrolis (Watt)
- h_1 : Kedalam terjun pada titik 1 (m)
- h_2 : Kedalam terjun pada titik 2 = 0 (m)
- g : Gravitasi ($\frac{m}{dt^2}$)
- ρ : Massa Jenis Air ($\frac{kg}{m^3}$)
- v_1 : Kecepatan pada titik 1 = 0 ($\frac{m}{dt}$)
- v_2 : Kecepatan pada titik 2 ($\frac{m}{dt}$)
- p : Tekanan Statis = 101325 (Pa)
- p_1 : Tekanan pada titik 1 = 101325 (Pa)
- p_2 : Tekanan Pada titik 2 (Pa)
- Q : Debit ($\frac{m^3}{dt}$)

Pesamaan Bernoulli digunakan pada saluran tertutup atau pipa, untuk daya hidrolis pada saluran terbuka dapat menggunakan persamaan berikut :

Daya kinetik, dimana kondisi saluran tanpa terjunan (Muliawan dan Yani 2016):

$$P = \frac{Q \cdot \rho \cdot v^2}{2} \dots\dots\dots \{ 9 \}$$

Jika kondisi dengan terjunan menggunakan persamaan 8, dimana pada kondisi saluran terbuka biasanya tidak ada *headloss*. Daya yang dihasilkan adalah hasil kali dari tinggi jatuh dan debit air. Daya yang keluar dari generator dapat diperoleh dari perkalian efisiensi turbin dan generator secara teoritis. Sedangkan daya yang dihasilkan oleh poros turbin adalah:

$$P_{turbin} = T \times \pi \times \frac{n}{30} \dots\dots\dots \{ 10 \}$$

Dimana:

- P_{turbin} = Keluaran daya mekanis turbin/daya poros turbin (Watt)
 T = Torsi pada turbin (Nm)
 n = Putaran turbin (rpm)

Konsep torsi dalam fisika disebut momen atau gaya rotasional. Gaya yang bekerja pada tuas, dikalikan dengan jarak dari titik tengah tuas, adalah torsi. Berdasarkan hasil dari perhitungan daya hidrolis pada persamaan 8 dan 9 dan daya turbin pada persamaan 10 maka dapat dihitung efisiensi turbin air dengan perumusan:

$$n_{turbin} = \frac{P_{turbin}}{P_{hidrolik}} \times 100\% \text{ [%]} \dots\dots\dots \{ 11 \}$$

Pikohidro terdiri dari beberapa komponen dasar yaitu bangunan, turbin, transmisi, generator, komponen elektronika (kabel, saklar, semikonduktor, batrai, dst)

2.4.1 Komponen Bangunan

2.4.1.1 Rangka bangunan turbin

Bangunan turbin terdiri dari rangka yang menopang turbin, transmisi, dan generator dalam suatu komponen bangunan. Rangka berfungsi sebagai penyangga komponen penting lain seperti sistem pipa penyalur aliran air ke sudu turbin. Adapun bentuk rangka disesuaikan dengan jenis turbin yang digunakan.

2.4.1.2 Sistem pipa dan *Head losses*

Sistem perpipaan berfungsi mengalirkan air ke sudu turbin, dimana sistem pipa dirancang agar dapat memiliki tekanan dan kecepatan aliran yang optimal (Zainuddin *et al.* 2009). Menghitung *head losses* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

Minor Losses

$$h_L = K_l \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots \{ 12 \}$$

Mayor Losses

$$h_L = f \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots \{ 13 \}$$

Keterangan:

h_L = Head losses (m)

K_l = Koefisien minor losses

v = Kecepatan Aliran (m/dt)

L = Panjang Pipa (m)

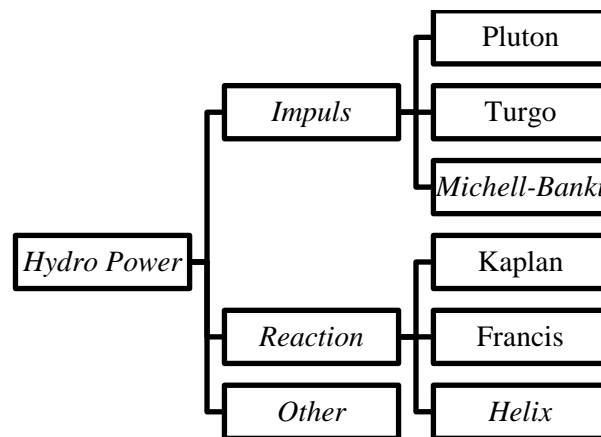
f = Koefisien gesek Pipa

g = gravitasi (m/dt²)

2.4.2 Water Turbine

Sebuah turbin dapat berputar karena mendapat gaya dorong dari air. Dimana gaya dorong air diperoleh dari perubahan momentum air setelah menumbuk bagian sudu turbin. Besarnya momentum air sangat dipengaruhi oleh besarnya kecepatan dan laju aliran massa air. Memperoleh daya turbin yang maksimal maka desain sudu harus didesain sedemikian rupa sehingga terjadinya perubahan momentum dapat maksimal. Sedangkan kecepatan fluida air dipengaruhi oleh tinggi jatuh air. Sehingga daya yang dihasilkan turbin akan sangat bergantung pada besarnya *head* dan debit air.

Turbin air berperan sebagai mesin konversi energi yaitu energi potensial atau energi kinetik menjadi energi mekanik. Konversi energi tersebut terjadi karena air yang mengalir pada nosel dengan kecepatan dan laju aliran massa tertentu disemprotkan kedalam sudu turbin sehingga menyebabkan turbin berputar. Energi mekanis dari turbin dikonversi dengan generator listrik menjadi energi listrik. Berdasarkan prinsip kerja turbin atau momentum fluida kerjanya dalam mengubah dan mengkonversi energi kinetik air menjadi energi mekanis maka turbin air dibedakan turbin impuls dan turbin reaksi. Aplikasi dan penerapannya pada sumber daya air setiap masing-masing turbin memiliki *head* tertentu. Gambar dibawah ini menjelaskan tentang pengelompokan (klasifikasi) berbagai macam jenis turbin air yang diterapkan dalam suatu pembangkit listrik tenaga air seperti PLTMH.



Sumber : Mafruddin dan Dwi Irawan (2020)

Gambar 4 Klasifikasi *Water Turbine*

2.4.2.1 Turbin *Impuls*

Turbin *impuls* merupakan jenis turbin tekanan sama. Tekanan yang sama tersebut yaitu tekanan pada aliran air yang keluar dari nosel turbin dan tekanan

atmosfir lingkungan sekitar turbin. Energi potensial yang terkandung didalam air dengan ketinggian tertentu dikonversi menjadi energi kinetik melalui suatu pipa pesat (*penstock*) dan air tersebut masuk turbin melalui salah satu bagian turbin yang disebut nosel. Penampang nosel biasanya lebih kecil jika dibandingkan dengan pipa pesat sehingga kecepatan air yang keluar dari nosel sangat tinggi. Kecepatan air yang tinggi tersebut membentur sudu turbin dan setelah membentur sudu arah kecepatan aliran dari air akan berubah sehingga terjadi perubahan momentum dari air maka roda turbin akan berputar (Mafruddin dan Dwi Irawan 2020).

2.4.2.2 Turbin Reaksi

Prinsip kerja Turbin Reaksi Kaplan memanfaatkan energi kinetik, dimana arus aliran air langsung menumbuk sudu turbin tanpa melalui aliran. Energi diberikan kepada sudu berupa energi kinetik atau energi kecepatan aliran. Pada turbin kinetik vertikal (tegak) air langsung menumbuk sudu pada setengah bagian roda turbin sedangkan setengah bagian yang lain juga mendapat tumbukan tetapi tidak sebesar setengah bagian yang pertama sehingga turbin masih bisa berputar. Tentunya keberhasilan turbin ini berputar tergantung pada bentuk dan jumlah sudunya, apabila bentuk dan jumlah sudunya kurang memadai maka putaran turbin akan semakin lambat, bahkan berhenti berputar (Pietersz *et al.* 2013).

Kaplan Turbin merupakan turbin reaksi aliran aksial. Turbin ini tersusun dari baling-baling (*Propeller*). *Propeller* tersebut biasanya mempunyai tiga hingga enam sudu. Turbin ini terdapat dua jenis pengaturan sudu yaitu *adjustabel blade* dan *adjustabel guide vane* (Sukamta dan Kusmantoro 2013). Turbin *Helix* atau biasa juga di sebut *helical turbine* ini terdiri dari beberapa jenis, diantaranya yaitu Turbin Heliks Gorlov (GHT) dan *hydrocoil turbine*, turbin ini memiliki kelebihan diantaranya yaitu dapat beroperasi pada kecepatan aliran dan beda tinggi saluran yang rendah, *helical turbine* masih merupakan bagian dari jenis turbin reaksi (Alief Avicenna Luthfie 2017; Jayaram dan Bavanish 2020).

2.4.3 Generator, Transmisi, dan Komponen elektronika

Generator merupakan alat untuk mengubah daya poros turbin menjadi energi listrik. Pada minihidro umumnya digunakan generator sinkron dan generator induksi sebagai generator. Generator induksi memberikan keuntungan seperti biaya rendah dan konstruksi yang kuat. Namun, generator sinkron digunakan dalam mode *off-grid* (Razan *et al.* 2012). Generator sinkron beroperasi pada kecepatan sinkron yang berhubungan dengan frekuensi sistem. Saat turbin dihubungkan ke generator sinkron, yang terhubung ke jaringan, maka kecepatannya akan konstan, tidak mungkin berubah, sesuai dengan frekuensi jaringan. Sedangkan generator induksi adalah mesin induksi yang bekerja sebagai generator, oleh karena itu mesin induksi mempunyai persamaan dan konstruksi yang sama untuk generator maupun untuk motor. Transmisi berfungsi sebagai pengantar energi baik secara mekanik ataupun listrik, hanya saja untuk transmisi mekanik biasa menggunakan *gearbox*.

2.5 Pendekatan Analisis

Kegiatan yang dilakukan dalam studi kelayakan PLTMHI mencakup pengumpulan data yang terdiri atas: data debit, gambar rencana, daya yang dibangkitkan. Setelah pengumpulan data dilakukan analisis teknis, terdiri atas: analisis struktur bangunan air seperti tubin, generator, sistem mekanis penyalur

daya, sistem elektronika, dan bangunan (Ady Purnama 2011). Pendekatan analisis yang digunakan umumnya bersifat *parametric* (Sukamta dan Kusmantoro 2013).

Pengukuran dengan metode *velocity-area* merupakan metode konvensional yang dilakukan untuk mengukur laju aliran atau kecepatan aliran air pada saluran atau sungai menengah sampai sungai besar (Teguh *et al.* 2007). Pengukuran debit air dengan metode ini melibatkan pengukuran luas keseluruhan penampang saluran atau luas aliran saluran dan kecepatan rata-rata aliran air saluran. Pengukuran juga dapat dilakukan dengan *Velocity Curved Method*, cara ini memerlukan pengukuran banyak titik pada satu garis vertical dari permukaan air sampai dasar saluran air. Pengukuran kecepatan aliran menggunakan alat ukur *current meter*, dimana *current meter* mengukur kecepatan air mulai dari 0,2 sampai 5 m/s dengan tingkat kepresisian 2 % (Subekti 2010).

Beberapa keuntungan yang dimiliki oleh alat tersebut yaitu mudah dalam penggunaannya, kemudian faktor kesalahan pengamatan kecil, dan dengan menggunakan alat ukur arus, faktor koreksi diabaikan. Sebagaimana yang dikemukakan sebelumnya bahwa, jika menggunakan alat ukur arus, maka faktor koreksi (k) diabaikan sehingga persamaan untuk mencari debit air adalah (Effendy 2012; Sukamta dan Kusmantoro 2013):

$$Q = V.A \dots\dots\dots\{ 14 \}$$

Untuk menghitung luas penampang persamaan dapat ditulis (Kementerian PUPR 2013a):

$$A = L(m) . d(m) \dots\dots\dots\{ 15 \}$$

dimana:

- A = luas penampang aliran (m²)
- L = lebar saluran (meter)
- d = kedalaman air rata-rata (meter)
- Q = debit air (m³/det)
- V = kecepatan aliran (m/det)

Pemberdayaan sumber daya air terdiri dari atas empat pemanfaatan yaitu pemanfaatan sebagai irigasi, domestik, industri dan menjadi sumber daya listrik (Prastowo 2010). Pembangkit listrik tenaga air mengkonversi tenaga air menjadi tenaga listrik, mula-mula potensi tenaga air dikonversikan menjadi tenaga mekanik dalam turbin air yang kemudian turbin air tersebut memutar generator sehingga mampu dihasilkan listrik.

Luas area yang dilalui oleh aliran air diukur dengan cara mengukur sisi-sisi aliran air dan kedalaman rata-rata saluran dan kemudian dihitung luasnya (Marliansyah *et al.* 2018). Gambaran umum *head* dapat diperoleh dengan mengamati peta topografi area yang bersangkutan. Hal ini akan merepresentasikan gambaran secara ringkas mengenai ketinggian dan elevasi area, namun untuk penentuan *head* secara lebih lanjut perlu dilakukan secara langsung. Energi air dengan debit kecil belum banyak dimanfaatkan, padahal di beberapa wilayah Indonesia punya potensi yang cukup besar untuk dikembangkan pembangkit listrik tenaga air dengan debit kecil (*pikohydro*) (Tirono 2012).

