

**POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO  
(PLTMH) DI SUNGAI DAMAR KECAMATAN PAGERUYUNG  
KABUPATEN KENDAL**

**LAPORAN TUGAS AKHIR**

Laporan ini sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana S1

Program Studi Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Industri

Universitas Islam Sultan Agung

Semarang



Disusun oleh :

**Abu Abdillah Muhammad**

**30601900004**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG  
SEMARANG**

**2025**

**FINAL PROJECT REPORT**

**MICRO-HYDRO POWER PLANT (MHP) POTENTIAL IN  
DAMAR RIVER, PAGERUYUNG DISTRICT, KENDAL  
REGENCY**

This report is prepared to fulfill the requirements for obtaining a  
Bachelor's degree in the Electrical Engineering  
Program Faculty of Industrial Technology  
Universitas Islam Sultan Agung Semarang



Written By :

**Abu Abdillah Muhammad**

**30601900004**

**DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG  
SEMARANG**

**2025**

## LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul **“POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO (PLTMH) DI SUNGAI DAMAR KECAMATAN PAGERUYUNG KABUPATEN KENDAL”** ini disusun oleh:

Nama : Abu Abdillah Muhammad

NIM : 30601900004

Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Rabu

Tanggal : 5 Maret 2025

Pembimbing



**Prof. Dr. Ir. H. Muhamad Haddin, M.T.**

NIDN.0618066301

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Elektro



**Jenny Putri Hapsari, S.T., M.T.**

NIDN.0607018501

## LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan tugas Akhir dengan judul “POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO (PLTMH) DI SUNGAI DAMAR KECAMATAN PAGERUYUNG KABUPATEN KENDAL” ini telah dipertahankan di depan Dosen Penguji Tugas Akhir pada:

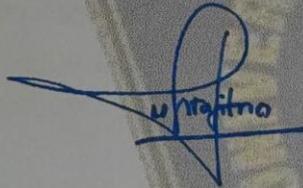
Hari : ~~Senin~~ Rabu

Tanggal : 5 Maret 2025

### TIM PENGUJI

Anggota Penguji 1

Anggota Penguji 2



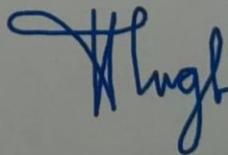
Agus Suprajitno, S.T., M.T.

Prof. Dr. Ir. H. Muhamad Haddin, M.T.

NIDN.0602047301

NIDN.0618066301

Ketua Tim Penguji



Dedi Nugroho, S.T., M.T.

NIDN. 0617126602

## SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Abu Abdillah Muhammad

NIM : 30601900004

Judul Tugas Akhir : **POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA  
MIKROHIDRO (PLTMH) DI SUNGAI DAMAR  
KECAMATAN PAGERUYUNG KABUPATEN  
KENDAL**

Dengan bahwa ini saya menyatakan bahwa judul dan isi Tugas Akhir yang saya buat dalam rangka menyelesaikan Pendidikan Strata Satu (S1) Teknik Industri tersebut adalah asli dan belum pernah diangkat, ditulis ataupun dipublikasikan oleh siapapun baik keseluruhan maupun sebagian, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka, dan apabila di kemudian hari ternyata terbukti bahwa judul Tugas Akhir tersebut pernah diangkat, ditulis ataupun dipublikasikan, maka saya bersedia dikenakan sanksi akademis. Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab.

Semarang, 7 Maret 2025

Yang Menyatakan



Abu Abdillah M.

NIM.30601900004

## PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Abu Abdillah Muhammad

NIM : 30601900004

Program Studi : Teknik Elektro

Fakultas : Teknologi industri

Dengan ini menyatakan Karya Ilmiah berupa Tugas akhir dengan Judul :  
**POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO (PLTMH)  
DI SUNGAI DAMAR KECAMATAN PAGERUYUNG KABUPATEN  
KENDAL**

Menyetujui menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan Hak bebas Royalti Non-Eksklusif untuk disimpan, dialihmediakan, dikelola dan pangkalan data dan dipublikasikan di internet dan media lain untuk kepentingan akademis selama tetap menyantumkan nama penulis sebagai pemilik hak cipta. Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta/Plagiarisme dalam karya ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan Universitas Islam Sultan Agung.

Semarang, 7 Maret 2025

Yang Menyatakan



Abu Abdillah M.

NIM.30601900004

## HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur dan kerendahan hati, skripsi ini saya persembahkan kepada kedua orangtua tercinta yang telah mencurahkan kasih sayang tanpa batas, memberikan dukungan moral dan material yang tak ternilai, serta doa yang tiada henti mengiringi setiap langkah perjalanan saya. Segala pencapaian ini tidak akan pernah terwujud tanpa pengorbanan, kesabaran, dan cinta yang telah Bapak dan Ibu berikan selama ini.

Persembahan ini juga saya tujukan kepada kakak perempuan tersayang yang selalu menjadi panutan, penyemangat, dan pendukung setia dalam setiap perjuangan akademik maupun kehidupan. Terima kasih atas bimbingan, nasihat, dan kasih sayang yang menjadi kekuatan bagi saya untuk terus melangkah maju hingga berhasil menyelesaikan karya ilmiah ini sebagai wujud bakti dan pembuktian bahwa kepercayaan kalian tidak sia-sia.

Penghargaan dan ucapan terima kasih yang tulus saya haturkan kepada dosen pembimbing yang dengan kesabaran dan kebijaksanaan telah membimbing, mengarahkan, serta memberikan masukan berharga selama proses penyusunan skripsi ini, untuk sahabat dan teman seperjuangan yang telah berbagi suka duka, canda tawa, dan momen berharga selama menempuh pendidikan ini terima kasih atas solidaritas, dukungan, dan kenangan indah yang telah kita ukir bersama. Semoga ikatan persahabatan kita tidak berhenti di garis finish akademik, namun terus terjalin sepanjang perjalanan hidup kita masing-masing, juga kepada keluarga besar dan BEM FTI UNISSULA yang telah menjadi rumah kedua, tempat berproses, belajar berorganisasi, dan mengembangkan soft skill yang tidak dapat ditemukan di ruang kuliah. Semoga ilmu yang telah diberikan mengalir sebagai amal jariyah dan persahabatan yang terjalin selama berproses bersama tetap abadi sepanjang masa karena sejatinya kesuksesan bukanlah tentang seberapa tinggi kita melangkah, namun seberapa banyak tangan yang kita genggam dalam perjalanan.

**-Abu Abdillah Muhammad (2025)**

## HALAMAN MOTTO

“Ingatlah, sesungguhnya pertolongan Allah itu dekat.”

**-QS. Al Baqarah : 214**

“Saat masa dalam mengejar masa depan, kamu harus fokus untuk meningkatkan kualitas diri dan menghilangkan kebiasaan buruk, ingatlah bahwa maksiat tidak akan pernah bisa bersatu dengan ilmu.”

**-Ust. Adi Hidayat**

“Intinya kita akan sulit bahagia kalau standart bersyukur adalah nikmat yang Allah berikan kepada orang lain.”

**-HOB**



## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur ke hadirat Tuhan yang Maha Pengasih atas segala limpahan kasih, karunia, dan kehendak-Nya yang telah memungkinkan penyelesaian Tugas Akhir Skripsi yang berjudul "**Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) di Sungai Damar Kecamatan Pageruyung Kabupaten Kendal**". Keberhasilan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari dukungan, bimbingan, serta doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, saya ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang tulus kepada yang terhormat:

1. Ibu Dr. Hj. Novi Marlyana, S.T., M.T. Selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Ibu Jenny Putri Hapsari, S.T., MT Selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Muhamad Haddin, M.T. Selaku Dosen Pembimbing yang telah meluangkan waktu selama proses bimbingan.
4. Bapak Muhammad Khosyi'in, S.T., M.T. Selaku Koordinator Tugas Akhir Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung.
5. Seluruh dosen pengajar di jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
6. Ibu dan Ayah tercinta dan seluruh keluarga tersayang yang telah senantiasa mendoakan dan memberikan semangat dalam penyelesaian Tugas Akhir.
7. Semua pihak yang telah membantu hingga terselesainya pembuatan tugas akhir maupun dalam penyusunan tugas akhir yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Meskipun telah diupayakan dengan maksimal, penulis menyadari bahwa Laporan Tugas Akhir ini masih memiliki berbagai kekurangan dan keterbatasan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan saran dan kritik yang konstruktif untuk penyempurnaan karya ini. Penulis berharap karya ini dapat memberikan manfaat bagi pembacanya.

Semarang, 7 Maret 2025

Abu Abdillah Muhammad

## DAFTAR ISI

<b>LAPORAN TUGAS AKHIR.....</b>	<b>i</b>
<b>FINAL PROJECT REPORT .....</b>	<b>ii</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING.....</b>	<b>iii</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....</b>	<b>iv</b>
<b>PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....</b>	<b>vi</b>
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN .....</b>	<b>vii</b>
<b>HALAMAN MOTTO .....</b>	<b>viii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xiv</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>xv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xvi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan .....	3
1.5 Manfaat .....	3
1.6 Sistematika Penulisan .....	3
<b>BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI .....</b>	<b>5</b>
2.1 Tinjauan Pustaka.....	5
2.2 Landasan Teori .....	8
2.2.1 Debit Andalan.....	8
2.2.2 Pembangkit listrik tenaga mikro hidro (PLTMH).....	9
2.2.3 Klasifikasi pembangkit listrik tenaga air.....	10
2.2.4 Komponen–komponen PLTMH.....	11
2.2.5 Turbin Air.....	16
2.2.6 Kriteria Pemilihan Jenis Turbin .....	23
2.2.7 Generator .....	26
2.2.8 Potensi Daya.....	28
2.2.9 Perencanaan Ekonomi .....	29

<b>BAB III METODE PENELITIAN.....</b>	<b>32</b>
3.1 Model Penelitian .....	32
3.2 Lokasi Penelitian.....	32
3.3 Data Penelitian .....	33
3.4 Tahapan Penelitian.....	34
3.4.1 Menentukan Debit Andalan.....	34
3.4.2 Menghitung Head Efektif .....	34
3.4.3 Pemilihan Jenis Turbin.....	35
3.4.4 Perhitungan Potensi Daya .....	35
3.4.5 Pemilihan Generator.....	35
3.4.6 Penentuan Tata Letak dan Dimensi PLTMH .....	35
3.4.7 Analisis Ekonomi .....	35
3.5 Flowchart Penelitian .....	36
3.6 Analisis .....	37
3.6.1 Analisis Debit dan Head.....	37
3.6.2 Analisis Teknis .....	37
3.6.3 Analisis Ekonomi .....	37
<b>BAB IV HASIL DAN ANALISA .....</b>	<b>38</b>
4.1 Analisis Debit Air .....	38
4.2 Analisis Head (Tinggi Jatuh Air).....	40
4.2.1 Perhitungan <i>head</i> bruto .....	41
4.2.2 Perhitungan <i>head</i> efektif .....	41
4.3 Analisis Teknis .....	42
4.3.1 Pemilihan Turbin .....	42
4.3.2 Perhitungan Potensi Daya .....	43
4.3.3 Pemilihan Generator.....	44
4.4 Analisis Dimensi dan Tata Letak Komponen PLTMH .....	45
4.4.1 Analisis Dimensi Intake .....	45
4.4.2 Analisis Dimensi Bak Pengendap .....	45
4.4.3 Analisis Dimensi Saluran Pembawa.....	46
4.4.4 Analisis Dimensi Bak Penenang .....	46
4.4.5 Analisis Dimensi Pipa Pesat.....	46
4.4.6 Tata Letak Komponen .....	47
4.5 Analisis Ekonomi.....	48