III. METODOLOGI

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan di D.I (Daerah Irigasi) Cihea, Kabupaten Cianjur, Jawa Barat. Waktu penelitian dilakukan pada bulan September 2021 – April 2022.

3.2 Rancangan Penelitian

Penelitian dilakukan dengan membuat rancangan bangunan turbin pikohidro, kemudian melakukan pengukuran kecepatan aliran menggunakan *current meter* dengan metode *cross sectional* dan analisis deskriptif kuantitatif. Penelitian ini melakukan pengukuran dan perhitungan pada desain bangunan turbin pikohidro dengan tenaga air irigasi. Data yang diperoleh kemudian dianalisis dengan membandingkan data hasil pengukuran dan perhitungan. Data pengukuran didapatkan dari hasil uji kinerja bangunan turbin pikohidro, sedangkan perhitungan dari hasil simulasi menggunakan *Solidworks* yang hasil simulasi tersebut telah dilakukan validasi menggunakan persamaan lainnya.

Metode pada penelitian ini terdiri atas beberapa metode yaitu studi literatur dalam menentukan karakteristik saluran irigasi, simulasi menggunakan *Computational Fluid Dynamics (CFD)*, pengamatan dan uji kinerja.

3.2.1 Studi Literatur

Studi literatur menggunakan metode kuantitatif terhadap data karakteristik saluran irigasi agar mendapatkan nilai dari potensi energi pada saluran irigasi. Adapun persamaan yang digunakan didalam pendekatan perhitungan yaitu (Ghurri 2014):

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot Q \cdot v^2 \dots\dots\dots\{ 16 \}$$

Boundary Condition menggunakan hasil studi literatur kriteria perencanaan saluran irigasi, seperti; penelitian Steevensz dalam Effendy (2012) yang mendapatkan persamaan untuk mendapatkan kecepatan aliran optimum dengan persamaan berikut:

$$V = 0.45 \cdot Q^{0.225} \dots\dots\dots\{ 17 \}$$

3.2.2 Simulasi menggunakan *Computational Fluid Dynamics (CFD)*

Penelitian ini menggunakan teknik solusi numerik yaitu menggunakan Metode Volume Hingga (*Finite Volume Metode*) dan *Solution Solver* yang memiliki penentuan kondisi batas (*Boundary Condition*). Adapun persamaan yang perlu diketahui yaitu (Schneiderbauer dan Krieger 2014):

$$\vec{F}_{Gravity} + \vec{F}_{Pressure} + \vec{F}_{Viscosity} + \vec{F}_{Miscellaneous Force} \dots\dots\dots\{ 18 \}$$

$$\rho \left\{ \frac{\partial |\vec{v}|}{\partial t} + \left[v_x \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} \right] \cdot \vec{i} + \left[v_y \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} \right] \cdot \vec{j} + \left[v_z \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} \right] \cdot \vec{k} \right\} dx dy dz \dots\dots\dots \{ 19 \}$$

Secara matematis, istilah-istilah ini mewakili "ma" dalam "F=ma"

Gaya akibat tekanan, P, didefinisikan sebagai (Faro A. Ayodeji 2020);

$$F_{prs} = -\nabla P * dv = -\nabla P dx dy dz \dots\dots\dots \{ 20 \}$$

Seperti gaya tekanan, gaya akibat viskositas didefinisikan menurut gradien. Pengaruhnya adalah tegangan geser, yaitu tegangan yang bekerja sejajar dengan suatu permukaan, hal itu dapat dilihat pada permasamaan berikut:

Persamaan kontinuitas (Abdulnaser Sayma 2009):

$$F_{visc} = -\nabla \tau * dv = -\nabla P dx dy dz \dots\dots\dots \{ 21 \}$$

Simulasi *Computational Fluid Dynamics (CFD)* pada operasi kerja *software solidworks* yang akan digunakan sebagai aplikasi simulasi desain bangunan turbin ini menggunakan *The Navier-Stoke's Equation* yang dapat dilihat sebagai berikut (Versteeg dan Malalasekera 1995; Abdulnaser Sayma 2009):

$$\rho \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + F_x \dots\dots\dots \{ 22 \}$$

$$\rho \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + F_y \dots\dots\dots \{ 23 \}$$

$$\rho \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + F_z \dots\dots\dots \{ 24 \}$$

Dalam persamaan ini v, u, w adalah komponen kecepatan dalam arah x, y, z, kemudian ρ adalah *density*, p adalah *pressure*, μ adalah *viscosity*.

3.2.3 Pengukuran dan Pengujian

Pada proses pengamatan dan Pengujian dilakukan beberapa tahapan yaitu melakukan perencanaan calon lokasi pengujian dengan melakukan orientasi lapangan, melakukan pengukuran kecepatan aliran pada saluran irigasi lokasi pengujian, melakukan analisa kecepatan dan energi pada saluran irigasi lokasi pengujian, optimasi posisi turbin, perancangan kontruksi turbin, uji kinerja

kontruksi turbin dalam mengkonversi energi, mendesain bangunan turbin pikohidro dengan tenaga air irigasi.

1. Orientasi lapangan

Orientasi menggunakan data peta saluran irigasi pada Daerah Irigasi Cihea Kabupaten Cianjur, Jawa Barat, kemudian dilakukan survei terhadap saluran-saluran irigasi khususnya yang memiliki bangunan terjun. Titik survei yang sesuai dengan kriteria hasil pengamatan karakteristik dan simulasi *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dilakukan plotting koordinat kedalam aplikasi *Google Eart* yang kemudian ditambahkan hasil dokumentasi kedalam hasil *ploting* koordinat yang telah ditetapkan saat orientasi.

Kriteria lokasi penelitian terdiri atas:

- Kondisi saluran sesuai dengan hasil evaluasi simulasi berdasarkan karakteristik saluran Irigasi
- Debit air selalu ada.
- Tidak ada operasional saluran yang terganggu.

2. Pengukuran kecepatan aliran saluran irigasi

Pengukuran kecepatan aliran menggunakan alat ukur *current meter* yang dimana pengukuran dilakukan dengan *Velocity Curved Method*, cara ini memerlukan pengukuran banyak titik pada satu garis vertical dari permukaan air sampai dasar saluran air.

3. Analisa kecepatan pada saluran irigasi

Analisa yang dilakukan pada saluran irigasi bertujuan untuk mengetahui kondisi saluran irigasi terhadap nilai kecepatan, Adapun persamaan yang digunakan pada tahapan analisa yaitu (Kementerian PUPR 2013a):

Persamaan Manning:

$$V = \frac{i}{n} (R)^{2/3} (S)^{1/2} \dots\dots\dots \{ 25 \}$$

Persamaan Chazy:

$$V = C \sqrt{RS} \dots\dots\dots \{ 26 \}$$

Dimana R adalah jari-jari hidrolis, S adalah *Slope*, n adalah koefisien Manning, C adalah koefisien Chazy, dan V adalah kecepatan aliran. Hasil pengukuran dilakukan analisa terhadap persamaan Manning dan Chazy selanjutnya di hitung besar energi hidrolis yang dihasilkan pada saluran irigasi.

4. Optimasi posisi turbin

Optimasi yang dilakukan yaitu untuk mendapatkan kriteria optimum pada energi yang dapat dihasilkan dari air irigasi terhadap turbin, dimana harapannya mendapatkan nilai maksimum energi. Adapun pertimbangan yang dilakukan yaitu mendapatkan jumlah pasangan bangunan turbin pada mercu terjunan, selanjutnya hasil ini di simulasikan kedalam nilai yang didapatkan pada karakteristik saluran irigasi. Pada optimasi posisi turbin peneliti menggunakan persamaan Bernoulli dan

perhitungan *headloss* yang terjadi, Adapun persamaan yang digunakan yaitu (Ghurri 2014):

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 - h_T - h_{fl} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \dots\dots\dots\{ 27 \}$$

Dimana h_T adalah *head* Turbin, h_{fl} adalah *Headloss*, γ adalah *viscosity*, z adalah elevasi. Persamaan ini hanya berlaku untuk saluran tertutup atau saluran pipa.

Pada umumnya kehilangan air di jaringan irigasi dapat dibagi-bagi sebagai berikut: - (12,5 – 20) % di petak tersier, antara bangunan sadap tersier dan sawah – (5 – 10) % di saluran sekunder – (5 – 10) % di saluran utama, Dapat kita lihat pada tabel berikut (Kementerian PUPR 2013b):

Tabel 2. Data Acuan Perancangan melalui sajian data Luas, kedalaman terjuan, kecepatan aliran, Debit dan Tipe Turbin Terhadap Jenis Saluran.

Jenis Saluran	Luas Pengairan (Ha)	Kedalaman Terjuan (m)	Kecepatan Aliran (m/dt)	Debit (m ³ /s)
Primer	4000-10.000		0,615 - 0,755	4 – 10
Sekunder	1000-4000	< 1.5	0,450 – 0,615	1-4
Tersier	< 75		<0,251	<0,075

5. Perancangan kontruksi dan uji kinerja konversi energi

Perancangan turbin menggunakan *NACA Airfoil* standart dimana bentuk sudut ditentukan menggunakan gabungan antara dua *software* yaitu matlab dan solidwork. Adapun persamaan yang digunakan yaitu (Bratislava *et al.* 1957):

Diameter Turbin

$$D = \frac{84.5 \cdot \pi \sqrt{H}}{N} \dots\dots\dots\{ 28 \}$$

Kecepatan Turbin

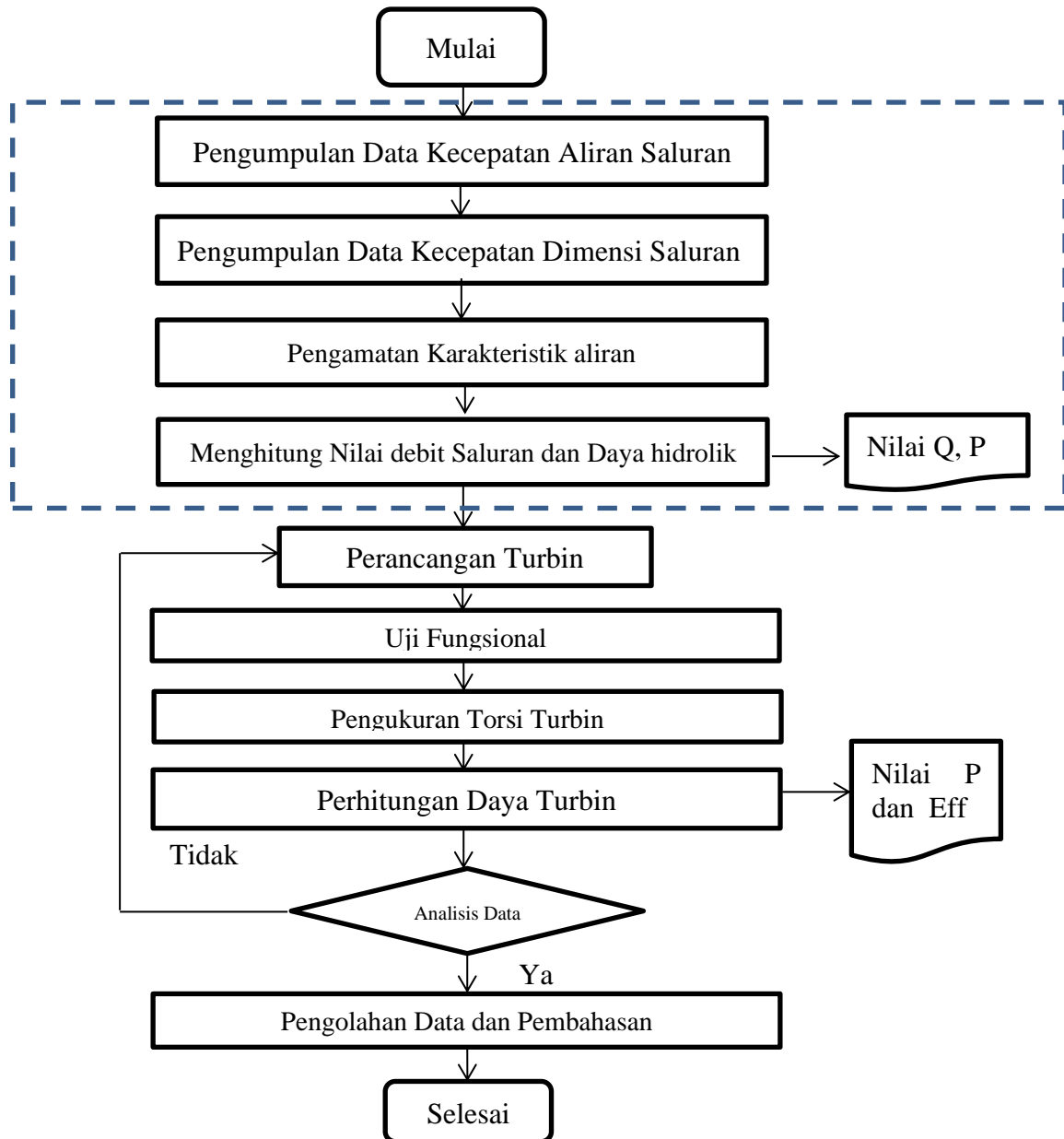
$$N = \frac{N_s \cdot H^{\frac{5}{4}}}{\sqrt{P}} \dots\dots\dots\{ 29 \}$$

Dimana P adalah daya, N_s adalah *specific speed*, H adalah kedalaman terjuan.