4.5.1 Perhitungan Total Investasi dan Biaya Operasional Tahunan	48
4.5.2 Perhitungan Produksi Energi Tahunan.....	49
4.5.3 Perhitungan Harga Pokok Produksi .....	50
4.5.4 Perhitungan Payback Period.....	50
4.5.5 Analisis NPV .....	51
<b>BAB V PENUTUP.....</b>	<b>52</b>
5.1 Kesimpulan .....	52
5.2 Saran .....	52
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>53</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>55</b>



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro(PLTMH).....	9
Gambar 2.2	Komponen PLTMH. ....	11
Gambar 2.3	Turbin Pelton.....	18
Gambar 2.4	Turbin Turgo .....	18
Gambar 2.5	Crossflow. ....	19
Gambar 2.6	Turbin Francis .....	21
Gambar 2.7	Turbin Kaplan .....	23
Gambar 2.8	Turbine application chart .....	24
Gambar 2.9	Generator Sinkron .....	27
Gambar 2.10	Generator induksi .....	28
Gambar 3.1	Model Penelitian .....	32
Gambar 3.2	Lokasi Penelitian.....	32
Gambar 3.3	Debit Damar 10 tahun .....	33
Gambar 3.4	Head Sungai Damar .....	34
Gambar 3.5	Flowchart Penelitian.....	36
Gambar 4.1	Pengukuran Head .....	40
Gambar 4.2	Pemilihan Turbin.....	43
Gambar 4.3	Perkiraan tata letak komponen PLTMH.....	48



## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Klasifikasi PLTA .....	10
Tabel 2. 2 Kriteria pemilihan jenis turbin berdasarkan head .....	25
Tabel 2. 3 Kriteria pemilihan jenis turbin berdasarkan head .....	25
Tabel 4. 1 Rata-rata debit 10 tahun Sungai Damar .....	38
Tabel 4. 2 Urutan debit dari terbesar ke terkecil.....	39
Tabel 4. 3 Total investasi awal.....	49



## ABSTRAK

Pertumbuhan penduduk dan perkembangan industri mengakibatkan meningkatnya konsumsi energi listrik. Hal ini yang menjadi permasalahan kebutuhan energi listrik yang selalu meningkat. Dominasi penggunaan energi fosil tidak hanya menimbulkan masalah keterbatasan sumber daya, tetapi juga berdampak negatif terhadap lingkungan melalui emisi gas rumah kaca. Solusi yang ditawarkan adalah menjamin ketersediaan pasokan energi termasuk pengembangan energi baru terbarukan. Hal ini sesuai target pemerintah untuk memenuhi target bauran energi sebesar 23% pada tahun 2025. Usaha-usaha bauran energi dilakukan pengembangan sumber energi terbarukan salah satunya ialah pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH).

Penelitian ini mengkaji tentang potensi pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) sebagai upaya mendukung target pengembangan Energi Baru Terbarukan (EBT) nasional. Model ditentukan sebagai PLTMH mulai dari debit aliran, tinggi jatuh air, turbin dan generator. Parameter yang ditentukan: debit, tinggi jatuh air, jenis turbin serta generator. Metodologi penelitian yang digunakan meliputi analisis data debit air 10 tahun terakhir dan pengukuran head efektif dan estimasi perhitungan potensi daya. Sebagai obyek penelitian ditentukan di Sungai Damar, Kecamatan Pageruyung, Kabupaten Kendal, Jawa Tengah.

Hasil menunjukkan bahwa debit andalan Q80 sebesar 1.25988 m<sup>3</sup>/s dengan head efektif 46,78 meter dengan memilih turbin Francis, daya yang dihasilkan 442,3 kW, sehingga diperlukan spesifikasi generator sinkron sebesar 630 kVA. Hasil kelayakan ekonomi menunjukkan bahwa total investasi Rp 10.949.212.500 dengan payback period 2,93 tahun dan Net Present Value (NPV) positif sebesar Rp 22.969.241.125 untuk periode operasi 20 tahun. Harga pokok produksi listrik sebesar Rp 105,8 /kWh, jauh di bawah tarif listrik konvensional, menunjukkan kelayakan ekonomi proyek. Pembangkit ini diproyeksikan mampu menghasilkan energi listrik tahunan sebesar 3.104.294,4 kWh, memberikan kontribusi signifikan terhadap target EBT nasional.

**Kata kunci:** *PLTMH, Sungai Damar, EBT, Debit Andalan, Head Efektif, NPV.*

## ABSTRACT

*Population growth and industrial development have resulted in increased electricity consumption. This is causing the problem of constantly increasing electricity energy needs. The dominance of fossil energy use not only creates resource limitation issues but also negatively impacts the environment through greenhouse gas emissions. The solution offered is to guarantee energy supply availability, including the development of new renewable energy. This aligns with the government's target to fulfill an energy mix target of 23% by 2025. Energy mix efforts are being made to develop renewable energy sources, one of which is micro-hydro power plants (MHPP).*

*This research examines the potential for developing Micro-Hydro Power Plants (MHPP) as an effort to support the national New Renewable Energy (NRE) development target. The model is determined as an MHPP starting from flow discharge, water head height, turbine, and generator. Parameters determined include: discharge, water head height, type of turbine and generator. The research methodology used includes analysis of water discharge data from the last 10 years, measurement of effective head, and estimation of potential power calculations. The Damar River in Pageruyung District, Kendal Regency, Central Java was determined as the research object.*

*Results show that the dependable discharge  $Q_{80}$  is  $1.25988 \text{ m}^3/\text{s}$  with an effective head of 46.78 meters. By choosing a Francis turbine, the power generated is 442,3 kW, thus requiring a synchronous generator specification of 630 kVA. The economic feasibility results indicate that the total investment is Rp 10,949,212,500 with a payback period of 2,93 years and a positive Net Present Value (NPV) of Rp 22.969.241.125 for a 20-year operation period. The electricity production cost is Rp 105,8 /kWh, far below conventional electricity tariffs, demonstrating the project's economic feasibility. This power plant is projected to generate annual electrical energy of 3.104.294,4 kWh, making a significant contribution to the national NRE target.*

**Keywords :** MHPP, Damar River, NRE, Dependable Discharge, Effective Head, NPV.

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk dan perkembangan industri. Salah satu tantangan yang dihadapi oleh negara ini adalah bagaimana memenuhi kebutuhan energi tersebut dengan cara yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Penggunaan energi fosil yang masih dominan tidak hanya terbatas jumlahnya, tetapi juga memberikan dampak negatif terhadap lingkungan, seperti emisi gas rumah kaca yang menyebabkan perubahan iklim global. Pengembangan dan pemanfaatan sumber energi terbarukan harus menjadi prioritas utama dalam sektor ketenagalistrikan nasional. Hal ini memiliki tujuan strategis untuk memperkuat kapasitas penyediaan energi di tingkat nasional serta mengimplementasikan program konservasi energi secara efektif dan untuk mengurangi emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) yang dihasilkan dari penggunaan bahan bakar fosil [1].

Berdasarkan data DEN, Komposisi energi nasional pada tahun 2023 masih sangat bertumpu pada sumber energi konvensional, dengan batubara sebagai kontributor utama mencapai 40,46%. Porsi terbesar kedua ditempati oleh minyak bumi dengan 30,18%, diikuti gas bumi sebesar 16,28%, sementara Energi Baru Terbarukan (EBT) berkontribusi sebesar 13,09%. Meskipun terdapat kenaikan persentase EBT sebesar 0,79% hingga mencapai 13,09% di tahun 2023, angka ini belum memenuhi target yang telah ditetapkan yaitu 17,87%. Dalam upaya meningkatkan peran EBT, pemerintah telah menetapkan target ambisius untuk bauran energi nasional yakni 19,49% pada tahun 2024, dengan optimisme dapat mencapai 23% di tahun 2025 [2]. Supaya mencapai target, pemerintah akan terus mendorong pengembangan Energi Baru Terbarukan (EBT), baik dari aspek kapasitas terpasang, produksi, maupun tingkat konsumsi.

Pembangkit listrik tenaga mikrohidro adalah salah satu alternatif energi terbarukan yang menjanjikan dalam pengembangan pembangkit listrik. Sistem ini termasuk dalam kategori pembangkit skala kecil yang memanfaatkan kekuatan air sebagai penggerak utamanya. PLTMH dapat diimplementasikan dengan memanfaatkan berbagai sumber air seperti aliran irigasi, sungai, atau air terjun, di

mana prinsip kerjanya bergantung pada aliran air, ketinggian jatuh air (head), dan volume debit air yang tersedia.

Kabupaten Kendal adalah Kabupaten dari 35 Kabupaten / Kota di Provinsi Jawa Tengah dengan luas wilayah 1.002,23 km<sup>2</sup> yang terbagi menjadi 20 kecamatan. Salah satunya adalah Kecamatan Pageruyung yang memiliki luas 51,43 km<sup>2</sup> dan memiliki tinggi wilayah 414.004 mdpl. Serta memiliki sungai-sungai yang berpotensi dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik tenaga air salah satunya adalah Sungai Damar. Sungai Damar yang juga terletak di Desa Gebangan, Kecamatan Pageruyung, Kabupaten Kendal. Sungai Damar dalam mendukung berbagai kebutuhan masyarakat setempat, baik untuk irigasi, sumber air bersih, maupun potensi energi terbarukan. Sungai Damar memiliki luas DAS sekitar 29,93 km<sup>2</sup> dan panjang aliran sungai mencapai 48 km.

Permasalahannya adalah bagaimana memanfaatkan potensi debit Sungai Damar sebagai PLTMH. Dampaknya adalah potensi PLTMH ini akan menambah potensi EBT dalam rangka meningkatkan kemampuan penyediaan energi nasional. Solusinya adalah perlu dilakukan studi tentang potensi PLTMH di Sungai Damar. Berdasarkan latar belakang tersebut maka, penelitian ini membahas tentang Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) di Sungai Damar Kabupaten Kendal.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Adapun rumusan masalah yang diambil pada penelitian ini adalah:

- a. Bagaimana menentukan jenis turbin dengan data teknis yang ada?
- b. Berapa estimasi daya listrik yang dapat dihasilkan oleh PLTMH di Sungai Damar?
- c. Bagaimana tata letak dan dimensi PLTMH di Sungai Damar?
- d. Bagaimana kelayakan ekonomi PLMTH dengan metode NPV?

## **1.3 Batasan Masalah**

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

- a. Data hidrologi sungai Damar yang digunakan dalam penelitian ini dibatasi pada data debit aliran dan elevasi (head) yang relevan dengan lokasi studi.

- b. PLTMH dibatasi pada perancangan komponen utama.
- c. Lokasi penelitian ditentukan di Sungai Damar Desa Gebangan Kecamatan Pageruyung Kabupaten Kendal.
- d. Analisis ekonomi dibatasi pada perhitungan kelayakan investasi menggunakan metode NPV.

#### **1.4 Tujuan**

Tujuan penelitian ini adalah :

- a. Mengetahui potensi debit air, tinggi jatuh air (head) dan jenis turbin di Sungai Damar yang dapat digunakan untuk mendukung operasional Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH).
- b. Mengetahui estimasi daya yang dapat dihasilkan PLTMH di Sungai Damar dalam rangka menopang target pemerintah dalam mencapai target pengembangan EBT.
- c. Mengetahui tata letak serta dimensi komponen PLTMH pada Sungai Damar.
- d. Mengetahui tingkat kelayakan ekonomi dari pembangunan PLTMH di Sungai Damar dengan metode NPV.