Setelah mendapatkan nilai dari diameter dan kecepatan turbin maka ditentukan sudut bilah turbin menggunakan standar *NACA Airfoil* yang kemudian diploting menggunakan matlab dalam berupa titik, selanjutnya titik tersebut diartikan dalam sebuah gambar rancangan didalam *software Solidwork*.

6. Mendesain bangunan turbin pikohidro

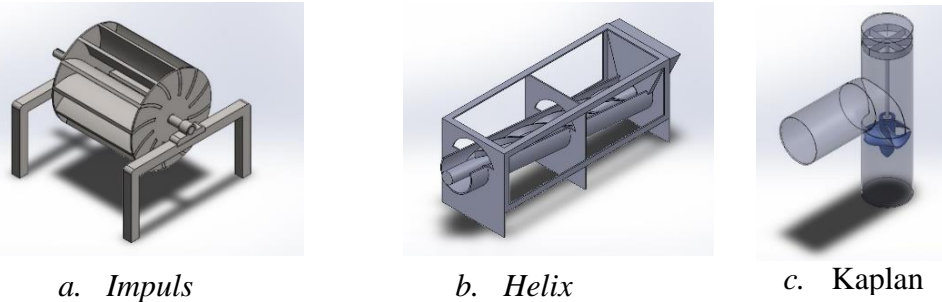
Desain bangunan turbin dilakukan menggunakan *software Solidwork*, desain digambarkan dalam bentuk 3D yang kemudian setelah dilakukan simulasi ulang dan validasi terhadap hasil uji kinerja bangunan turbin, desain bangunan turbin ini didesain dalam bentuk *layout* dua dimensi mengikuti aturan gambar rancangan bangunan. Adapun desain bangunan yang dihasilkan dalam dua bentuk *output* yaitu desain bangunan turbin minimum dan maksimum untuk pembangkit listrik tenaga air irigasi.



Gambar 5. Diagram Alir Pelaksanaan Penelitian

3.3 Komponen Perancangan

Pengamatan dilakukan dengan melakukan simulasi terhadap ketiga jenis turbin, hal ini diharapkan dapat menjadi evaluasi dari hasil perancangan dengan perbandingan skala bangunan turbin dan debit aliran pada saluran irigasi. Tujuan dari perancangan komponen simulasi ini sebagai penentu penggunaan turbin yang optimal pada aliran yang telah dimodifikasi. Adapun jenis turbin yang digunakan adalah seperti tampak pada gambar 6.



Gambar 6. Turbin yang digunakan

Variabel dari penelitian ini terdiri atas variabel *input* dan *output*, variabel *input* yaitu data mengenai debit aliran irigasi yang terdiri atas dua sub variabel, yaitu kecepatan aliran dan luas penampang saluran aliran. Variabel *ouput* yaitu data mengenai energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin.

Tabel 3. Definisi Operasional

No	Variabel dan Sub Variabel	Definisi Operasional	Cara Mendapatkan Nilai	Hasil Ukur
1	Debit	Jumlah air yang berada pada saluran	Mengukur nilai kecepatan aliran dan dimensi saluran, kemudian di hitung menggunakan rumus Manning dan Chazy.	m ³ /s
2	Kecepatan Aliran	Kecepatan air pada saluran	Mengukur menggunakan <i>current meter</i>	m/s
3	Luas penampang	Luas penampang saluran aliran	Mengukur dimensi saluran dengan meteran	m ²
4	Daya	Daya Hidrolik dan Listrik	Dihitung menggunakan rumus Bernoulli untuk daya hidrolik, Mengukur tegangan dan arus sebagai variabel hitung untuk daya listrik.	Watt
5	Effisiensi	Effisiensi Turbin	Perbandingan daya hidrolis dan daya listrik	%

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu seperangkat computer dilengkapi *software Solidworks 2020, Matlab 2020a, Microsoft Office, Eart, Notepad+*, selanjutnya alat yang digunakan untuk pengukuran yaitu *Current Meter, Tachometer, Avometer, Smartphone*, dan *Cas Smartphone*, alat yang digunakan untuk perancangan bangunan uji yaitu mesin las, bor, gerinda, *solder*, obeng dan kunci. Bahan yang digunakan yaitu Pedoman Kriteria Perencanaan Irigasi Tahun 2013, data *NACA Airfoil*, Peta Daerah Irigasi Cihea, selanjut bahan yang digunakan untuk rancangan bangunan turbin yaitu Besi dan Plat Alumunium, Pipa PVC 6 dan 8 inci, *Reducer 8 to 6 inci, Knee 6 inci*, Pipa T 6 inci, Baut, dempul, motor listrik, kabel 2 mm, *charging station*, lampu, timah *solder*. Alat yang digunakan pada penengujian kali ini dapat dilihat pada Tabel 4, Tabel 5, dan Tabel 6.

Tabel 4. Alat Pengukuran dan pengujian

No	Nama Alat	Jumlah	Kegunaan
1	<i>Clamp Meter</i>	1	Mengukur Daya, Tegangan, Arus, dan Faktor daya yang didapatkan
2	<i>Current Meter</i>	1	Mengukur kecepatan aliran air
3	<i>Tachometer</i>	1	Mengukur kecepatan putaran

Tabel 5. Alat Pendukung

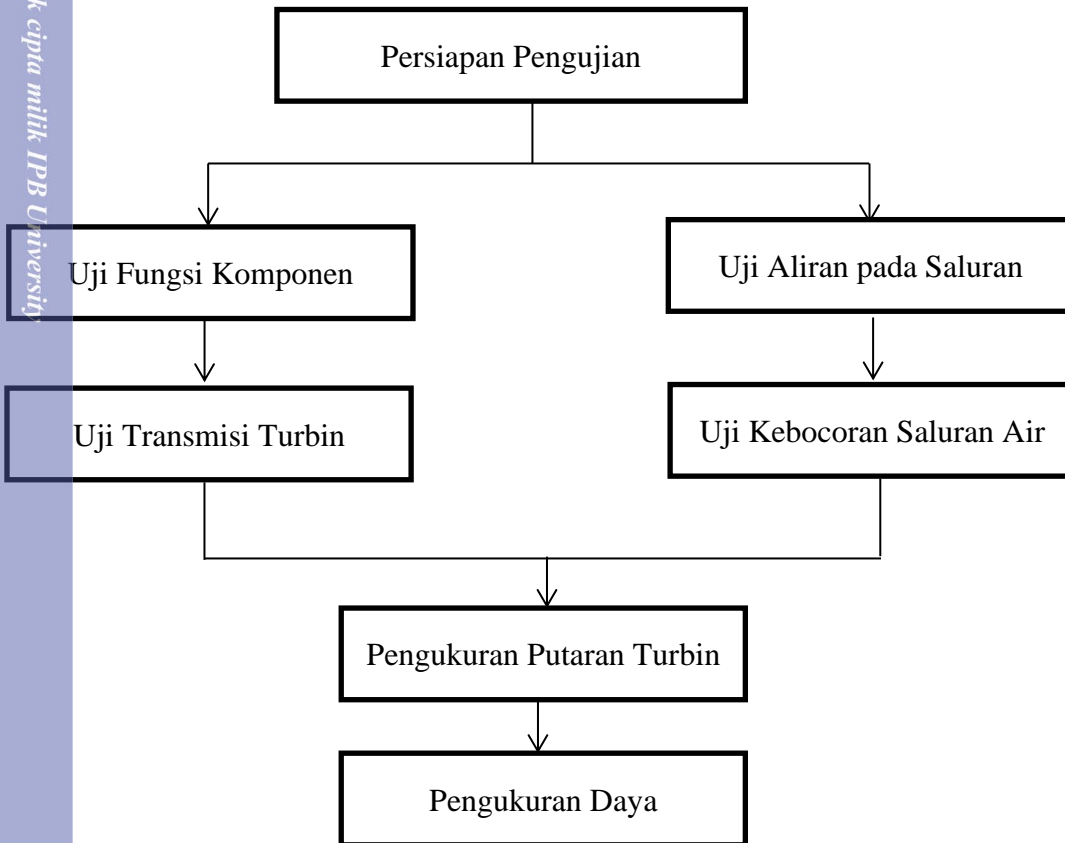
No	Nama Alat	Jumlah	Kegunaan
1	Alat tulis	1	Untuk mencatat data pada pengujian mesin
2	Kalkulator	1	Untuk menghitung data penelitian
3	Kamera	1	Dokumentasi
4	Laptop	1	Untuk mengolah data
5	<i>Software Solidworks</i>	1	Untuk menggambar Turbin

Tabel 6. Bahan Penelitian

No	Nama Alat	Jumlah	Kegunaan	Keterangan
1	Generator	1	Konversi energi mekanik ke listrik	Tiga Phasa
2	Turbin Kaplan	1	Konversi energi air ke mekanik	Enam Sudu
5	Panel elektonik	1	Penyalur listrik	1 rangkaian
6	Batrai	2	Sebagai penyimpan daya listrik	Tegangan input 12 volt
7	Sistem Transmisi	1	Sebagai penyalur daya mekanik	Anti karat

3.4 Prosedur Pengujian

Pengujian merupakan tahapan untuk mencoba apakah komponen yang telah dirancang dapat bekerja dan berfungsi sesuai dengan yang diharapkan. Adapun pengujian terdiri atas beberapa tahapan pengujian, seperti yang terlihat pada diagram.



Gambar 7. Diagram Prosedur Pengujian

3.5 Analisis Data

Analisis data dilakukan untuk mencari kondisi besaran suplai debit air irigasi terhadap bangunan turbin pikohidro berdasarkan karakteristik irigasi. Adapun langkah – langkah yang diambil dalam analisa data adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini akan mengumpulkan data debit suplai rerata Irigasi pada jaringan irigasi.
2. Mencari *head* pada bangunan terjun, atau saluran yang digunakan untuk pembangkit tenaga air irigasi.
3. Menganalisis dimensi saluran dan bangunan pikohidro yang digunakan pada pengujian.
4. Melakukan simulasi terhadap turbin dengan jenis yang berbeda.
5. Melakukan pemilihan turbin dari hasil simulasi yang dapat digunakan untuk bangunan pikohidro.
6. Melakukan pengujian dengan mengukur nilai daya dan putaran turbin pada bangunan turbin pikohidro.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil yang dikeluarkan dari penelitian ini adalah desain bangunan turbin pikohidro tenaga air irigasi yang dilakukan berdasarkan pertimbangan beberapa hal yaitu karakteristik saluran irigasi, hasil simulasi tiga jenis bangunan turbin menggunakan *Computational Fluid Dynamics (CFD)*, analisis kecepatan dan energi saluran irigasi, optimasi posisi turbin, dan desain bangunan turbin.

4.1 Karakteristik Saluran Irigasi

Karakteristik saluran irigasi umumnya dinilai berdasarkan beberapa variable diantaranya yaitu kedalaman air pada saluran, lebar saluran, kemiringan tampang saluran, dan kemiringan dasar saluran. Memahami karakteristik saluran irigasi sebagai pembangkit listrik merupakan bagian dasar dalam mendesain bangunan turbin pikohidro tenaga air irigasi, adapun data karakteristik saluran irigasi ini akan digunakan sebagai *boundary condition (BC)* atau syarat batas.