#### **1.5 Manfaat**

Manfaat dari penelitian ini adalah:

- a. Berperan sebagai edukasi bagi masyarakat luas, terutama penduduk di sekitar lokasi, tentang potensi dan optimalisasi energi terbarukan skala kecil serta pemahaman mengenai proses pembangkitan listrik.
- b. Sebagai referensi dalam pengembangan PLTMH di berbagai lokasi lainnya Hal ini diharapkan dapat menjadi solusi dalam pemenuhan kebutuhan listrik skala kecil.

#### **1.6 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan dibuat untuk mempermudah penyusunan penelitian di antaranya sebagai berikut:

## **BAB I PENDAHULUAN**

Bab I menyajikan kerangka dasar penelitian yang komprehensif. Bagian ini diawali dengan pemaparan latar belakang yang mendasari pemilihan topik penelitian. Selanjutnya, diuraikan rumusan masalah yang akan diteliti beserta batasan-batasan yang ditetapkan untuk memastikan penelitian tetap fokus dan terarah. Bab ini juga menguraikan tujuan penelitian secara spesifik yang menggambarkan langkah-langkah konkret dalam mengatasi permasalahan yang telah diidentifikasi. Sebagai pelengkap, bab ini mencakup manfaat yang diharapkan dari penelitian serta sistematika penulisan yang memberikan gambaran struktur keseluruhan penelitian.

## **BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI**

Berisi review literatur dari penelitian sebelumnya yang bersumber dari publikasi (jurnal, proceeding, conference, seminar) dan *textbook*. Landasan teori dalam penelitian ini diambil dari berbagai buku referensi dan data terkait, yang mencakup penjelasan mengenai Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH), debit air, pengukuran head, penentuan jenis turbin, perhitungan potensi daya, hingga perencanaan PLTMH.

## **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Menjelaskan tentang: model penelitian, parameter yang dibutuhkan, metode yang digunakan dan tahapan penelitian (flowchart).

## **BAB IV HASIL DAN ANALISA**

Berisi tentang perhitungan debit andalan, perhitungan tinggi jatuh air, perhitungan potensi PLTMH, penentuan jenis turbin dan generator dan perhitungan kelayakan ekonomi. Menganalisis hasil hasil perhitungan.

## **BAB V PENUTUP**

Bagian ini berisi kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan, serta memberikan saran untuk penelitian selanjutnya.

## BAB II

### KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Tinjauan Pustaka ini disusun sebagai bahan referensi dan perbandingan untuk penelitian yang akan dilakukan. Beberapa penelitian sebelumnya yang memiliki topik serupa dan dilakukan oleh peneliti lain adalah sebagai berikut:

- a. Studi Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) di Aliran Sungai Desa Kejawar Banyumas [3]. Hasil didapatkan bahwa Sungai di Desa Kejawar, Banyumas memiliki potensi yang memadai untuk pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH). Dengan debit andalan sebesar  $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$  dan head efektif setinggi 3,08 meter, sungai ini mampu mendukung produksi daya listrik sebesar 1,36 kW. Turbin kincir dan generator tipe alternator yang dipilih terbukti efisien dalam memanfaatkan potensi aliran air tersebut. Dari sisi ekonomi, proyek ini dinilai layak untuk dilaksanakan, dengan nilai NPV sebesar Rp. 37.063.244, BCR sebesar 2,1, Payback Period selama 3,46 tahun, dan IRR sebesar 33,6%, yang menunjukkan bahwa proyek ini menguntungkan. Oleh karena itu, pembangunan PLTMH di Sungai Kejawar direkomendasikan untuk dilanjutkan karena dapat memberikan manfaat ekonomi dan energi terbarukan bagi masyarakat setempat.
- b. Studi Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) di Riam Pagung Desa Sanatab Kecamatan Sajingan Besar Kabupaten Sambas [4]. Hasil menyatakan bahwa air terjun Riam Pagung memiliki potensi yang baik untuk dijadikan sumber energi alternatif melalui PLTMH. Dengan debit sebesar  $0,1 \text{ m}^3/\text{det}$  dan head efektif 46,5 meter, potensi daya mekanik yang dihasilkan adalah sebesar 30 kW. Turbin yang paling tepat untuk digunakan di lokasi ini adalah turbin Crossflow, karena selain efisien, turbin ini mudah dioperasikan dan biayanya terjangkau. Generator yang dipilih adalah generator asinkron dengan daya 30 kVA, yang dipasang dengan sistem kopel langsung. Potensi ini, PLTMH Riam Pagung layak dikembangkan sebagai sumber energi terbarukan di wilayah tersebut.
- c. Studi Perencanaan Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Berdasarkan Potensi Air yang Ada di Desa Pinogu [5]. Hasil

menyatakan bahwa aliran sungai di Desa Pinogu memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai sumber energi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). Berdasarkan pengukuran debit air sebesar 1,69 m<sup>3</sup>/detik dan tinggi jatuh air maksimum 3,57 m, diperoleh potensi daya terbangkitkan sebesar 29,83 kW. Hasil perhitungan juga menunjukkan bahwa aliran air sungai Pinogu layak secara teknis untuk pembangunan PLTMH dengan kapasitas daya hingga 30 kVA. Dengan memanfaatkan energi ini, Desa Pinogu dapat meningkatkan akses listrik secara lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Tabel 2. 1 Tabel Perbandingan

Judul Penelitian	Penulis	Isi Penelitian	Perbandingan
Studi Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) di Aliran Sungai Desa Kejawar Banyumas	Rizki	Meneliti potensi PLTMH di Sungai Kejawar dengan debit andalan 0,05 m <sup>3</sup> /s dan head 3,08 m. Hasil daya 1,36 kW menggunakan turbin kincir dan generator alternator. Analisis ekonomi menunjukkan proyek layak dengan NPV positif dan Payback Period 3,46 tahun.	Perbedaan utama adalah lokasi penelitian, debit, dan head sungai yang jauh lebih kecil dibandingkan penelitian yang saya lakukan. Selain itu, turbin yang digunakan juga berbeda, yakni turbin kincir.

<p>Studi Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) di Riam Pagung Desa Sanatab Kecamatan Sajingan Besar Kabupaten Sambas</p>	<p>Shaufi</p>	<p>Menganalisis potensi PLTMH di air terjun Riam Pagung dengan debit 0,1 m<sup>3</sup>/det dan head 46,5 m. Menggunakan turbin Crossflow dan generator asinkron 30 kVA dengan sistem kopel langsung. Hasil menunjukkan daya mekanik 30 kW.</p>	<p>Penelitian ini memiliki head yang hampir sama dengan penelitian Anda, tetapi debit lebih kecil. Perbedaan utama adalah penggunaan turbin Crossflow, sementara penelitian yang saya lakukan menggunakan turbin Francis dengan daya yang jauh lebih besar.</p>
<p>Studi Perencanaan Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Berdasarkan Potensi Air yang Ada di Desa Pinogu</p>	<p>Susanto Ointu</p>	<p>Meneliti potensi PLTMH di Desa Pinogu dengan debit 1,69 m<sup>3</sup>/s dan head 3,57 m. Hasil perhitungan menunjukkan daya yang bisa dihasilkan adalah 29,83 kW dengan kapasitas hingga 30 kVA.</p>	<p>Perbedaan utama adalah head yang jauh lebih kecil dibandingkan penelitian yang saya lakukan. Metode pemilihan turbin juga berbeda, karena head yang rendah membutuhkan turbin berbeda.</p>

## 2.2 Landasan Teori

Dalam perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH), diperlukan berbagai landasan teori sebagai pondasi pengetahuan yang mendukung proses perancangan.

### 2.2.1 Debit Andalan

Debit andalan (dependable flow) merupakan nilai debit minimum sungai dengan probabilitas terpenuhi yang telah ditetapkan. Probabilitas terpenuhinya ditetapkan sebesar 80%, yang berarti kemungkinan debit sungai berada di bawah debit andalan adalah 20% [6]. Dalam perencanaan pengembangan sistem irigasi, penyediaan air baku, serta pembangunan pembangkit listrik tenaga air (PLTA), perhitungan debit andalan menjadi komponen yang sangat penting untuk menentukan ketersediaan air. Untuk memperoleh hasil perhitungan debit andalan yang akurat, dibutuhkan pencatatan data debit dalam periode yang cukup panjang guna meminimalisir potensi penyimpangan yang signifikan dalam perhitungan. Analisis membutuhkan data minimal selama lima tahun, namun untuk mendapatkan hasil yang optimal, sebaiknya menggunakan data pencatatan selama 10 tahun [7]. Perhitungan dapat menggunakan persamaan (2.1) dan jika hasil terletak di antara 2 debit maka dapat dihitung interpolasi menggunakan persamaan (2.2).

$$\text{Posisi } Q_x = \left(\frac{x}{100}\right) \times (n+1) \dots\dots\dots (2.1)$$

dengan:

$Q_x$  = Probabilitas yang di inginkan

$x / 100$  = Probabilitas dalam bentuk pecahan

$n$  = Jumlah data

$$Q_{80} = Q_1 - \frac{P_2 - P_1}{P_x - P_1} \times (Q_1 - Q_2) \dots\dots\dots (2.2)$$

dengan :

$Q_{80}$  = Probabilitas 80%

$Q_1$  = Debit pada posisi data terdekat di atas  $P_x$

$Q_2$  = Debit pada posisi data terdekat di bawah  $P_x$

- $P_x$  = Posisi interpolasi yang dihitung sebelumnya  
 $P_1$  = Posisi data terdekat di atas  $P_x$   
 $P_2$  = Posisi data terdekat di bawah  $P_x$

### 2.2.2 Pembangkit listrik tenaga mikro hidro (PLTMH)

Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) merupakan pembangkit listrik berskala kecil yang memiliki kapasitas antara 5 kW hingga 1 MW per unit [8]. PLTMH digerakkan oleh energi air yang bersumber dari sungai kecil atau saluran irigasi, dengan memanfaatkan aliran debit air serta perbedaan ketinggian (head) air [7]. Skema PLTMH ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro(PLTMH)

PLTMH beroperasi dengan memanfaatkan perbedaan ketinggian dan volume debit air per detik yang tersedia dari sungai kecil atau saluran irigasi. Proses pembangkitan listrik dimulai ketika air mengalir melalui intake dan diteruskan melalui saluran pembawa hingga penstock, yang kemudian menggerakkan poros turbin untuk menghasilkan energi mekanik. Energi mekanik ini selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik melalui generator yang diputar oleh turbin air.

Meskipun PLTMH memiliki prinsip kerja yang identik dengan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) konvensional, perbedaan utamanya terletak pada skala

operasionalnya. PLTMH dirancang khusus untuk memanfaatkan sumber air dengan kapasitas lebih kecil. Keunggulan PLTMH adalah fleksibilitas operasionalnya - sistem ini dapat beroperasi dengan atau tanpa waduk, karena kemampuannya dalam mengoptimalkan potensi air skala kecil.

Meskipun memiliki berbagai bentuk instalasi, pembangkit tenaga mikro hidro beroperasi dengan prinsip dasar yang sama yakni mengonversi tenaga potensial menjadi energi listrik. Proses konversi ini terjadi secara bertahap melalui serangkaian transformasi energi:

- Tenaga potensial menjadi tenaga kinetik
- Tenaga kinetik menjadi tenaga mekanik
- Tenaga mekanik menjadi tenaga listrik

PLTMH memiliki sistem didalamnya terdapat serangkaian konversi energi yang dimulai dari energi potensial, dimana air memiliki energi karena posisinya pada ketinggian tertentu. Ketika air mengalir, energi potensial ini berubah menjadi energi kinetik yang ditandai dengan kecepatan aliran air. Selanjutnya, energi kinetik ini dikonversi menjadi energi mekanik melalui perputaran kincir atau turbin yang digerakkan oleh aliran air secara kontinu. Energi mekanik dari perputaran kincir/turbin menggerakkan generator, yang menghasilkan energi listrik sebagai output akhir sistem.