Tabel 7. Karakteristik Saluran Irigasi sebagai Pembangkit Listrik

Q	b	K	I	V	P	Q	b	K	I	V	P
l/dt	m	$K^{1/3}/d$ t	10^{-3}	m/dt	kWh	l/dt	m	$K^{1/3}/d$ t	10^{-3}	m/dt	kWh
1	2	4	5	6	7	1	2	4	5	6	7
300	0,9	35	0,56	0,4	1,4	1500	1,4	35	0,56	0,4	7,2
	0,8	35	0,46	0,44	1,7		1,4	35	0,46	0,44	8,7
	0,7	40	0,39	0,54	2,6		1,3	40	0,39	0,54	13,1
	0,7	40	0,28	0,61	3,3		1,3	40	0,28	0,61	16,7
	0,7	42,5	0,21	0,67	4,0		1,2	42,5	0,21	0,67	20,1
	0,7	45	0,17	0,7	4,4		1,2	45	0,17	0,7	22,0
	0,6	45	0,13	0,74	4,9		1,2	45	0,13	0,74	24,6
6000	3,9	35	0,56	0,4	28,7	11000	2,3	35	0,56	0,4	52,6
	3,7	35	0,46	0,44	34,7		2,2	35	0,46	0,44	63,7
	3,3	40	0,39	0,54	52,3		2,1	40	0,39	0,54	95,9
	3,1	40	0,28	0,61	66,8		2,1	40	0,28	0,61	122,4
	3,0	42,5	0,21	0,67	80,6		2,0	42,5	0,21	0,67	147,7
	2,9	45	0,17	0,7	87,9		2,0	45	0,17	0,7	161,2
	2,8	45	0,13	0,74	98,3		2,0	45	0,13	0,74	180,2
25000	7,9	35	0,56	0,4	119,6	40000	3,2	35	0,56	0,4	191,4
	7,5	35	0,46	0,44	144,8		3,1	35	0,46	0,44	231,6
	6,8	40	0,39	0,54	218,0		2,9	40	0,39	0,54	348,9
	6,4	40	0,28	0,61	278,2		2,8	40	0,28	0,61	445,2
	6,1	42,5	0,21	0,67	335,7		2,8	42,5	0,21	0,67	537,1
	6,0	45	0,17	0,7	366,4		2,7	45	0,17	0,7	586,2
	5,8	45	0,13	0,74	409,5		2,7	45	0,13	0,74	655,1

Berdasarkan pernyataan oleh Dedi Kusnadi Kalsim et al. (2006) bahwa perlu dilakukan pembatasan untuk kecepatan aliran saluran irigasi dimana itu berfungsi untuk menjaga kondisi saluran, seperti melakukan pembatasan kecepatan aliran tidak boleh kurang dari 0,4 m/s untuk menghindari perkembangan nyamuk, pertumbuhan rumput, dan percepatan sedimentasi didalam saluran, hal ini juga terlihat dari hasil yang diperoleh, bahwa kecepatan aliran minimal adalah 0,4 m/s dan kecepatan aliran maksimal 0,74 m/s, nilai ini juga sesuai dengan nilai yang terdapat pada desain saluran irigasi dan kriteria perencanaan irigasi yaitu memiliki nilai kecepatan aliran 0,4 m/s – 0,7 m/s (Effendy 2012; Kementerian PUPR 2013a). Kecepatan aliran berfungsi memutar turbin, dimana semakin cepat putaran turbin pada tekanan tertentu maka daya yang dihasilkan akan semakin besar sesuai kemampuan dari generator (Juliana *et al.* 2018).

Parameter batas minimum pikohidro tenaga air irigasi dipertimbangkan berdasarkan standar minimum pengisian daya ke batrai dan pengoprasian *inverter*, sehingga debit minimum pengoprasian generator yaitu 50 liter/dt dengan kecepatan aliran 0,6 m/dt, akan tetapi perlu mempertimbangkan lengan gaya torsi turbin. Parameter batas minimum pikohidro tenaga irigasi pada bangunan terjun dipertimbangkan berdasarkan tinggi terjun minimum 0,35 m dari terjunan sampai *downstream* dengan debit minimum 30 liter/dt.

Melalui data karakteristik irigasi yang menjadi *boundary coundation* adalah nilai kecepatan sebagai *input* dan luasan sebagai batasan kondisi. Nilai kecepatan aliran irigasi *input* yaitu diantara 0,4 - 0,74 m/s. Pemilihan jenis turbin yang akan digunakan harus desain turbin yang dapat dioperasikan pada parameter batas minimum.

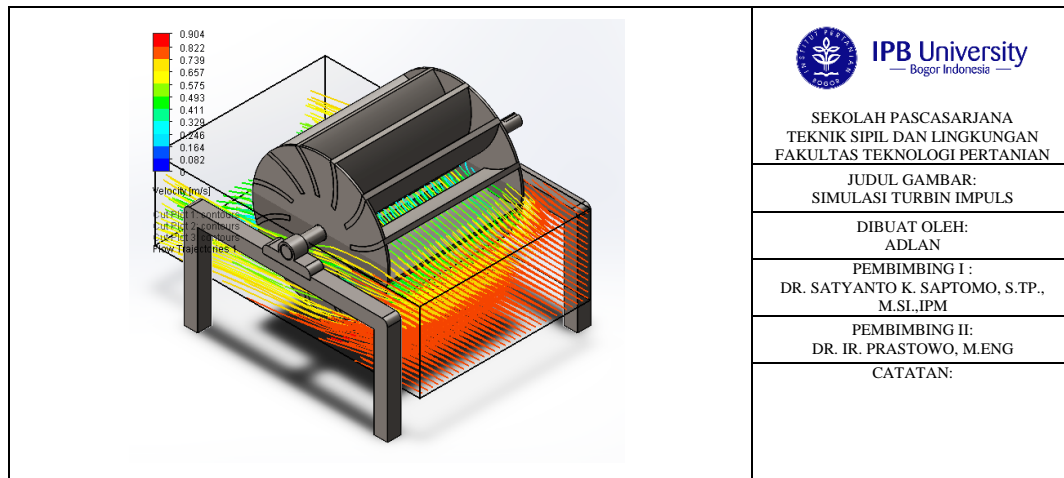
4.2 Simulasi *Computational Fluid Dynamics (CFD)* Turbin

Secara umum turbin diklasifikasikan berdasarkan dua katagori yaitu turbin *impuls* dan turbin reaksi, seperti yang terdapat pada Mafruddin dan Dwi Irawan (2020) turbin *impuls* terdiri dari turbin pluton, turgo dan *Michell-Banki*, sedangkan turbin reaksi terdiri dari turbin Kaplan, francis, dan *helix*, jenis turbin tersebut tidak semua dapat optimal pada aliran yang memiliki kecepatan aliran diantara 0,4 m/s – 0,74 m/s, adapun yang yang dapat digunakan pada kecepatan aliran tersebut yaitu turbin *Michell-Banki*, Kaplan, dan *Helix*.

Tiga desain bangunan turbin yang diperkirakan dapat beroperasi pada kecepatan aliran 0,4 m/s – 0,74 m/s akan dilakukan simulasi sebagai evaluasi untuk pemilihan turbin pikohidro tenaga irigasi. Desain bangunan turbin dirancang berdasarkan hasil dari kondisi batas (*boundary coundation*) karakteristik saluran irigasi, berdasarkan desain yang telah didapatkan peneliti melakukan simulasi menggunakan *flow simulation software* pada ketiga jenis desain bangunan turbin, adapun *software* yang digunakan adalah *Solidworks*.

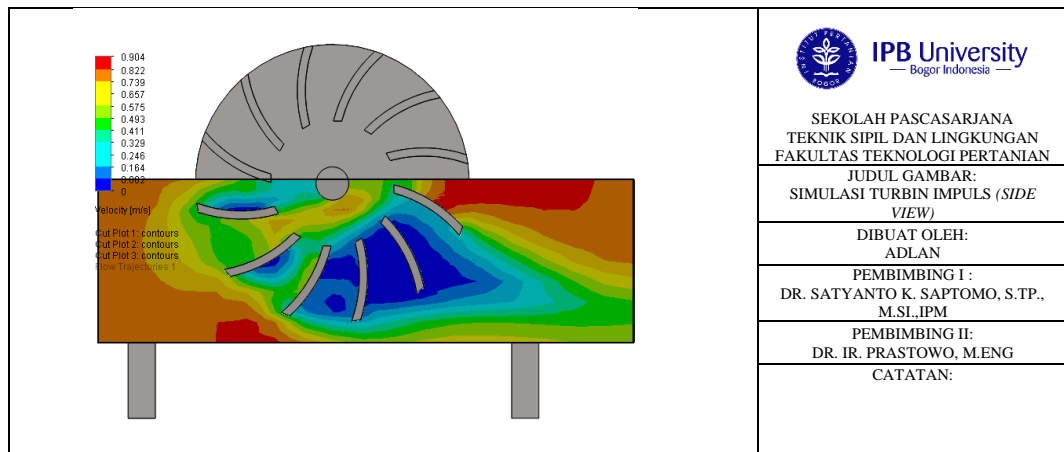
Peneliti menggunakan 0,74 m/s sebagai nilai kecepatan aliran *input* pada simulasi aliran dibangun turbin *impuls*, dimana nilai tersebut adalah kecepatan maksimal aliran yang didapatkan pada pengamatan karakteristik saluran irigasi, adapun hasil yang didapatkan dalam simulasi bahwa terjadi penurunan kecepatan ketika aliran mendekati turbin, nilai yang didapatkan dari hasil simulasi yaitu 0 m/s – 0,7 m/s. kecepatan efektif yang dapat dikonversi menjadi energi putar yaitu 0,4 – 0,5 m/s, penilaian ini melalui pengamatan kecepatan aliran saat terkena sudu turbin.

Berikut adalah hasil simulasi dari desain bangunan turbin *impuls Michell-Banki* seperti terlihat pada gambar 8 dan 9.



Gambar 8 Hasil simulasi desain bangunan turbin impuls

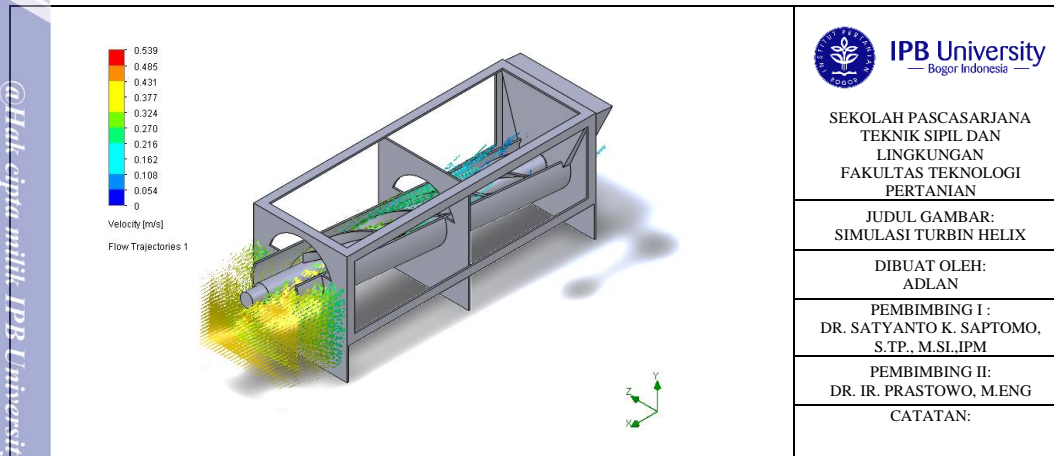
Perubahan kecepatan didalam saluran air dikarenakan tambahan bangunan lain didalam saluran yang mempengaruhi gerak air yang akan merubah ragam kecepatan aliran air didalam saluran. Penelitian yang dilakukan oleh Abd Rahman Wahab dan Adrian (2021) bahwa kecepatan aliran yang menurun akan terjadi pada bagian dasar saluran yang mendekati hambatan, sehingga kecepatan aliran terbawah tidak optimal lagi dimanfaatkan sebagai sumber konversi energi. Hal ini dapat kita lihat pada gambar 9 bahwa dari enam bilah turbin yang masuk kedalam saluran hanya tiga bilah turbin yang dapat dioptimalkan sebagai sumber konversi energi. Penurunan kecepatan aliran yang terjadi pada bilah turbin efektif yaitu sebesar 0,2 – 0,3 m/s.



Gambar 9 Hasil simulasi desain bangunan turbin impuls (*Side View*)

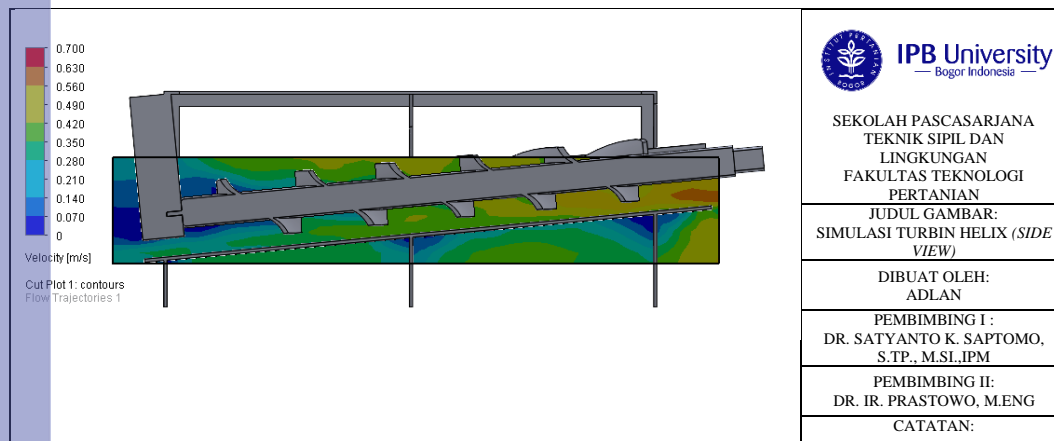
Berdasarkan hasil simulasi bahwa bangunan turbin *impuls* menyebabkan penurunan kecepatan aliran ketika aliran mendekati bilah turbin efektif sebesar 0,2 – 0,3 m/s, penurunan kecepatan aliran ini menyebabkan penurunan potensi konversi energi, sehingga bangunan turbin *impuls* sebaiknya dipasang pada kondisi

saluran yang perlu pengurangan kecepatan, seperti saluran yang berada pada topografi yang terlalu miring.



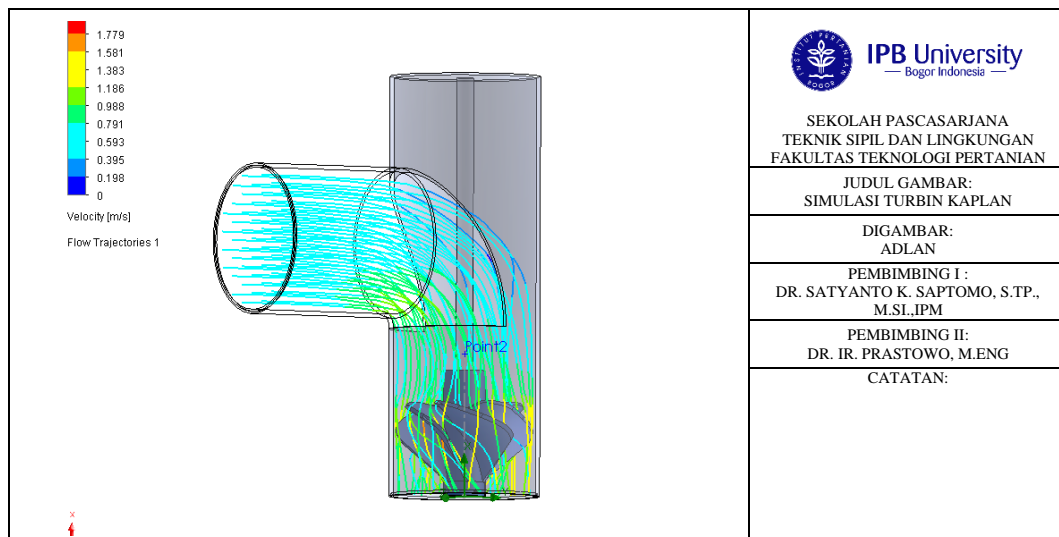
Gambar 10 Hasil simulasi desain bangunan turbin *Helix*

Hasil simulasi pada desain bangunan turbin *helix* ini dapat dilihat pada gambar 10 dan gambar 11, kecepatan aliran efektif yang terjadi di bangunan turbin *helix* hanya 0,2 - 0,5 m/s dengan kecepatan *inlet* sebesar 0,59 m/s, kemudian pada bangunan turbin ini juga terjadi perubahan densitas pada aliran air. Meskipun perbedaannya hanya sebesar $0,01 \text{ kg/m}^3$, tetapi bobot air ini berperan penting dalam konversi energi, dimana semakin jauh bagian turbin dengan *inlet* maka semakin rendah kecepatan aliran yang dapat dikonversi menjadi energi mekanik, maka dari itu desain bangunan turbin *helix* ini lebih baik digunakan untuk saluran yang memiliki debit rendah dan kecepatan relatif stabil.



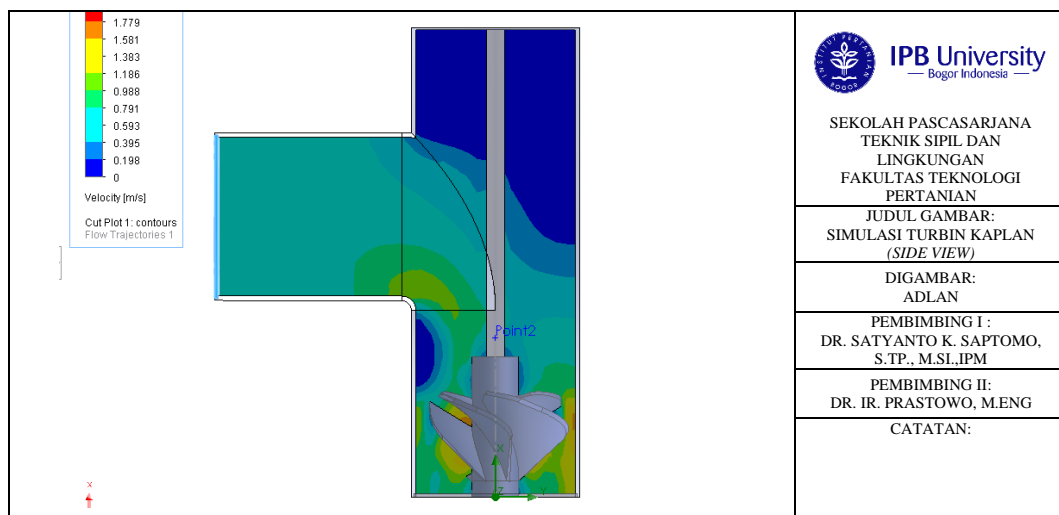
Gambar 11 Hasil simulasi desain bangunan turbin *Helix (Side View)*

Kecepatan aliran yang terkena sudu efektif yaitu 1 m/s dengan input kecepatan aliran *inlet* 0,6 m/s, maka dari perhitungan menggunakan persamaan 5 dalam Berlamont (1986) nilai daya yang dihasilkan yaitu 293 – 295 watt pada tinggi terjun 1 meter dengan debit aliran $0,03 \text{ m}^3/\text{s}$. Desain bangunan turbin Kaplan (*propeller*) juga dilakukan simulasi seperti kedua desain bangunan sebelumnya, hanya saja pada simulasi bangunan ini adalah desain bangunan turbin untuk saluran tertutup.



Gambar 12 Hasil Simulasi Desain Bangunan Turbin Kaplan

Semakin tinggi terjunan nya maka daya yang dihasilkan akan digandakan sesuai dengan kedalaman terjun nya. Hasil simulasi dari bangunan turbin Kaplan memiliki peningkatan kecepatan aliran saat aliran terkena sudu turbin, dimana aliran yang masuk mengalami peningkatan kecepatan aliran yang disebabkan kedalaman terjun. Desain bangunan turbin Kaplan memerlukan terjunan untuk pengoprasiannya. Desain bangunan turbin ini membutuhkan baling-baling khusus untuk membangunnya.



Gambar 13 Hasil Simulasi Desain Bangunan Turbin Kaplan (Side View)

Mahasiswa master di *The University of Guelph Canada* juga telah menerapkan pikohidro dengan turbin kaplan empat sudu menghasilkan daya listrik sebesar 0,25 kWh dengan debit air sekitar 0,025 m³/s (Bryan Patrick Ho-Yan 2012), hal ini sangat mendekati hasil simulasi pada turbin kaplan yang dapat ditunjukkan pada Gambar 12, debit input 0,03 m³/s dapat menghasilkan daya maksimum 0,294 kWh. Turbin Kaplan adalah yang terbaik pada hasil dari tiga jenis simulasi yang

tersedia. Hasil pemilihan ini sesuai dengan penelitian Williamson et al. (2011) yang membandingkan beberapa jenis turbin pada pikohidro.

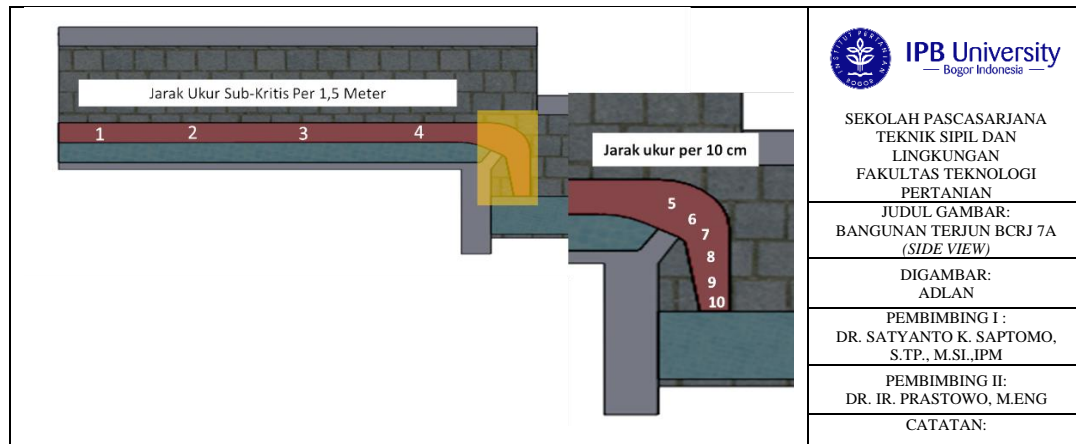
Penentuan kriteria penelitian ini didasarkan pada kemampuan desain bangunan turbin untuk mengkonversi energi, dimana indikatornya adalah daya yang dihasilkan. Daya pada pikohidro dipengaruhi oleh dua faktor, yaitu tekanan dan laju aliran air, sedangkan faktor lain yang menyebabkan rendahnya nilai efisiensi adalah kesalahan dalam desain turbin dan generator yang digunakan (Yadav dan Chauhan 2014), sehingga simulasi desain turbin dapat mengurangi kesalahan dalam melakukan sebuah desain bangunan turbin untuk membangun pikohidro. Hasil penelitian sebelumnya juga dilakukan oleh *Water and Energy Research Laboratory (WERL)*, yang juga menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics (CFD)*, menunjukkan agar hasil simulasi dapat digunakan untuk menentukan jenis pembangkit pikohidro dan dapat dikembangkan untuk menentukan turbin pikohidro, dimana hasil simulasi ini dapat meningkatkan *output* daya sebesar 20% (Powell et al. 2018), hal ini membuktikan bahwa simulasi dalam desain pikohidro diperlukan untuk meningkatkan desain pikohidro dan hasil pembangunan.

Peneliti dari *Oregon State University* juga menyatakan bahwa desain pikohidro diperlukan untuk menentukan jenis turbin yang tepat untuk digunakan, sehingga mereka membandingkan jenis turbin skala laboratorium, hal ini berfungsi untuk menemukan turbin yang cocok dalam desain pikohidro (Cobb dan Sharp 2013). menemukan turbin yang tepat dapat dilakukan dengan menggunakan hasil simulasi *CFD*, dimana simulasi *CFD* ini memiliki kelebihan seperti hemat biaya dan pengujian dapat dilakukan dalam jumlah yang lebih signifikan. Namun, *CFD* juga memiliki kelemahan, dimana pendekatan *solver* ini merupakan estimasi yang menggunakan persamaan dan numerik dalam pendekatannya dengan tingkat akurasi masih 70%, seperti yang telah dianalisis oleh Departemen Mekanik Teknik, Universitas Indonesia, sehingga hasil yang diperoleh dari simulasi *CFD* tidak nilai mutlak (Adanta et al. 2019).

Data simulasi yang dihasilkan menunjukkan bahwa desain turbin PLTA memiliki nilai daya pereduksi dalam mengubah energi hidrolis menjadi energi mekanik. Di sisi lain, dalam desain turbin *impuls* memiliki kecepatan aliran input adalah 0,74 m/s, daya turbin *impuls* yang dihasilkan hanya 2,5 kW – 3,6 kW, sedangkan daya yang diubah menjadi daya listrik akan mengalami penurunan daya dari faktor daya motor listrik (Dwiyanto et al. 2016). Perkiraan simulasi ini hanya valid bila menggunakan analisis rasio energi kinetik, artinya percepatan laju aliran menyebabkan peningkatan energi potensial. Hal ini seperti turbin *impuls* yang hanya mempertimbangkan energi kinetik. Turbin *helix* menghasilkan daya 0,022 - 0,175 kWh, dengan kecepatan aliran 0,5 m/s. Namun, turbin ini sangat cocok untuk digunakan di saluran dengan volume air yang rendah dan stabil. Desain bangunan turbin yang paling baik digunakan untuk saluran irigasi adalah desain turbin Kaplan, karena debit dan kecepatan aliran yang terkonversi relatif lebih optimal ketika terkena sudu turbin, seperti terlihat pada hasil simulasi dimana konversi yang dihasilkan lebih seragam.

4.3 Analisis Kecepatan dan Energi Aliran

Analisis dilakukan berdasarkan beberapa variabel yaitu kedalaman terjun, kecepatan aliran, energi hidrolik, energi turbin, potensi energi untuk dikonversikan oleh mesin. Pengamatan dilakukan pada aliran sub kritis dan aliran superkritis bangunan terjun BCRJ 7a. Pengukuran dilakukan seperti pada gambar 14 berikut:



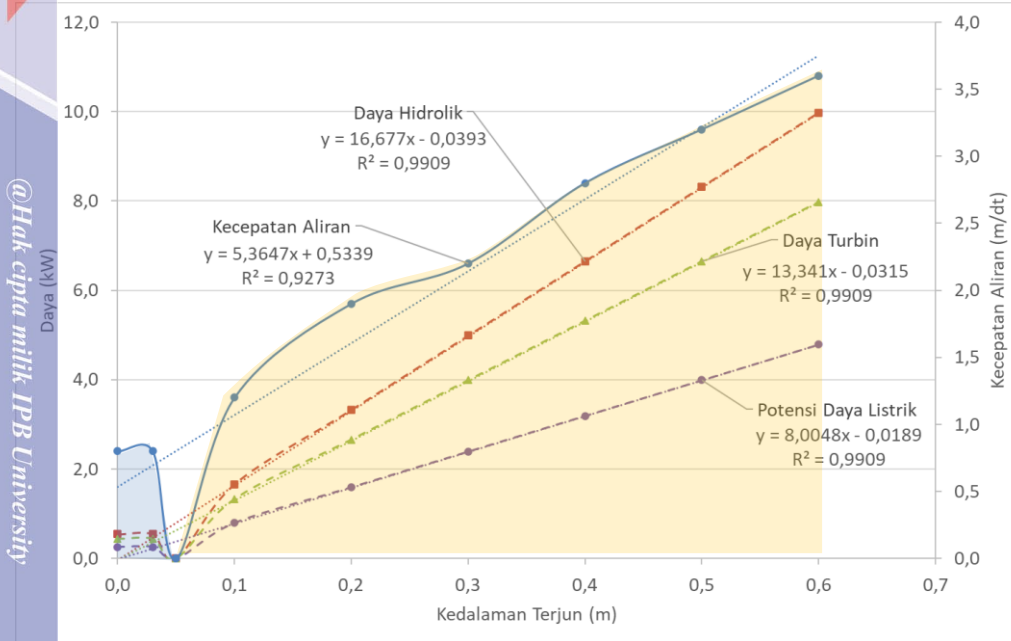
Gambar 14 Pengukuran Sub-Kritis dan Super-Kritis (Side View)

Analisis dilakukan berdasarkan dua metode pengolahan data, diantaranya yaitu hasil pengukuran dan perhitungan, Adapun data hasil pengukuran yaitu data dari nilai kedalaman terjun dan kecepatan aliran sedangkan untuk data hasil perhitungan yaitu data dari nilai daya aliran irigasi. Hasil pengukuran dan perhitungan dapat dilihat pada tabel 8.