### 2.2.3 Klasifikasi pembangkit listrik tenaga air

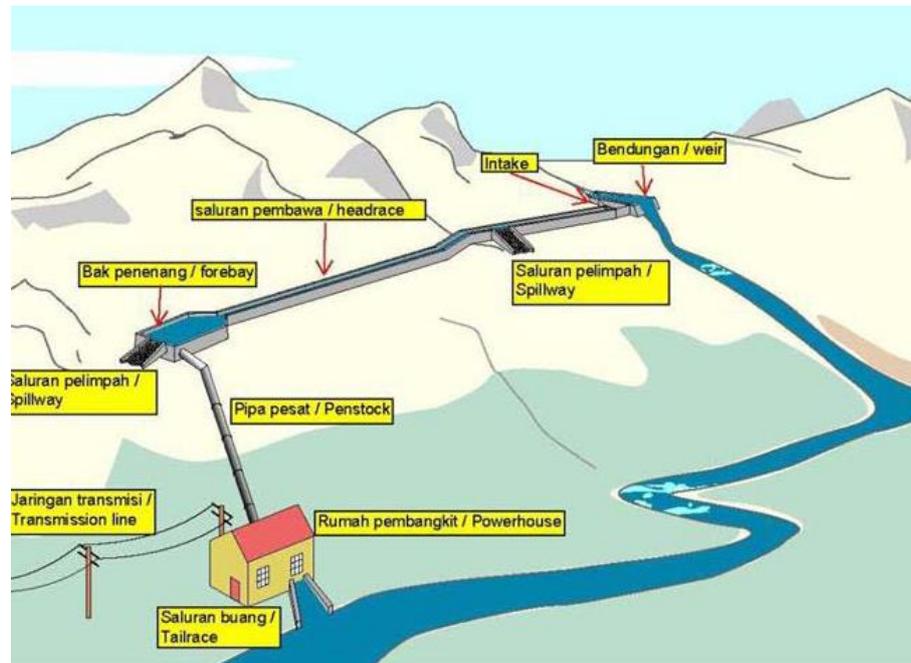
Berdasarkan kapasitas keluarannya, Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) dapat diklasifikasikan pada Tabel 2.1 [8].

Tabel 2.2 Klasifikasi PLTA

No	Jenis PLTA	Kapasitas
1	PLTA besar	> 100 MW
2	PLTA menengah	15 - 100 MW
3	PLTA kecil	1 - 15 MW
4	PLTM (mini hidro)	100 KW - 1MW
5	PLTMH (mikro hidro)	5 - 100 KW
6	Pico hidro	< 5 KW

### 2.2.4 Komponen-komponen PLTMH

Komponen dalam Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) dapat dilihat seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Komponen PLTMH.

Komponen PLTMH secara umum terdiri dari:

1. Bendung

Bendung merupakan struktur penghalang yang dibangun melintang di aliran sungai untuk memodifikasi karakteristik alirannya. Berbeda dengan bendungan yang berukuran lebih besar, bendung memiliki konstruksi yang lebih sederhana namun tetap mampu menciptakan genangan air membentuk kolam, sambil memungkinkan air untuk mengalir melalui bagian atasnya [11].

Ukuran pintu masuk air ialah harus sebesar 120 persen dari debit air yang rencana atau debit air desain PLTMH seperti pada persamaan (2.3) untuk merencanakan tinggi pintu air dan persamaan (2.4) untuk lebar pintu air.

$$Q_{Intake} = Q \times 120\% \dots\dots\dots (2.3)$$

dengan:

$Q_{intake}$  = Debit air pada intake ( $m^3/detik$ )

$Q$  = Debit desain pembangkit ( $m^3/detik$ )

120% = Faktor keamanan mengantisipasi kehilangan air

$$Q = 0,8 \times b \times a \sqrt{2 \times g \times h} \dots\dots\dots (2.4)$$

dengan:

$Q$  = Debit aliran air ( $m^3/detik$ )

0,8 = Koefisien debit

$b$  = Lebar ambang/pintu air (m)

$a$  = Tinggi bukaan pintu air (m)

2 = Konstanta

$g$  = Percepatan gravitasi ( $m/detik^2$ )

$h$  = Tinggi muka air di atas ambang (m)

## 2. Saringan (*Sand trap*)

Komponen penting yang ditempatkan di depan pintu intake air. Fungsi utamanya adalah menyaring berbagai material seperti kotoran dan sampah yang terbawa aliran air, sehingga menjamin kebersihan air dan mencegah gangguan pada operasional mesin PLTMH.

Bak pengendap harus memiliki dimensi yang 10-20 kali lebih besar dari volume debit airnya untuk memastikan efektivitas penyaringan. seperti pada persamaan (2.5) untuk mencari volume kemudian bisa di tentukan ukuran panjang dan lebarnya dan persamaan (2.6) dapat di cari berapa kedalaman yang perlu di buat.

$$V = 20 \times Q_{intake} \dots\dots\dots (2.5)$$

dengan:

$V$  = Volume bak pengendap ( $m^3$ )

20 = Waktu pengendapan (detik)

$Q_{intake}$  = Debit air pada intake ( $m^3/detik$ )

$$V = p \times l \times h \dots\dots\dots (2.6)$$

dengan:

V = Volume bak pengendap (m<sup>3</sup>)

p = Panjang bak pengendap (m)

l = Lebar bak pengendap (m)

h = Kedalaman bak pengendap (m)

### 3. Pintu pengambilan air (*Intake*)

Pintu pengambilan air (intake) merupakan komponen yang dipasang di ujung pipa, yang penggunaannya dikhususkan saat pipa pesat memerlukan pengurasan untuk pembersihan atau perbaikan.

### 4. Saluran Pembawa (*Channel/Carrier*)

Saluran pembawa (channel/carrier) berperan sebagai jalur transportasi air dari intake menuju bak penenang, dengan tujuan memastikan pasokan air yang konsisten sesuai dengan debit yang telah direncanakan.

Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) dapat dilakukan dengan menentukan besar kecepatan pada saluran pembawa, sehingga luas penampang saluran dapat dihitung menggunakan persamaan (2.7) untuk menentukan lebar saluran pembawa dan persamaan (2.8) untuk menentukan dalam dari saluran pembawa.

$$A = \frac{Q}{v} \dots\dots\dots (2.7)$$

dengan:

A = Luas penampang basah bak pengendap (m<sup>2</sup>)

Q = Debit aliran (m<sup>3</sup>/detik)

V = Kecepatan aliran dalam bak pengendap (m/detik)

$$A = h \times l \dots\dots\dots (2.8)$$

dengan:

A = Luas penampang basah bak pengendap (m<sup>2</sup>)

h = Kedalaman bak pengendap (m)

l = Lebar bak pengendap (m)

### 5. Bak Penenang (*Forebay*)

Bak penenang (*forebay*) memiliki fungsi mereduksi kecepatan aliran air yang masuk dari saluran, sehingga meminimalkan turbulensi air sebelum memasuki penstock. Pengurangan turbulensi ini berkontribusi pada peningkatan daya yang dapat dihasilkan. Bak penenang dilengkapi sistem penyaringan untuk mencegah masuknya benda keras yang berpotensi merusak turbin.

Untuk memastikan kebutuhan air dalam pipa pesat terpenuhi, dimensi bak penenang dibuat lebih kecil dibandingkan dengan bak pengendap. Penentuan volume bak penenang dapat menggunakan persamaan (2.9), yang selanjutnya menjadi dasar untuk menghitung ukuran panjang dan lebarnya. Sementara itu, persamaan (2.10) digunakan untuk menentukan kedalaman yang diperlukan pada bak penenang tersebut.

$$V = 15 \times Q \dots\dots\dots (2.9)$$

dengan:

$V$  = Volume forebay ( $m^3$ )

15 = Konstanta waktu retensi (detik)

$Q$  = Debit desain ( $m^3/detik$ )

$$V = p \times l \times h \dots\dots\dots (2.10)$$

dengan:

$V$  = Volume forebay ( $m^3$ )

$p$  = Panjang forebay (m)

$l$  = Lebar forebay (m)

$h$  = Kedalaman forebay (m)

### 6. Pipa pesat (Penstock)

Pipa pesat (*penstock*) dirancang untuk mengalirkan air dari saluran pengantar atau kolam penampung menuju turbin. Konstruksinya memiliki kemiringan yang curam untuk menghasilkan kecepatan dan

tekanan air yang optimal untuk perputaran turbin. Desainnya harus memperhitungkan kemampuan menahan berbagai tekanan, termasuk tekanan dari water hammer [11] Untuk penentuan panjang serta ukuran penstok sendiri menggunakan persamaan (2.11) hingga (2.17) :

Panjang total penstok:

$$\text{Panjang penstok} = p \text{ penstok lurus} + p \text{ penstok miring} \quad (2.11)$$

$$p \text{ penstok miring} = \sqrt{\text{panjang lintasan}^2 + \text{tinggi penstok}^2} \quad (2.12)$$

Kecepatan air dalam penstok.

$$V_p = 0,125 \sqrt{2 \times g \times h_2} \quad (2.13)$$

Diameter penstok.

$$D = \sqrt{\frac{4Q_p}{V_p}} \quad (2.14)$$

Penampang penstok.

$$A_p = \frac{Q_p}{V_p} \quad (2.15)$$

Ketebalan minimal penstok.

$$t_{\min} = \frac{508 + D}{400} \quad (2.16)$$

Kehilangan energi pada saluran pembawa (major losses) [12].

$$hf = f \times \left(\frac{L}{D}\right) \times \left(\frac{V^2}{2g}\right) \quad (2.17)$$

dengan:

$f$  = koefisien gesek pipa (0,21)

$L$  = panjang pipa (m)

$D$  = diameter pipa(m)

$V$  = kecepatan aliran(m/s)

$g$  = 9.81 m/s<sup>2</sup> (gravitasi)

Kehilangan energi akibat belokan dan sambungan (minor losses) [12]

$$hm = K \times (V^2/2g) \dots\dots\dots (2.18)$$

dengan:

$K_{total} = 3.1$  (total koefisien kerugian)

$V$  = kecepatan aliran (m/s)

$g$  = gravitasi ( $9,81\text{m/s}^2$ )

## 7. Turbin Air dan Generator

Turbin air dan generator merupakan unit konversi energi utama. Turbin air mengkonversi energi potensial fluida menjadi energi mekanik, yang kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator.

## 8. Saluran pembuang (*Tailrace Channel*)

Saluran pembuang (*tailrace channel*) yang terletak di dasar rumah pembangkit berfungsi mengembalikan air ke sungai setelah dimanfaatkan oleh turbin [8].

### 2.2.5 Turbin Air

Turbin air adalah jenis turbin yang menggunakan air sebagai fluida kerjanya. Air mengalir dengan memanfaatkan perbedaan ketinggian (*head*) yang menghasilkan daya atau energi potensial. Energi ini kemudian dialirkan melalui pipa, mengubah energi potensial menjadi energi kinetik. Energi kinetik inilah yang digunakan untuk menggerakkan sudu-sudu turbin, yang selanjutnya memutar generator untuk menghasilkan energi listrik. Turbin air dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis utama berdasarkan perubahan momentum fluida kerjanya [9].

#### 2.2.5.1 Turbin Impuls

Turbin impuls merupakan kategori turbin air yang menunjukkan ciri khas berupa tekanan yang konsisten pada seluruh bagian runner. Proses pengalihan energinya bermula dari nosel yang mentransformasikan energi potensial air menjadi energi kinetik. Aliran air bertekanan tinggi yang menyembur dari nosel kemudian menumbuk sudu turbin, mengakibatkan perubahan arah aliran. Perubahan arah ini menciptakan perubahan momentum (*impuls*) yang mendorong perputaran roda

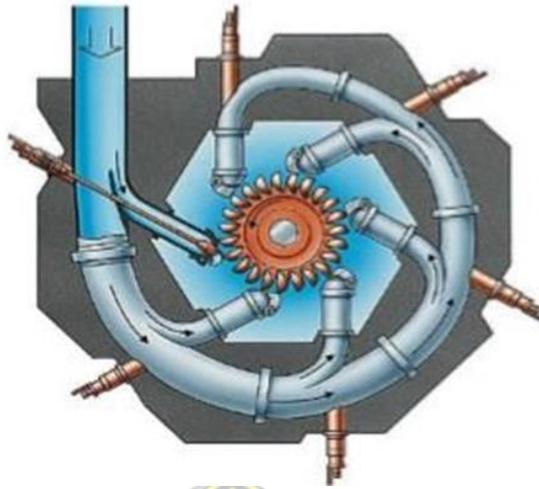
turbin. Dalam operasinya, keseluruhan energi potensial yang berasal dari elevasi dan tekanan air diubah menjadi energi kinetik ketika memasuki sudu jalan turbin. Terdapat beberapa variasi turbin jenis ini, meliputi turbin Pelton, turbin Turgo, dan turbin Crossflow.

#### **2.2.5.1.1 Turbin Pelton**

Turbin Pelton, yang termasuk dalam kategori turbin impuls, merupakan inovasi dari insinyur Amerika, Lester A. Pelton pada tahun 1880. Dikenal sebagai salah satu turbin air dengan efisiensi tertinggi, turbin ini mampu beroperasi pada ketinggian jatuh air (head) hingga 1800 meter. Karakteristik operasionalnya mencakup kebutuhan air yang relatif rendah dan umumnya menggunakan konfigurasi poros horizontal.

Turbin ini sering disebut sebagai turbin bertekanan sama karena mempertahankan tekanan yang konstan saat air mengalir melalui sudu-sudunya. Perubahan energi utama terjadi pada nosel atau pengarah pancaran, di mana energi potensial air dikonversi menjadi energi kinetik. Proses kerjanya melibatkan pancaran air dari nosel yang menumbuk bucket (mangkok) yang terpasang pada runner, dengan garis pusat pancaran air yang bersinggungan dengan lingkaran pusat bucket. Benturan ini mengakibatkan perubahan arah aliran yang menghasilkan perubahan momentum (impuls).

Kecepatan putaran bucket dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk jumlah dan dimensi pancaran serta kecepatannya. Sementara itu, kecepatan pancaran air sendiri ditentukan oleh ketinggian air di atas nosel dan tingkat efisiensi sistem. Turbin Pelton dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Turbin Pelton.

#### 2.2.5.1.2 Turbin Turgo

Turbin Turgo merupakan varian turbin impuls yang dirancang untuk beroperasi pada rentang head 50-250 meter. Perbedaan utamanya dengan turbin pelton terletak pada desain sudunya yang unik. Keunggulan signifikan turbin Turgo adalah kemampuannya mencapai kecepatan putaran yang lebih tinggi dibandingkan turbin Pelton. Karakteristik ini memungkinkan koneksi langsung antara turbin dan generator yang memberikan manfaat peningkatan efisiensi total sistem dan pengurangan biaya pemeliharaan. Gambar 2.4 menunjukkan Turbin Turgo.



Gambar 2. 4 Turbin Turgo

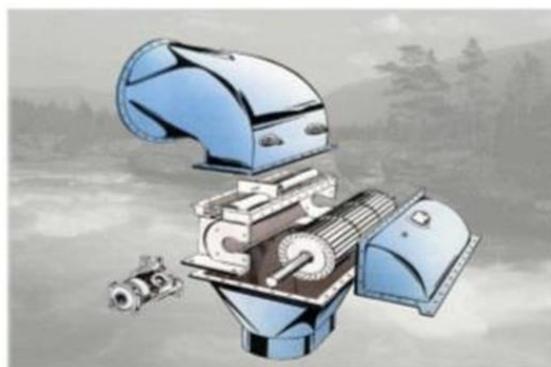
### 2.2.5.1.3 Turbin Crossflow

Turbin Crossflow berasal dari inovasi yang dilakukan oleh insinyur Australia, A.G.M. Michell, pada tahun 1903. Selanjutnya, turbin ini dikembangkan dan dipatenkan di Jerman Barat oleh Prof. Donat Banki. Atas kontribusi kedua ilmuwan tersebut, turbin ini juga dikenal dengan nama alternatif, yaitu Turbin Banki atau Turbin Michell Ossberger.

Dalam hal kemampuan operasional, turbin ini dirancang untuk menangani rentang debit yang luas, mulai dari 20 liter per detik hingga 10 meter kubik per detik, dengan kemampuan beroperasi pada variasi ketinggian antara 1 hingga 200 meter. Karakteristik desainnya mencakup penggunaan nosel berbentuk persegi panjang yang lebarnya disesuaikan dengan dimensi runner.

Proses konversi energi dalam turbin ini terjadi dalam dua tahap: pertama saat air mengenai sudu, mengubah energi kinetik menjadi energi mekanis, dan kedua saat air keluar membentur sudu dengan energi yang lebih rendah dibandingkan saat masuk. Konstruksi runner turbin terdiri dari beberapa sudu yang terpasang pada sepasang piringan paralel.

Tingginya efisiensi turbin Crossflow ini dicapai melalui sistem pemanfaatan energi ganda yang unik. Proses pertama terjadi saat air mulai masuk dan memberikan energi tumbukan pada sudu-sudu, sedangkan proses kedua memanfaatkan daya dorong air pada sudu-sudu saat air akan meninggalkan runner. Sistem pemanfaatan energi dua tahap ini menjadi kunci keunggulan efisiensi turbin Crossflow. Jenis Turbin Crossflow ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Crossflow.

### **2.2.5.2 Turbin Reaksi**

Turbin reaksi adalah jenis turbin yang beroperasi dengan mengkonversi energi potensial menjadi energi gerak. Karakteristik unik dari sudu-sudu turbin reaksi adalah adanya penurunan tekanan air saat mengalir melaluinya. Perbedaan tekanan ini menghasilkan gaya yang menggerakkan runner turbin. Dalam konstruksinya, runner turbin reaksi didesain untuk beroperasi terendam dalam air dan terpasang dalam rumah turbin.

Proses konversi energi dalam turbin reaksi terjadi secara simultan, energi kinetik dan energi tekanan diubah menjadi energi mekanik. Berdasarkan prinsip kerja ini, turbin reaksi memiliki dua varian utama: turbin Francis dan turbin Kaplan. Masing-masing varian ini memiliki karakteristik dan aplikasi yang berbeda sesuai dengan kebutuhan spesifik pembangkit listrik.

#### **2.2.5.2.1 Turbin Francis**

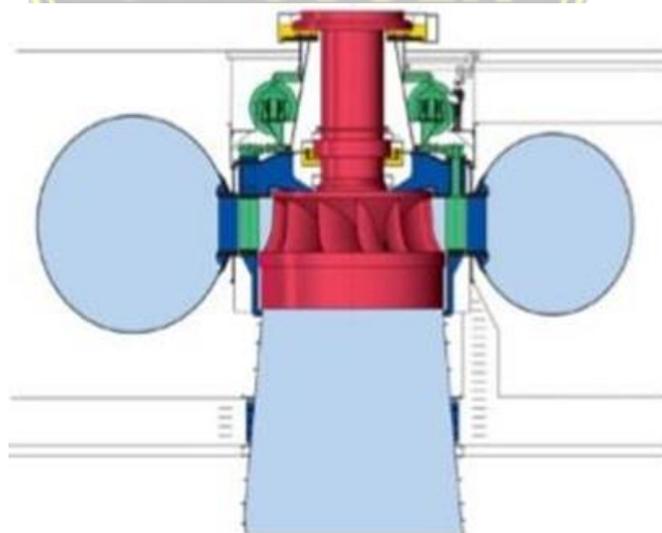
Turbin Francis, yang dikembangkan sekitar tahun 1950 oleh ilmuwan Amerika Howk dan Francis, merupakan inovasi dalam teknologi turbin air. Prinsip kerjanya berdasarkan konversi energi potensial menjadi energi mekanik melalui proses reaksi, yang menjadi dasar klasifikasinya sebagai turbin reaksi. Turbin Francis ditempatkan antara zona bertekanan tinggi di bagian masuk dan zona bertekanan rendah di bagian keluar. Strukturnya terdiri dari dua komponen utama sudu pengarah dan sudu jalan. Proses konversi energi terjadi pada kedua komponen ini yang beroperasi dalam kondisi terendam air. Aliran air dalam turbin Francis dimulai dari masuknya air melalui saluran spiral. Kemudian, sudu pengarah mengarahkan air secara tangensial ke dalam turbin. Keunikan dari sudu pengarah pada turbin Francis adalah kemampuannya untuk diatur sudutnya meskipun posisinya tetap, memberikan fleksibilitas dalam pengoperasian turbin.

Salah satu keunggulan utama turbin Francis adalah penggunaan sudu pengarah yang dapat disesuaikan, memungkinkan turbin beroperasi efektif dalam berbagai kondisi aliran air. Turbin Francis menggunakan prinsip tekanan lebih, di mana air masuk ke sudu pengarah dengan kecepatan tinggi dan mengalami penurunan tekanan hingga mencapai roda jalan. Pada roda jalan, terjadi

peningkatan kecepatan yang diikuti dengan penurunan tekanan hingga di bawah 1 atm. Untuk mencegah kavitasi, tekanan dinormalisasi kembali ke 1 atm melalui pemasangan pipa hisap. Daya output turbin dapat dikendalikan melalui pengaturan pembukaan sudu pengarah, yang memungkinkan kontrol volume air yang masuk ke roda turbin. Turbin Francis menunjukkan fleksibilitas dalam pemasangan, dapat dioperasikan baik dengan poros vertikal maupun horizontal, dan ideal untuk tinggi terjun sedang antara 20-440 meter.

Keunggulan lain turbin Francis terletak pada kemampuannya beroperasi pada kecepatan putar tinggi yang konsisten, memberikan keuntungan dari segi berat turbin dan generator. Desainnya yang tidak memiliki ruang bebas mencegah kehilangan energi akibat jatuhnya air. Turbin ini sangat cocok untuk instalasi bawah tanah, terutama pada lokasi dengan permukaan air bawah yang fluktuatif. Meskipun menunjukkan efisiensi optimal pada beban penuh, performa turbin Francis cenderung menurun pada kondisi beban parsial.

Turbin Francis telah menjadi pilihan dominan dalam pembangkit listrik tenaga air karena kemampuannya yang sesuai dengan berbagai kebutuhan tinggi jatuh air dan kapasitas. Melalui pengembangan dan penelitian berkelanjutan, kapabilitas turbin Francis telah ditingkatkan secara signifikan, pengoperasian pada tinggi jatuh air hingga 700 meter dengan performa kecepatan roda putar dan kapasitas air yang optimal. Turbin Francis bisa dilihat pada Gambar 2.6.