Tabel 8 Hasil Pengukuran Kecepatan dan Perhitungan dan Daya Aliran Irigasi

Keterangan	Titik Pengukuran										Satuan
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Kedalaman	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	m
Kecepatan Aliran	0,8	0,8	0,8	0,8	1,2	1,9	2,2	2,8	3,2	3,6	m/dt
Daya Hidrolik	0,5	0,5	0,5	0,5	1,7	3,3	5,0	6,7	8,3	10,0	kW
Daya Turbin	0,4	0,4	0,4	0,4	1,3	2,7	4,0	5,3	6,7	8,0	kW
Potensi daya listrik	0,3	0,3	0,3	0,3	0,8	1,6	2,4	3,2	4,0	4,8	kW

Analisis dilakukan berdasarkan beberapa variabel yaitu kedalaman terjun, kecepatan aliran, daya pada aliran irigasi dapat lihat pada gambar 15. Bangunan terjun terdiri dari tiga jenis aliran yaitu sub-kritis, kritis dan super kritis, dimana aliran sub-kritis dapat dihitung dengan persamaan Manning dan Chazy, sedangkan dapat di ukur menggunakan *current meter*. Menentukan nilai kritis aliran hanya melakukan pengamatan dari nilai sub-kritis dan super kritis, dimana nilai kritis aliran pada bangunan terjun ini adalah nol.



*Ket: Zona biru aliran sub-kritis, zona kuning aliran super kritis, dan nilai 0 adalah zona kritis

Gambar 15. Grafik Kecepatan dan Daya yang dihasilkan oleh Energi Aliran Irigasi

Bangunan turbin Kaplan merupakan saluran tertutup (pipa) sebagai pembawa aliran airnya, sehingga didalam menentukan *inlet* perlu dilakukan analisis yang tepat. *Inlet* bangunan turbin pikohidro diposisikan pada titik yang optimal, yaitu menghasilkan kecepatan aliran yang seragam dengan kecepatan cenderung stabil, sehingga pengamatan juga dilakukan terhadap posisi *inlet* pada desain bangunan turbin. Nilai kecepatan aliran sub-kritis menunjukkan bahwa kecepatan aliran yang semakin dekat dengan dasar saluran maka kecepatan aliran semakin pelan, seperti pada ketinggian 0,6 m dari dasar saluran memiliki kecepatan aliran 0,74 m/s dan ketinggian 0,15 memiliki kecepatan aliran 0,3 m/s. Hasil pengukuran harus dilakukan validasi dengan perhitungan yang menggunakan persamaan Manning dan Chazy (Kementerian PUPR 2013a).

Berdasarkan hasil percobaan posisi *inlet* yang paling baik yaitu pada kedalaman 0,225 meter dari permukaan air, dimana aliran air dalam pipa tidak tercampur dengan udara yang mengganggu kestabilan putaran turbin. Percobaan dilakukan dengan menempatkan *inlet* pada aliran sub-kritis yang pengamatannya dimulai pada aliran yang memiliki kecepatan tertinggi, tetapi pada hasil pengamatan kecepatan air tercepat tidak optimal sebagai posisi *inlet*, karena aliran yang masuk kedalam pipa tercampur dengan aliran udara, sehingga menyebabkan aliran air tidak seragam yang menyebabkan penurunan ekstrim pada putaran turbin, akibat putaran turbin yang tidak stabil ini dapat merusak generator. Tabel hasil pengukuran menggunakan persamaan Manning dan Chazy dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 9. Perbandingan nilai kecepatan aliran irigasi Manning, Chazy dan *current meter*

H Meter	Manning	Chazy	Current Meter			
	V m/s	V m/s	V_{tengah} m/s	V_{kiri} m/s	V_{kanan} m/s	$V_{\text{rata-rata}}$ m/s
0,000	0,0	0,0	0	0	0	0,0
0,075	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
0,150	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3
0,225	0,4	0,4	0,4	0,3	0,5	0,4
0,300	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5
0,375	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
0,450	0,7	0,7	0,7	0,6	0,8	0,7
0,525	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8
0,600	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8

Titik tengah *inlet* pada desain bangunan turbin diposisikan pada 0,225 meter dari permukaan air memiliki debit *inlet* yang stabil tetapi bukan merupakan kecepatan maksimal dari aliran sub-kritis. Kecepatan aliran yang digunakan hanya 62,5 % dari kecepatan aliran maksimum saluran, sehingga untuk meningkatkan kecepatan aliran perlu dilakukan modifikasi peningkatan kecepatan aliran pada komponen bangunan pembawa aliran, dimana cara yang dapat digunakan untuk meningkatkan kecepatan aliran pada pipa yaitu dengan melakukan reduksi.

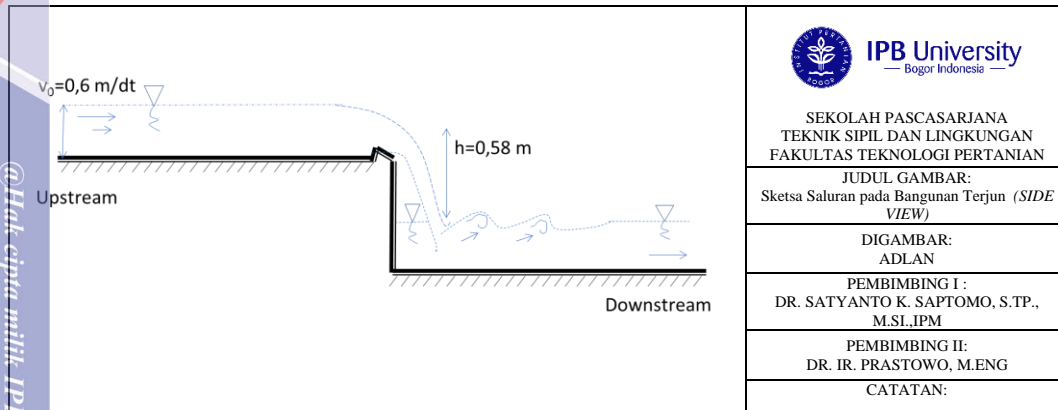
4.4 Optimasi Posisi Turbin dan Saluran Bangunan Turbin

Salah satu tahapan yang penting dalam desain bangunan turbin adalah melakukan optimasi posisi turbin, hal ini bertujuan untuk mengetahui titik optimal didalam penempatan posisi turbin yang akan di desain.

a. Optimasi posisi turbin terhadap pertimbangan arus balik

Kecepatan dan tekanan maksimum yang terjadi pada saluran terjun terletak pada kedalaman maksimum yaitu 0,58 meter, dimana kecepatan aliran pada titik ini adalah 3,97 m/s, akan tetapi kita perlu mempertimbangkan tinggi dari *hydraulic jump* pada terjunan. Tinggi *hydraulic jump* terjunan dapat di temukan menggunakan persamaan *Froude* (R. A. Dita Nurjanah 2014), melalui persamaan *Froude* didapatkan nilai tinggi *hydraulic jump* yaitu sebesar 2 cm dengan nilai *Froude* sebesar 0,27, sehingga jarak 8 cm bangunan turbin dari permukaan *downstream* masih aman dari arus balik.

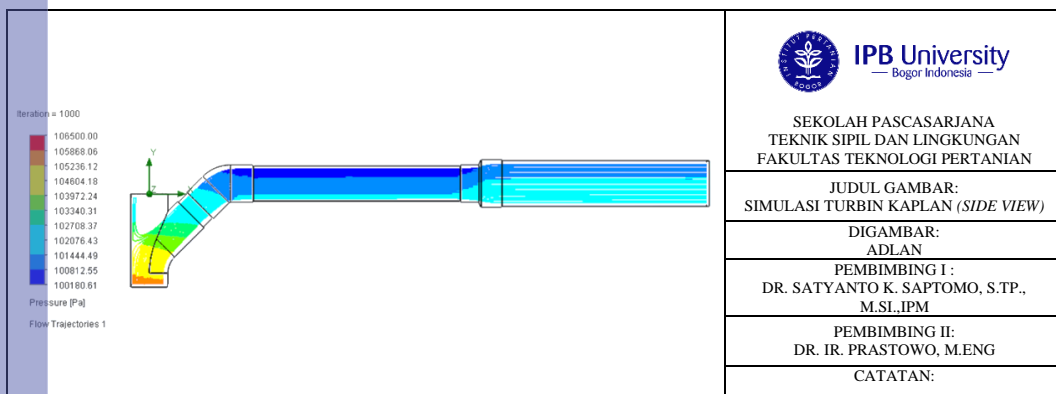
Nilai toleransi diambil berdasarkan pendekatan yang mempertimbangkan tiga kali lipat dari kemungkinan peningkatan tinggi gelombang *hydraulic jump*, adapun faktor peningkatan ini terjadi akibat peningkatan debit saluran irigasi, dimana tinggi locatan normalnya 2 cm dari *downstream*, sehingga jika terjadi tiga kali lipat peningkatan lompatan tinggi gelombang *hydraulic jump* yaitu 6 cm, masih menyisakan 2 cm jarak dari turbin. Toleransi yang dapat diambil untuk penempatan posisi turbin terhadapantisipasi arus balik dari *hydraulic jump* adalah tinggi *hydraulic jump* dari tiga kali peningkatan tinggi gelombang loncatan.



Gambar 16 Sketsa Saluran pada Bangunan Terjun (*Side View*)

5. Optimasi saluran bangunan turbin

Saluran pipa bangunan turbin yang dipasang *reducer* diharapkan dapat meningkatkan laju aliran, dimana *inlet* turbin menggunakan pipa berdiameter 8 inci yang direduksi ke pipa 6 inci, sehingga terjadi peningkatan debit *inlet* turbin. Rencana desain ini disimulasikan kembali untuk mengetahui kondisi dari hasil desain. Tekanan aliran dalam (Pipa) terdiri atas tiga jenis tekanan yaitu tekanan statis, tekanan dinamis, dan tekanan hidrostatik (Ghurri 2014). Jika ingin dilakukan sebuah rekayasa energi terhadap suatu aliran, maka dapat dilakukan rekayasa terhadap luas penampang *inlet* sehingga meningkatkan laju kecepatan aliran air dalam pipa. Reduksi aliran ini bertujuan untuk menambah kecepatan pada turbin akan tetapi dampaknya mengurangi tekanan pada turbin.



Gambar 17 Hasil simulasi rancangan optimasi posisi turbin

Posisi turbin mempertimbangkan tekanan maksimum yang dihasilkan oleh rancangan bangunan turbin, artinya perencanaan sangat mempertimbangkan potensi daya terbesar yang disebabkan oleh tekanan aliran air pada batas yang masih memungkinkan untuk di konversi menjadi energi, akan tetapi didalam simulasi kita perlu memastikan hasil untuk mengurangi kesalahan. Hasil simulasi tekanan yang dihasilkan dapat divalidasi menggunakan persamaan Bernoulli.

c. Optimasi panjang saluran pembawa aliran

Hasil perhitungan menggunakan persamaan Bernoulli dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 10 Hasil hitungan menggunakan persamaan Bernoulli

Tekanan Awal	Kecepatan Awal	Massa jenis	Elevasi	Gravitasi Statis	Hidrostatik	Dinamis	Tekanan Pipa
Pa	m/s	Kg/m ³	m	m/s ²	Pa	Pa	Pa
101325	0,600	997	0	9,81	0	179,46	101354,37
101325	0,600	997	0,43	9,81	101325	3578,6	104942,40
101325	0,600	997	0,07	9,81	4263,2	221,84	105810,04

Salah satu pertimbangan didalam menghitung tekanan aliran air pada saluran pipa yaitu mengetahui nilai *headloss* yang terjadi didalam saluran pipa bangunan turbin pikohidro. *Headloss* dikatagorikan menjadi dua bagian yaitu *mayor losses* dan *minor losses* (Nurnawaty dan Sumardi 2020), adapun nilai dari *mayor losses* dan *minor losses* dapat dilihat pada tabel 11 dan tabel 12. *Mayor losses* merupakan kehilangan tekanan akibat Panjang saluran pipa, sedangkan *minor losses* merupakan kehilangan tekanan yang disebabkan oleh *inlet, knee, pipa T dan outlet*.