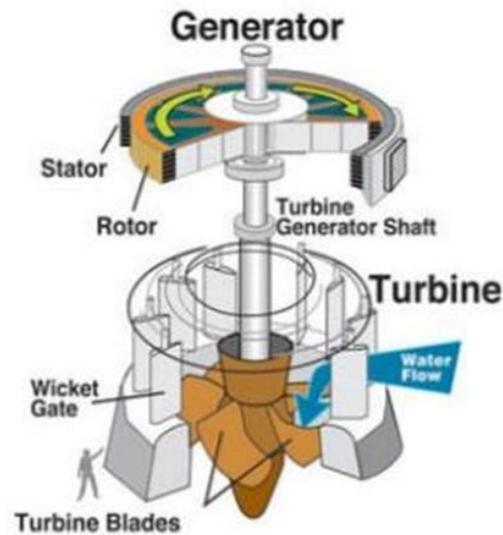
Gambar 2. 6 Turbin Francis

### 2.2.5.2.2 Turbin Kaplan

Turbin Kaplan, yang merupakan pengembangan dari turbin Francis, dirancang oleh Profesor Viktor Kaplan dari Austria pada tahun 1913. Seperti turbin Francis, turbin ini beroperasi menggunakan prinsip reaksi dan dilengkapi dengan roda jalan yang menghasilkan gaya putar untuk menghasilkan torsi pada poros turbin. Keunggulan utama turbin Kaplan terletak pada inovasi desain sudu geraknya (runner) yang dapat disesuaikan dengan kondisi aliran atau perubahan debit air. Kemampuan adaptasi terhadap perubahan head ini menjadikan turbin Kaplan pilihan ideal untuk instalasi pembangkit listrik tenaga air di sungai. Dari segi karakteristik teknis, turbin Kaplan memiliki kecepatan spesifik yang tinggi (high specific speed). Keunggulan ini menghasilkan dua manfaat utama: dimensi roda turbin yang lebih kompak dan kemampuan untuk disambungkan langsung dengan generator. Kombinasi karakteristik ini menjadikan turbin Kaplan solusi yang efisien untuk pembangkit listrik tenaga air.

Turbin Kaplan dirancang optimal untuk operasi pada kondisi head rendah dengan volume debit air yang besar. Keunggulan signifikan turbin ini terletak pada efisiensinya yang tetap tinggi bahkan pada kondisi beban parsial, berkat kemampuan sudu-sudunya yang dapat disesuaikan dengan beban operasional. Sesuai dengan persamaan Euler, terdapat korelasi terbalik antara tinggi jatuh air dengan besarnya pembelokan aliran air pada sudu jalan. Peningkatan kapasitas aliran air berbanding lurus dengan kebutuhan luas penampang saluran air. Namun, operasi turbin pada variasi head yang signifikan memiliki tantangan tersendiri. Desain sudu turbin dioptimalkan untuk perpindahan energi pada titik normal dengan rasio kecepatan dan tekanan tertentu. Penyimpangan besar dari kondisi normal, baik di atas maupun di bawah titik optimal, yang sering terjadi pada pembangkit listrik sungai, dapat mengakibatkan penurunan efisiensi roda baling-baling turbin.

Dibandingkan dengan turbin Francis, turbin baling-baling (Kaplan) menawarkan keunggulan dalam hal kecepatan putar yang dapat dipilih lebih tinggi. Karakteristik ini memungkinkan sambungan langsung antara roda turbin dan generator, sekaligus menghasilkan dimensi turbin yang lebih kompak. Gambar 2.7 menunjukkan turbin Kaplan.



Gambar 2. 7 Turbin Kaplan

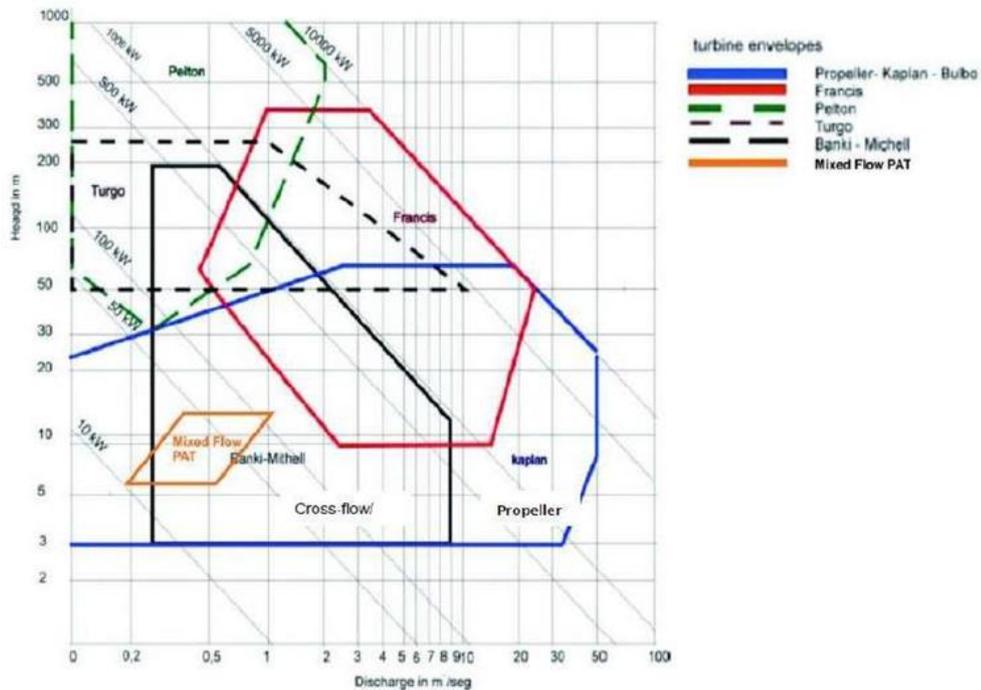
### 2.2.6 Kriteria Pemilihan Jenis Turbin

Pemilihan dan perencanaan turbin air dipengaruhi oleh beragam faktor penting, meliputi volume debit aliran air, head (ketinggian jatuh air), kecepatan spesifik, kecepatan putaran turbin, kecepatan perangkat yang dioperasikan, orientasi sumbu poros turbin, serta aspek ekonomis berupa biaya konstruksi instalasi. Dari seluruh parameter tersebut, debit dan head aliran air merupakan dua faktor yang memiliki pengaruh paling signifikan dalam proses penentuan spesifikasi turbin yang optimal untuk sistem PLTMH.

Dimensi turbin air memiliki korelasi langsung dengan karakteristik debit dan head. Pada head tertentu, peningkatan debit air mengharuskan penggunaan turbin berukuran lebih besar. Sebaliknya, pada debit tertentu, peningkatan head memungkinkan penggunaan turbin dengan dimensi yang lebih kompak. Hubungan antara head dan debit ini memiliki implikasi signifikan terhadap aspek ekonomis, karena secara langsung mempengaruhi biaya manufaktur turbin dan pembangunan fasilitas pembangkit secara keseluruhan.

Selain pertimbangan teknis dan ekonomis, pemilihan jenis turbin juga harus memperhatikan kondisi operasional dan lingkungan setempat. Faktor-faktor seperti fluktuasi debit musiman, kandungan sedimen dalam air, kemudahan perawatan,

ketersediaan suku cadang, dan kemampuan teknis operator lokal perlu dipertimbangkan secara menyeluruh. Evaluasi komprehensif terhadap semua aspek ini akan menghasilkan pemilihan turbin yang optimal, yang tidak hanya efisien secara teknis tetapi juga berkelanjutan dalam jangka panjang [9].



Gambar 2. 8 Turbine application chart

Gambar 2.8 mengilustrasikan hubungan antara karakteristik turbin dengan tiga parameter utama: kecepatan aliran air, ketinggian (head), dan daya output. Terdapat korelasi positif di mana peningkatan kecepatan aliran air dan head menghasilkan daya yang lebih besar. Lebih lanjut, kombinasi debit air, head, dan jumlah putaran sudu berperan dalam menentukan kecepatan rotasi turbin dan kecepatan spesifik, yang pada akhirnya menjadi parameter kunci dalam pemilihan jenis turbin. Volume debit air juga mempengaruhi orientasi instalasi turbin, di mana turbin dengan debit besar umumnya menggunakan konfigurasi poros vertikal.

Pemilihan turbin berdasarkan tinggi air jatuh total (gross head =  $H$ ) dan tinggi jatuh air efektif (effective head =  $H_{ef}$ ). Head total ini adalah selisih ketinggian antara permukaan head race dan tail race, sementara effective head diperoleh dengan mengurangi gross head dengan kehilangan tekanan akibat gesekan pada pipa pesat dan komponen lainnya.

Berikut merupakan tabel kriteria pemilihan turbin berdasarkan head atau tinggi jatuh air dapat dilihat pada Tabel 2.2 dan kriteria pemilihan turbin berdasarkan kecepatan spesifik dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Kriteria pemilihan jenis turbin berdasarkan head

<b>Jenis Turbin</b>	<b>Head (meter)</b>
Kaplan/Propeller	$1 < H < 20$
Francis	$10 < H < 350$
Pelton	$50 < H < 1000$
Crossflow	$6 < H < 100$
Turgo	$50 < H < 250$

Tabel 2. 4 Kriteria pemilihan jenis turbin berdasarkan head

<b>Jenis Turbin</b>	<b>Kecepatan spesifik (rpm)</b>
Kaplan/Propeller	$250 < Ns < 1000$
Francis	$60 < Ns < 300$
Pelton	$12 < Ns < 25$
Crossflow	$40 < Ns < 200$

Berbeda dengan penentuan pada daerah dengan karakteristik debit air dan head yang telah diketahui, pemilihan tipe turbin yang optimal dapat didasarkan pada parameter kecepatan spesifik ( $N_s$ ). Kecepatan spesifik didefinisikan sebagai kecepatan rotasi turbin yang menghasilkan output daya sebesar satu satuan pada kondisi tinggi terjun ( $H$ ) sebesar satu satuan panjang. Untuk menghitung nilai kecepatan spesifik turbin, dapat menggunakan persamaan (2.19).

$$N_s = N \frac{Q^{0,5}}{H^{0,75}} \dots\dots\dots (2.19)$$

dengan :

$N_s$  = kecepatan spesifik (rpm)

$N$  = kecepatan putar turbin (rpm)

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

$H$  = tinggi air jatuh net (m)

### 2.2.7 Generator

Generator adalah mesin listrik yang berfungsi mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik dalam proses pembangkitan listrik. Untuk mempertahankan output daya yang stabil pada terminal generator, diperlukan konsistensi pada arus jangkar dan sudut daya. Penting untuk memahami kapasitas generator dalam menangani perubahan beban, yang harus disesuaikan dengan spesifikasi teknisnya.

Dalam operasinya generator sinkron memerlukan arus penguatan (eksitasi) untuk menghasilkan fluks magnetik pada kutub-kutub medan yang terletak di rotor. Sistem penguatan (excitation) ini memegang peran krusial dalam menjaga stabilitas tegangan yang dihasilkan generator.

Generator beroperasi berdasarkan prinsip hukum Faraday yang menyatakan bahwa gaya gerak listrik (GGL) akan terbentuk pada ujung penghantar ketika penghantar tersebut bergerak memotong garis-garis gaya magnet. Fungsi utama generator adalah melakukan konversi energi dari energi mekanik (gerak/putar) menjadi energi listrik. Sebelum disalurkan ke konsumen, output listrik dari generator melalui proses pengaturan menggunakan sistem kontrol yang terdiri dari panel-panel elektronik yang umumnya terpasang pada dinding.