Mayor losses terjadi karena gesekan aliran dalam (pipa), semakin tinggi koefisien geseknya maka semakin tinggi nilai dari *mayor losses*. Koefisien gesek ditentukan oleh jenis dari bahan yang digunakan oleh saluran, pada penelitian ini menggunakan pipa pvc sebagai media saluran, sedangkan *minor losses* terjadi akibat perubahan bentuk/arrah saluran sehingga terjadi pengurangan tekanan pada saluran.

Tabel 11. Nilai Mayor Losses pada pipa bangunan turbin pikohidro

L	D	V	G	F	Hf	Pmajor
m	M	m/dt	m/s ²		m	Pa
1	0,203	0,6	9,8	0,015	0,001	13,287
1	0,152	0,6	9,8	0,015	0,002	17,717
0,8	0,152	0,6	9,8	0,015	0,001	14,173

Tabel 12. Nilai Minor losses pada pipa bangunan turbin pikohidro

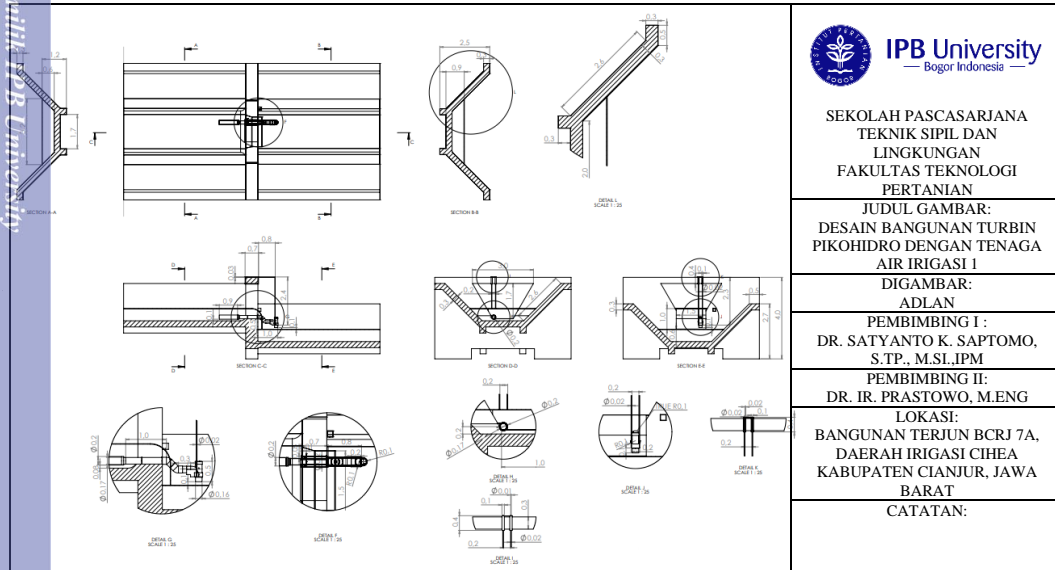
Inlet	Reducer	bend 45a	tee 45	Hftotal	Pminor
m	M	m	M	m	Pa
0,014	0,018	0,031	0,031	0,094	921,6

Selain mempertimbangkan posisi turbin pada kedalaman terjun, didalam optimasi posisi turbin juga memperhatikan bentuk dari rancangan pipa, dimana desain pipa pada bangunan terjun dirancang minimal dari kehilangan tekanan yang di sebabkan oleh *headloss*, sehingga perlu dilakukan pertimbangan panjang saluran pipa optimum dan minimal dari penyebab *minor losses* seperti belokan pipa yang dapat menyebabkan penurunan tekanan aliran.

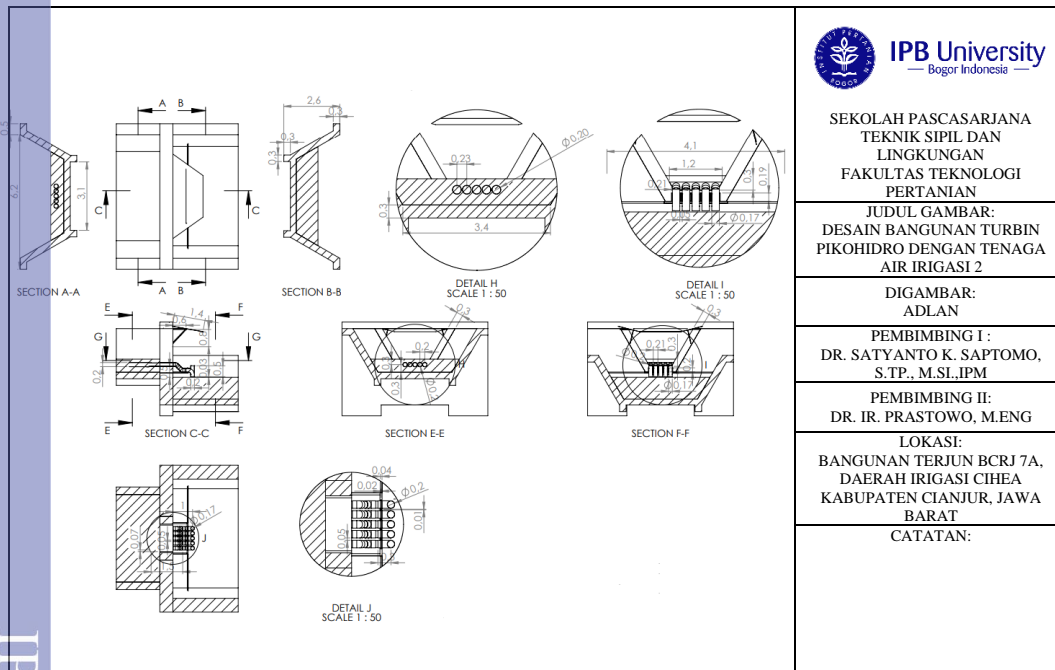


4.5 Desain Bangunan Turbin dan Hasil Uji Bangunan Turbin

Desain bangunan turbin terdiri atas dua jenis desain bangunan yaitu bangunan turbin tunggal dan bangunan multi turbin, berikut merupakan hasil desain bangunan turbin pikohidro dengan tenaga air irigasi yang terlihat pada gambar 18 dan gambar 19. Desain bangunan turbin tunggal merupakan salah satu desain bangunan turbin pikohidro yang dihasilkan dari penelitian ini, dimana untuk menerapkan desain bangunan pikohidro seperti dalam penelitian ini harus mengikuti kualifikasi minimal yang terdapat pada desain bangunan turbin tunggal ini.



Gambar 18 Desain satu bangunan turbin pikohidro dengan tenaga air irigasi



Gambar 19 Desain bangunan multi turbin pikohidro dengan tenaga air irigasi

Saluran BCRJ 7a D.I Cihea, Kabupaten Cianjur ini mampu menerapkan lima bangunan turbin dalam satu bangunan terjun, sehingga daya yang dihasilkan lima kali dari desain bangunan turbin tunggal, seperti yang tampak pada gambar 19. Desain bangunan turbin ini bisa diterapkan dengan dua kondisi yaitu dengan kondisi turbin tunggal atau multi turbin. Desain turbin tunggal yaitu dengan memasang satu desain bangunan turbin pikohidro sebagai pembangkit listrik tenaga air irigasi, sedangkan multi turbin yaitu dengan memasang beberapa turbin sesuai dengan kapasitas saluran irigasi, sehingga dapat mengoptimalkan seluruh potensi saluran yang ada. Desain bangunan turbin pikohidro tenaga air irigasi ini sebaiknya dilakukan pengujian terkait daya yang dihasilkan, karena pengujian daya yang dihasilkan ini dapat mengetahui nilai konversi energi aliran terhadap energi listrik yang dihasilkan.

Pengujian dilakukan berdasarkan beberapa dasar pengujian yaitu uji fungsional dan uji kinerja desain bangunan turbin, pada uji fungsional peneliti melakukan uji fungsi komponen dan transmisi. Hasil uji komponen yang dilakukan yaitu pengujian terhadap fungsi komponen elektronik, generator, serta alat ukur yang digunakan untuk uji kinerja, sedangkan pada uji transmisi dilakukan pengujian penyaluran gerak turbin agar dapat memutar generator dengan baik, dimana transmisi diharapkan bergerak pada titik porosnya, adapun hasil yang didapatkan yaitu komponen dan transmisi berfungsi dengan baik.

Setelah dilakukan uji fungsi dilakukan uji kinerja desain bangunan turbin, data uji kinerja yang didapatkan yaitu nilai putaran poros turbin, kecepatan aliran output, dan daya yang dihasilkan generator. Putaran poros turbin yang dihasilkan pada debit 18 liter/dt menghasilkan 106 rpm putaran turbin, adapun kecepatan aliran *inlet* yaitu 0,6 m/s. Desain bangunan turbin tunggal (gambar 18) yang dapat menghasilkan daya 24,5 kWh/hari, dengan tegangan 15,6 volt dan arus 1,1 ampere, maka desain bangunan multi turbin (gambar 19) dapat menghasilkan daya sebesar 122,75 kWh/hari.

Tabel 13. Spesifikasi Teknis Desain Bangunan Turbin Pikohidro Kedalaman Terjun 0,5 m dengan diameter turbin 5,5 inci

Jumlah bangunan Turbin	T1	T2	T3	T4	T5	Unit
Daya Turbin	5,71	11,42	17,13	22,84	28,55	kWh
Daya Listrik per Jam	1,02	2,04	3,06	4,09	5,11	kWh
Daya Listrik per Tahun	8966	17933	26900	35867	44834	kWh
Debit Minimal	18	36	54	72	90	l/dt
Berat Generator dan Transmisi	8	16	24	32	40	Kg

Keterangan : T1 yaitu satu bangunan turbin, T2 untuk dua bangunan turbin, seterusnya sampai T5 untuk 5 bangunan turbin.

Parameter utama dari desain bangunan turbin pikohidro yaitu debit dan kedalaman terjun, jika desain bangunan turbin pikohidro menggunakan saluran tertutup (pipa) maka perlu mempertimbangkan nilai *headloss* terutama yang disebabkan *minor*

losses, desain bangunan turbin pikohidro tenaga air irigasi yang telah di desain oleh peneliti memiliki batas parameter minimum debit 18 l/dt dan kedalaman terjun 0,5 m, adapun kekurangan dari penelitian ini yaitu masih perlu pengkajian terkait dengan sistem transmisi dan elektronika (generator, *inverter*, dst). Penelitian ini lebih fokus pada desain bangunan dalam mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya air irigasi sebagai energi hidrolis penggerak turbin.

Saat ini kelebihan energi aliran dari bangunan terjun diredam dengan bangunan peredam energi yang merupakan salah satu bagian dari bangunan irigasi, fungsi bangunan peredam yaitu mengurangi energi aliran air. Fungsional lain dari pembangkit listrik pikohidro tenaga air irigasi dapat berfungsi sebagai peredam energi aliran, khususnya pada bangunan terjunan di irigasi. Berdasarkan kapasitasnya desain bangunan turbin pikohidro ini sudah dapat meredam energi aliran pada bangunan terjun sebesar 122,75 kWh/hari. Evaluasi yang bisa di ambil dari desain bangunan turbin pikohidro ini salah satunya yaitu bisa mempertimbangkan pemasangan desain bangunan turbin ini sebagai alternatif pilihan untuk meredam kelebihan energi pengganti bangunan peredam yang ada saat ini, karena selain meredam energi, bangunan turbin pikohidro juga dapat memanfaatkan energi tersebut menjadi listrik. Bangunan turbin pikohidro sebaiknya dipertimbangkan sebagai bagian dari bangunan terjun aliran irigasi untuk meredam energi.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Bangunan turbin pikohidro tenaga air irigasi telah dapat didesain dengan turbin reaksi kaplan yang terdiri dari desain turbin tunggal dengan daya 24,5 kWh/hari dan desain multi turbin dengan daya 122,75 kWh/hari. Dalam desain bangunan turbin pikohidro juga dilakukan beberapa analisis dengan hasil sebagai berikut:

1. Kecepatan aliran irigasi berkisar antara 0,4 m/s – 0,74 m/s dengan potensi daya 1,4 kWh – 655,1 kWh.
2. Tipe Kaplan adalah turbin terbaik yang dapat digunakan pada desain bangunan turbin pikohidro tenaga irigasi.
3. Pada kondisi debit *inlet* 18 l/s dan ketinggian terjun 0,5 m bangunan turbin pikohidro menghasilkan putaran poros turbin sebesar 106 rpm, tegangan 15,6 volt dan arus 1,1 ampere.

5.2 Saran

1. Jenis turbin yang digunakan harus dapat dioperasikan pada kecepatan aliran diantara 0,4 m/s – 0,74 m/s.
2. Penerapan hasil desain bangunan turbin pikohidro ini harus memperhatikan posisi *inlet* pada kedalaman 0,23 m, serta posisi turbin pada tinggi terjun optimum 0,5 m.
3. Bangunan turbin pikohidro sebaiknya dipertimbangkan sebagai bagian dari bangunan terjun aliran irigasi untuk meredam energi.



DAFTAR PUSTAKA

- Abd Rahman Wahab, Adrian. 2021. ANALISIS PENGARUH TINGGI HAMBATAN PLAT SEGITIGA TERHADAP DISTRIBUSI KECEPATAN ALIRAN DISALURAN TERBUKA (STUDI EKSPERIMENTAL). Makassar: Universitas Muhammadiyah Makassar .
- Abdulnaser Sayma. 2009. *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*.
- Adanta D, Budiarmo, Warjito, Mahlia TMI. 2019. Investigation of the effect of gaps between the blades of open flume Pico hydro turbine runners. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 13(3):5493–5512. doi:10.15282/jmes.13.3.2019.18.0444.
- Ady Purnama. 2011. Studi Kelayakan Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Studi Kasus: PLTMH Minggir pada Saluran Irigasi Minggir di Padukuhan Klagaran Desa Sendangrejo Kecamatan Minggir Kabupaten Sleman. *Jurnal UNSA Progress*. 10:93–111.
- Alief Avicenna Luthfie. 2017. Analisis Pengaruh Perubahan Sudut Pipa Siphon Terhadap Performasi Turbin Hydrocoil dengan Menggunakan Metode Computational Fluid Dynamic. *Jurnal Teknik Mesin (JTM)*. 6:41–47.
- Berlamont J. 1986. *Hydraulics of Pipe and Canal Networks*. Leuven, Belgium: Katholieke Universiteit Leuven Center for Irrigation Engineering.
- Bratislava in, Nechleba M, Mayer C, Evans AG. 1957. HYDRAULIC TURBINES Their Design and Equipment.
- Bryan Patrick Ho-Yan. 2012. Design of a Low Head Pico Hydro Turbine for Rural Electrification in Cameroon. Guelph, Ontario, Canada: The University of Guelph.
- Cobb BR, Sharp K v. 2013. Impulse (Turgo and Pelton) turbine performance characteristics and their impact on pico-hydro installations. *Renew Energy*. 50:959–964. doi:10.1016/j.renene.2012.08.010.
- Dedi Kusnadi Kalsim, Budi Indra Setiawan, Asep Sapei, Prastowo, Erizal. 2006. PERANCANGAN IRIGASI DAN DRAINASE INTERAKTIF BERBASIS TEKNOLOGI INFORMASI. Bogor.
- Du J, Yang H, Shen Z, Chen J. 2017. Micro hydro power generation from water supply system in high rise buildings using pump as turbines. *Energy*. 137:431–440. doi:10.1016/j.energy.2017.03.023.
- Dwi Irawan. 2014. PROTOTYPE TURBIN PELTON SEBAGAI ENERGI ALTERNATIF MIKROHIDRO DI LAMPUNG. *TURBO*. 3(1):1–6.
- Dwiyanto V, Indriana DK, Tugiono S. 2016. Analisis Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Studi Kasus : Sungai Air Anak (Hulu Sungai Way Besai). *JRSDD*. 4(3):407–422.
- Effendy. 2012. Desain Saluran Irigasi. *PILAR Jurnal Teknik Sipil*. 7:1–8.
- Faro A. Ayodeji. 2020 Jul. Navier-Stokes Equation (An overview and the simplification). *Favour Abigail Obiomah.*, siap terbit.
- Ghurri A. 2014. *Dasar-Dasar Mekanika Fluida*. Denpasar: Jurusan Teknik Mesin – Universitas Udayana.
- Gómez-Llanos E, Durán-Barroso P, Arias-Trujillo J, Ceballos-Martínez JM, Torrecilla-Pinero JA, Candel-Pérez M. 2018. Small and Micro-Hydropower Plants Location by Using Geographic Information System. Di dalam: *t*

Environment, Green Technology and Engineering International Conference (EGTEIC 2018). Caceres, Spain: MDPI AG. hlm 1300.

- Haidar AMA, Senan MFM, Noman A, Radman T. 2012. Utilization of pico hydro generation in domestic and commercial loads. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16(1):518–524. doi:10.1016/j.rser.2011.08.017.
- Jamali F. 2014. STUDI PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MINIHIIDRO BERBANTUAN PROGRAM TURBNPRO DI DESA SINAR PEKAYAU KECAMATAN SEPAUK KABUPATEN SINTANG. *JURNAL TEKNIK ELEKTRO UNIVERSITAS TANJUNGPURA*. 1.
- Jawahar CP, Michael PA. 2017. A review on turbines for micro hydro power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 72:882–887. doi:10.1016/j.rser.2017.01.133.
- Jayaram V, Bavanish B. 2020. A brief review on the Gorlov helical turbine and its possible impact on power generation in India. Di dalam: *Materials Today: Proceedings*. Volume ke-37. Elsevier Ltd. hlm 3343–3351.
- Juliana IP, Weking AI, Jasa L. 2018. Pengaruh Pengaruh Sudut Kemiringan Head Turbin Ulir Terhadap Daya Putar Turbin Ulir Dan Daya Output Pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*. 17(3):393. doi:10.24843/mite.2018.v17i03.p14.
- Kementerian PUPR. 2013a. *Standar Perencanaan Irigasi Kriteria Perencanaan Bagian Saluran (KP-03)*. Jakarta.
- Kementerian PUPR. 2013b. *Standar Perencanaan Irigasi Kriteria Perencanaan Bagian Perencanaan Jaringan Irigasi (KP-01)*. Jakarta: Direktur Jenderal Sumber Daya Air.
- Kementerian PUPR. 2013c. *Standar Perencanaan Irigasi Kriteria Perencanaan Bagian Petak Tersier (KP-05)*. Jakarta: Direktur Jenderal Sumber Daya Air.
- Kementerian PUPR. 2013d. *Standar Perencanaan Irigasi Kriteria Perencanaan Bagian Bangunan (KP-04)*. Di dalam: Kodoatie RJ, editor. Jakarta: Direktur Jenderal Sumber Daya Air.
- Larentis DG, Collischonn W, Olivera F, Tucci CEM. 2010. Gis-based procedures for hydropower potential spotting. *Energy*. 35(10):4237–4243. doi:10.1016/j.energy.2010.07.014.
- Mafruddin, Dwi Irawan. 2020. *Turbin Impuls*. Volume ke-1.
- Marliansyah R, Putri DN, Khoutama A, Hermansyah H. 2018. Optimization potential analysis of micro-hydro power plant (MHPP) from river with low head. Di dalam: *Energy Procedia*. Volume ke-153. Elsevier Ltd. hlm 74–79.
- Muliawan A, Yani A. 2016. Analisis Daya dan Efisiensi Turbin Air Kinetis Akibat Perubahan Putaran Runner. *Journal of Sainstek*. 8(1):1–9.
- Nasir BA. 2013. *Design of Micro-Hydro-Electric Power Station*.
- Nurnawaty, Sumardi. 2020. Analisis Perubahan Tinggi Tekanan Akibat Sudut Belokan 90 dan 45 dengan Menggunakan Fluid Friction Apparatus. *Jurnal Teknik Hidro*. 13(1).
- Pietersz R, Soenoko R, Wahyudi S. 2013. Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Optimalisasi Kinerja Turbin Kinetik Roda Tunggal. *Jurnal Rekayasa Mesin*. 4(3):220–226.
- Powell D, Ebrahimi A, Nourbakhsh S, Meshkaldini M, Bilton AM. 2018. Design of pico-hydro turbine generator systems for self-powered electrochemical

water disinfection devices. *Renew Energy*. 123:590–602. doi:10.1016/j.renene.2017.12.079.

Prastowo. 2010. *DAYA DUKUNG LINGKUNGAN ASPEK SUMBERDAYA AIR*. Bogor.

R. A. Dita Nurjanah. 2014. ANALISIS TINGGI DAN PANJANG LONCAT AIR PADA BANGUNAN UKUR BERBENTUK SETENGAH LINGKARANA Dita Nurjanah. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*. 2(3):578–582.

Razan JI, Islam RS, Hasan R, Hasan S, Islam F. 2012. A Comprehensive Study of Micro-Hydropower Plant and Its Potential in Bangladesh. *ISRN Renewable Energy*. 2012:1–10. doi:10.5402/2012/635396.

Rompas PTD. 2011. ANALISIS PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO (PLTMH) PADA DAERAH ALIRAN SUNGAI ONGKAK MONGONDOW DI DESA MUNTOI KABUPATEN BOLAANG MONGONDOW. *Jurnal Penelitian Saintek*. 16(2):160–171. <http://niasonline.net/2006/10/12/>.

Schneiderbauer S, Krieger M. 2014. What do the Navier-Stokes equations mean? *Eur J Phys*. 35(1). doi:10.1088/0143-0807/35/1/015020.

Siswanto T, Hendra Kusuma D, Raikhani A. 2016. DESAIN OPTIMAL LOAD FREQUENCY CONTROL (LFC) PADA SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO (PLTMH) MENGGUNAKAN METODE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO). *Prosiding SENTIA – Politeknik Negeri Malang*. 6:35–39.

Subekti RA. 2010. SURVEY POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKRO HIDRO DI KUTA MALAKA KABUPATEN ACEH BESAR PROPINSI NANGGROE ACEH DARUSSALAM. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*. 01(1).

Suharyati, Sadmoko Hesti Pambudi, Jamaludin Lastiko Wibowo, Nurina Indah Pratiwi. 2019. *Indonesia Energy Outlook*. Jakarta.

Sukamta S, Kusmantoro A. 2013. Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Jantur Tabalas Kalimantan Timur. *Jurnal Teknik Elektro*. 5:58–63.

Teguh BP, Trisno MD, Joni Petot. 2007. PENGUJIAN KARAKTERISTIK UNJUK KERJA TURBIN MIKROHIDRO DI DESA CIASMARA 3). *Mesin*. 9:45–52.

Tirono M. 2012. PEMODELAN TURBIN CROSS-FLOW UNTUK DIAPLIKASIKAN PADA SUMBER AIR DENGAN TINGGI JATUH DAN DEBIT KECIL. *Jurnal Neutrino*. 4:112–120.

Versteeg H, Malalasekera W. 1995. *Computation Fluid Dynamic*. UK: Longman Group.

Williamson SJ, Stark BH, Booker JD. 2011. Low Head Pico Hydro Turbine Selection using a Multi-Criteria Analysis.

Yadav G, Chauhan AK. 2014. DESIGN AND DEVELOPMENT OF PICO MICRO HYDRO SYSTEM BY USING HOUSE HOLD WATER SUPPLY. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*.

Zainuddin H, Lazi JM, Rubel Basar M, Ibrahim Z. 2009. Design and development of pico-hydro generation system for energy storage using consuming water distributed to houses. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*. 3.

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir pada 08 Februari 1994 dari pasangan Bapak Rusman Teguh dan Ibu Laila Sari di kabupaten Aceh Tengah. Riwayat Pendidikan penulis yaitu SDN 8 (Buntul Kubu) Takengon, SMPS Al-Azhar Medan, SMAN 4 Takengon, S1 Teknik Pertanian Universitas Padjadjaran, dan S2 Teknik Sipil dan Lingkungan IPB. Peneliti telah menikah dengan Anisa Hasanah putri dari Bapak Yuyun Rusmana dan Ibu Aan Munawaroh. Penulis tergabung kedalam Lembaga PPAB Rejanawana, Wanadri dan KGAB Bandung, kemudian bergabung ke IKAMAPA Bogor saat menjadi mahasiswa S2 IPB.

Penulis memiliki hobi menulis karya ilmiah, pengkajian, hingga penelitian terkait keilmuan, selain itu peneliti juga senang melakukan kegiatan di alam bebas. Hobi tersebut telah berhasil meloloskan seleksi pendanaan PKM (Program Kreativitas Mahasiswa) Dikti di tahun pendanaan 2013 – 2015. Penulis kemudian juga melakukan ekspedisi kualitas air munggaran amerta di 17 gunung Jawa, Bali dan Lombok. Penulis juga tergabung didalam tim penulisan karya tulis ilmiah diantaranya yaitu:

1. Evaluasi Metode Pendugaan Laju Evapotranspirasi Standar (ETo) Menggunakan Bahasa Pemrograman *Visual Basic Microsoft Excel* di Kabupaten Nagan Raya Aceh: *Evaluation of Standard Evapotranspiration Rate Estimation Method (ETo) Using Microsoft Excel Visual Basic Programming Language in Nagan Raya Aceh District*
2. *Experimental and numerical investigation of laboratory scale sheetpipe-typed automatic subsurface irrigation*
3. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Pico hydro turbine building design utilizing irrigation water power: CFD Simulation.*

Pengalaman kerja penulis diantaranya yaitu asisten dosen di Unpad dan IPB, pembantu peneliti di Lab. Wageningen IPB, kemudian pernah bekerja di OP II BBWS Citarum untuk pembangunan irigasi di kabupaten Bandung.