Generator memiliki stator dan rotor. Stator terdiri dari kumparan-kumparan tembaga yang terpasang secara statis (tidak bergerak) di dalam generator. Sementara itu, rotor merupakan komponen bermagnet yang bergerak di dalam generator dan berperan menghasilkan fluks magnetik. Interaksi antara kedua komponen ini menjadi kunci dalam proses pembangkitan listrik.

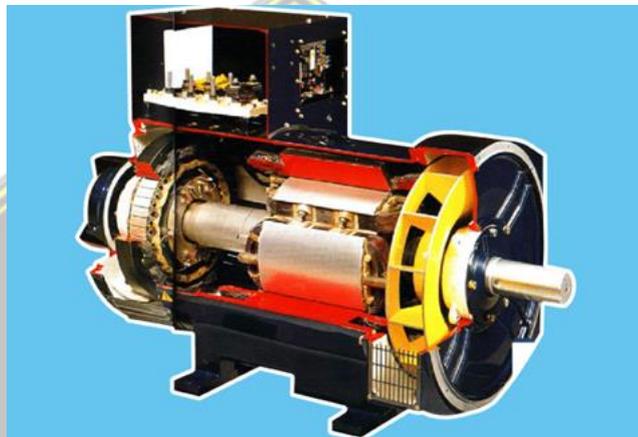
#### 2.2.7.1 Generator sinkron (synchron)

Mesin sinkron memiliki konstruksi yang identik baik saat beroperasi sebagai generator maupun motor dengan perbedaan hanya terletak pada prinsip kerjanya. Pada generator berkapasitas kecil termasuk generator arus searah, konfigurasi komponennya terdiri dari belitan (kumparan) jangkar yang ditempatkan pada rotor dan belitan medan yang ditempatkan pada stator.

Generator sinkron beroperasi berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Prosesnya dimulai ketika penggerak mula (prime mover) memutar rotor menyebabkan kutub-kutub yang terpasang pada rotor ikut berputar. Ketika

kumparan kutub diberi suplai tegangan searah, medan magnet (garis-garis gaya magnet) akan terbentuk pada permukaan kutub dan berputar dengan kecepatan yang sama dengan putaran kutub.

Berdasarkan Hukum Faraday, gaya gerak listrik (GGL) atau electro motive force (EMF) atau tegangan induksi akan terbentuk dalam dua situasi: pertama, ketika lilitan penghantar/konduktor bergerak memotong garis-garis gaya magnet yang diam, atau kedua, ketika lilitan yang statis dipotong oleh garis-garis gaya magnet yang berputar. Untuk referensi visual tentang struktur dan komponen generator sinkron, dapat dilihat pada ilustrasi yang disajikan dalam Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Generator Sinkron

#### 2.2.7.2 Generator induksi (asynkron)

Generator induksi beroperasi melalui konversi dari motor listrik. Saat berfungsi sebagai motor, pemberian tegangan pada kumparan stator menghasilkan medan putar dengan kecepatan sinkron. Ketika dioperasikan sebagai generator, rotor diputar oleh penggerak eksternal dengan kecepatan melebihi kecepatan sinkronnya menghasilkan tegangan melalui perputaran konduktor dalam medan magnet kumparan stator.

Ketika generator terhubung dengan beban, arus akan mulai mengalir. Interaksi antara arus rotor dan medan magnet pada kumparan stator menghasilkan arus di kumparan stator sebagai respons terhadap gaya mekanik yang diberikan. Untuk mengubah motor induksi menjadi generator induksi, diperlukan daya reaktif atau magnetisasi guna menghasilkan tegangan pada terminal output. Generator

induksi adalah jenis generator arus bolak-balik (AC) yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik AC.

Generator induksi AC memiliki dua karakteristik operasional yaitu kondisi tanpa beban dan berbeban. Pada kondisi tanpa beban karakteristik generator meliputi arus medan, tegangan terminal, dan fluks magnetik tanpa pembebanan. Sementara pada kondisi berbeban karakteristik meliputi kuat arus dan tegangan total yang mengalir ke beban. Strukturnya terdiri dari dua komponen utama yakni stator (komponen statis yang menghasilkan tegangan AC) dan rotor (komponen bergerak yang menghasilkan medan magnet untuk menginduksi stator).

Stator didesain dengan kerangka pelindung yang berfungsi untuk mengamankan seluruh komponen internal generator. Jumlah kutub dalam generator AC ditentukan berdasarkan dua parameter utama, yaitu kecepatan rotasi rotor dan frekuensi gaya gerak listrik (GGL) yang dihasilkan. Generator asinkron (induksi) dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 10 Generator induksi

### 2.2.8 Potensi Daya

Air merupakan sumber energi yang dapat dikonversikan menjadi energi listrik. Sebagai sumber energi terbarukan, air memiliki potensi yang sangat signifikan di Indonesia, dengan total potensi energi air mencapai 75,76 GW, dimana 0,45 GW diantaranya merupakan potensi untuk pembangkit mikro hidro. Air menawarkan keunggulan sebagai sumber energi yang ekonomis dan mudah diakses, dengan dua bentuk energi yang dapat dimanfaatkan: energi potensial dari air terjun dan energi kinetik dari aliran air.

Keberlanjutan air sebagai sumber energi terbarukan terjamin melalui siklus hidrologi bumi yang berjalan terus-menerus. Sistem pembangkit listrik tenaga air memerlukan suplai air yang mengalir secara kontinu, umumnya berasal dari sungai atau anak sungai. Bila dibandingkan dengan alternatif energi terbarukan lain seperti energi surya dan angin, pembangkit hidroelektrik menunjukkan keunggulan signifikan dalam hal kontinuitas produksi energi yang dapat beroperasi sepanjang 24 jam. Pemanfaatan potensi energi air ini biasanya diimplementasikan melalui instalasi kincir air atau turbin air yang mengkonversi energi potensial dari air terjun atau energi kinetik dari aliran sungai.

Besarnya debit yang diterapkan sebagai debit rencana dapat berupa debit minimum dari maksimum, dengan pemilihan yang bergantung pada fungsi spesifik yang direncanakan untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). Penentuan nilai debit yang tepat merupakan faktor krusial dalam optimalisasi kinerja dan efisiensi sistem pembangkit, serta berimplikasi langsung terhadap kapasitas daya yang dapat dihasilkan oleh instalasi PLTMH tersebut [10]. Besarnya daya yang dihasilkan ditunjukkan pada persamaan (2.20).

$$P = g \times Q \times \eta_t \times \eta_g \times H_{eff} \dots \dots \dots (2.20)$$

dengan :

$P$  = daya (kW)

$g$  = gravitasi ( $m/s^2$ )

$Q$  = debit air ( $m^3/s$ )

$\eta_t$  = efisiensi turbin (%)

$\eta_g$  = efisiensi generator (%)

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

### 2.2.9 Perencanaan Ekonomi

Perencanaan ekonomi melibatkan beberapa komponen perhitungan penting. Produksi energi tahunan dihitung dengan mengalikan daya yang dibangkitkan (kW) dengan total waktu operasi dalam setahun (8.760 jam), dengan mempertimbangkan faktor daya sebesar 0,85 seperti persamaan (2.21).

$$\text{Produksi Energi per Tahun} = P_{\text{net}} \times 8.760 \times \text{PF} \dots\dots\dots (2.21)$$

dengan :

$P_{\text{net}}$  = daya bersih (kW)

PF = faktor daya

### 2.2.9.1 Harga Pokok Produksi

Harga pokok produksi mencerminkan total biaya yang dibutuhkan untuk memproduksi energi dalam operasional pembangkit. Perhitungan ini penting untuk mengevaluasi efisiensi biaya produksi listrik dibandingkan dengan alternatif lainnya. Secara teori dapat dipergunakan persamaan (2.22).

$$HPP_{\text{per kWh}} = \frac{\text{Biaya Operasional Tahunan}}{\text{Produksi Energi Tahunan}} \dots\dots\dots (2.22)$$

dengan :

Biaya Operasional Tahunan: Total biaya yang dikeluarkan dalam satu tahun.

Produksi Energi Tahunan : Energi total yang dihasilkan oleh PLTMH selama satu tahun (dalam kWh).

### 2.2.9.2 Payback Period

adalah ukuran yang mengindikasikan jangka waktu yang dibutuhkan untuk menutup biaya investasi awal. Suatu proyek investasi dinilai layak apabila periode pengembalian modalnya lebih cepat dibandingkan dengan periode yang telah ditetapkan. Dengan demikian, proyek investasi tersebut layak untuk dijalankan [12]. Payback period dapat dicari dengan persamaan (2.23).

$$\text{Payback Period} = \frac{\text{Biaya Investasi}}{\text{Arus kas bersih}} \times 1 \text{ tahun} \dots\dots\dots (2.23)$$

dengan:

Investasi Awal ( $I_0$ ) = Total pengeluaran modal untuk instalasi mikrohidro

Arus Kas Tahunan = Pendapatan bersih tahunan dari pembangkit listrik

Satuan waktu = Dinyatakan dalam tahun

### 2.2.9.3 Net Present Value (NPV)

Net Present Value (NPV) dihitung melalui analisis arus kas tahunan dengan membandingkan pengeluaran dan pemasukan pada setiap tahun. Perhitungan ini melibatkan discount factor yang dikalikan dengan cash flow untuk mendapatkan discount cash flow seperti pada persamaan (2.24).

$$NPV = -I_0 + \sum [CF_t / (1+r)^t] \dots\dots\dots (2.24)$$

dengan:

$-I_0$  = Investasi awal (dalam nilai negatif karena ini adalah pengeluaran).

$CF_t$  = Arus kas bersih (net cash flow) pada periode t. Ini dapat berupa pendapatan atau pengeluaran bersih dari proyek pada periode tersebut.

$r$  = Tingkat diskonto (%)

$t$  = Periode waktu (tahun)

$\Sigma$  = Penjumlahan selama masa proyek

Jika nilai NPV lebih besar dari nol ( $NPV > 0$ ), investasi tersebut dinilai menguntungkan dan memberikan manfaat ekonomis, sehingga proyek layak untuk dilaksanakan.

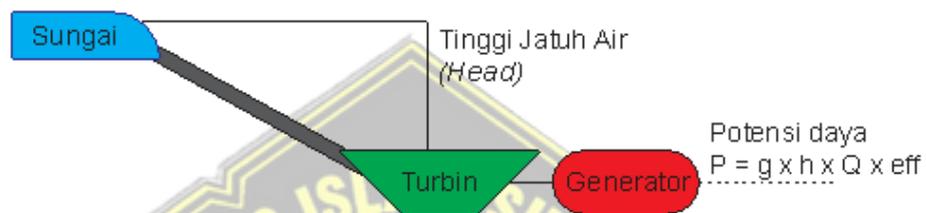
Jika nilai NPV kurang dari nol ( $NPV < 0$ ), investasi tersebut tidak memberikan manfaat ekonomis dan berpotensi merugikan, sehingga proyek sebaiknya tidak dilanjutkan.

Jika nilai NPV sama dengan nol ( $NPV = 0$ ), investasi berada pada titik impas di mana tidak menghasilkan keuntungan maupun kerugian bagi perusahaan.

## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1 Model Penelitian

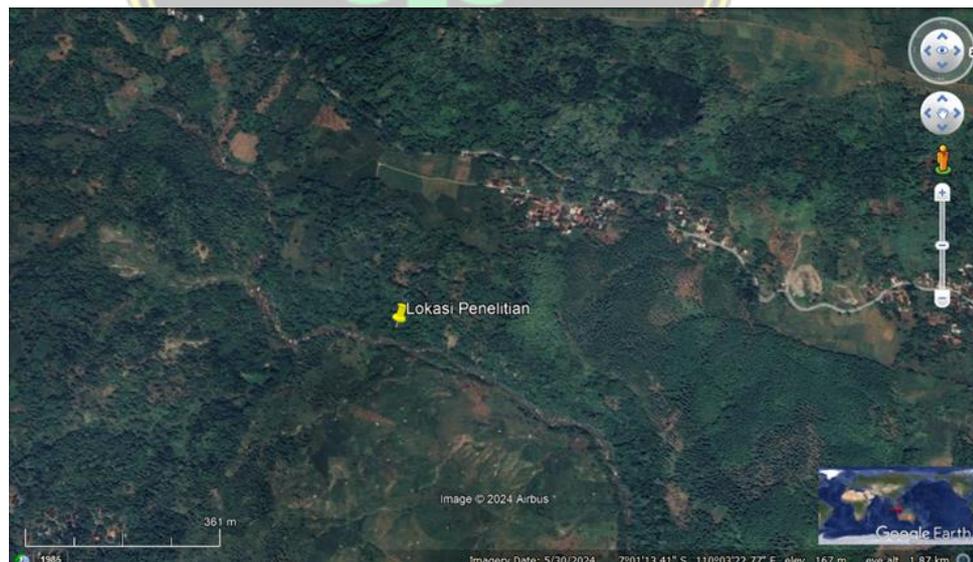
Perancangan sebuah PLTMH, terdapat beberapa parameter kunci yang perlu diperhatikan yaitu debit air ( $Q$ ) dan tinggi jatuh air ( $head$ ). Kedua parameter ini akan menentukan pemilihan jenis turbin yang sesuai serta kapasitas generator yang dibutuhkan. Gambar 3.1 menunjukkan model penelitian.



Gambar 3.1 Model Penelitian

### 3.2 Lokasi Penelitian

Penelitian mengenai potensi pembangkit listrik tenaga mikro hidro (PLTMH) dilaksanakan di Sungai Damar terletak di Desa Gebangan, Kecamatan Pageruyung, Kabupaten Kendal. Lokasinya dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Lokasi Penelitian

### 3.3 Data Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui potensi PLTMH di Desa Gebangan Kecamatan Pageruyung Kabupaten Kendal sehingga dapat dimanfaatkan menjadi energi listrik pada koordinat  $72^{\circ} 01' 20.78''$  dan E :  $110^{\circ} 03' 25.55''$  BT. Data Debit air diambil dari Badan Pusat Statistik (BPS) Kabupaten Kendal [16]. Data debit selama 10 tahun dapat dilihat pada Gambar 3.3

DEBIT SUNGAI DAMAR																								
BULAN	OKTOBER		NOPEMBER		DESEMBER		JANUARI		PEBRUARI		MARET		APRIL		MEI		JUNI		JULI		AGUSTUS		SEPTEMBER	
TAHUN	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
2010/2011	2214	2877	2488	3196	2316	2517	2262	2123	2202	2898	2164	2344	2683	2683	2683	2986	2634	2835	2831	2599	2504	2399		
2011/2012	2390	2390	3990	3970	3970	3970	3258	3118	2881	2319	2221	2413	2415	2660	2721	2479	2650	2154	1906	1906	1856	1840		
2012/2013	963	981	910	702	1543	563	2799	2431	1500	2146	2041	2355	2610	2208	2470	2470	1110	1006	1303	997	483	483		
2013/2014	1210	673	1012	1112	1231	1623	1628	1712	1079	1097	1417	1379	2011	1017	979	960	787	629	613	591	519	490		
2014/2015	679	817	885	917	1318	1732	1979	2021	2209	2172	2132	1242	1242	1395	956	594	1371	975	492	432	313	219		
2015/2016	1367	1367	1509	1563	2324	2516	2527	2640	2416	2709	2531	2390	2461	2461	2116	2097	1991	1809	2001	2316	1771	1069		
2016/2017	1042	1211	1306	1546	1282	1281	3478	3867	5359	4088	4088	4088	3767	3857	3809	3280	2551	2472	2472	2472	1125	1125		
2017/2018	1024	1125	1204	2551	2955	2955	2955	2955	2955	2955	2955	2955	2955	2955	2551	2551	1125	1125	1125	1024	1024	936	936	
2018/2019	1045	1124	1238	1459	1582	1637	1972	1996	2025	1983	1883	1828	2032	2006	1939	1916	1511	1458	1411	1342	1062	998		
2019/2020	747	898	973	1008	1940	2917	3008	3324	3540	3071	2865	2055	1554	1604	1199	973	789	677	670	605	605	591		

Gambar 3.3 Debit Damar 10 tahun

Debit air yang mengalami fluktuasi pada bulan tertentu dapat memengaruhi perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) tetapi hal ini wajar terjadi. Fluktuasi debit ini menunjukkan ketidakstabilan pasokan air yang berpotensi mengurangi produksi energi listrik pada bulan-bulan tertentu. Oleh karena itu, dalam perencanaan PLTMH perlu dilakukan analisis debit andalan untuk memastikan bahwa pembangkit tetap dapat beroperasi secara optimal meskipun terjadi fluktuasi debit. Selain itu, untuk mengoptimalkan kinerja PLTMH dalam menghadapi variasi debit, desain sistem dapat dirancang dengan menggunakan dua penstok (penstock) yang memungkinkan pembangkit beroperasi dengan dua output. Jika menggunakan desain ini, debit desain dapat dibagi menjadi dua aliran, sehingga setiap penstok hanya perlu menangani setengah dari total debit. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan fleksibilitas operasional PLTMH, tetapi juga memastikan bahwa pembangkit tetap dapat berfungsi secara efisien bahkan ketika debit air mengalami penurunan. Maka dari itu, fluktuasi debit pada bulan tertentu menjadi lebih teratasi dalam perencanaan dan operasional PLTMH.

Data ketinggian (*head*) menggunakan observasi langsung ke lapangan dengan titik terendah dan titik tertinggi dengan bantuan Google Earth sebagai acuan

ketinggian elevasi. Perhitungan ketinggian elevasi dilakukan dengan selisih elevasi tertinggi dan elevasi terendah.



Gambar 3.4 Head Sungai Damar.

### 3.4 Tahapan Penelitian

Penelitian mengenai potensi dan kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) dilaksanakan melalui serangkaian tahapan yang terstruktur dan sistematis untuk mencapai hasil yang optimal. Detail lebih lanjut dari masing-masing tahapan akan diuraikan pada bagian berikutnya.

#### 3.4.1 Menentukan Debit Andalan

Debit air ditentukan berdasarkan data historis yang diperoleh dari Badan Pusat Statistik (BPS) Kabupaten Kendal. Data ini kemudian diurutkan dari nilai terbesar hingga terkecil untuk menentukan debit andalan (Q80). Perhitungan dilakukan menggunakan interpolasi sesuai dengan persamaan 2.1 dan 2.2.

#### 3.4.2 Menghitung Head Efektif

Head efektif diperoleh dengan menghitung selisih antara elevasi titik intake dan titik powerhouse. Pengukuran elevasi dilakukan menggunakan Google Earth, kemudian dihitung head bruto. Setelah itu, dilakukan perhitungan kehilangan energi menggunakan persamaan 2.17 dan 2.18.

### **3.4.3 Pemilihan Jenis Turbin**

Pemilihan turbin dilakukan berdasarkan nilai head efektif dan debit air. Kecepatan spesifik turbin dihitung menggunakan persamaan 2.19, dan jenis turbin ditentukan dengan mengacu pada tabel pemilihan turbin di Bab 2.

### **3.4.4 Perhitungan Potensi Daya**

Daya yang dapat dihasilkan oleh PLTMH dihitung dengan memperhitungkan debit air, head efektif, dan efisiensi turbin serta generator. Perhitungan ini dilakukan menggunakan persamaan 2.20.

### **3.4.5 Pemilihan Generator**

Pemilihan generator dilakukan berdasarkan daya yang dihasilkan oleh turbin serta kebutuhan tegangan keluaran. Generator yang digunakan harus memiliki efisiensi tinggi untuk meminimalkan kehilangan energi dan harus sesuai dengan kapasitas daya PLTMH.

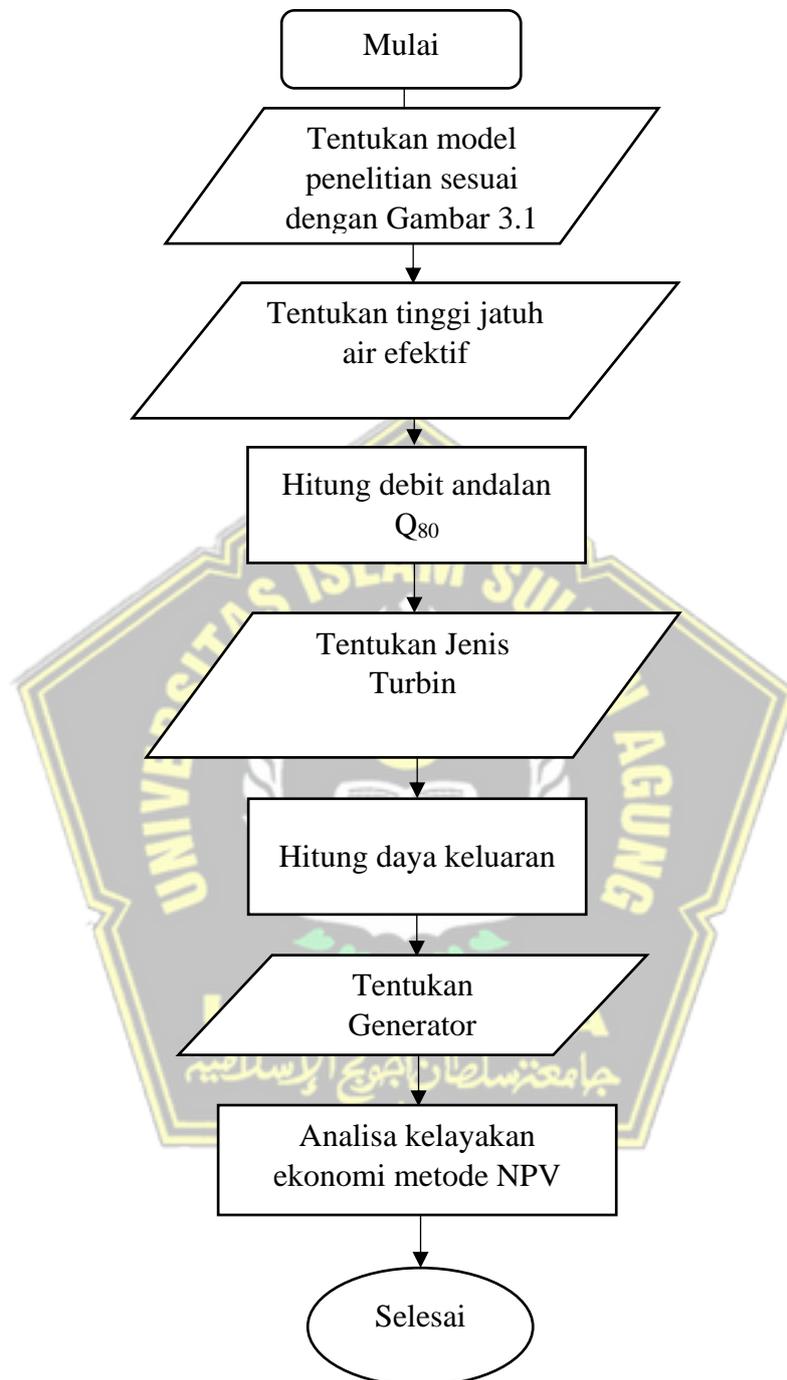
### **3.4.6 Penentuan Tata Letak dan Dimensi PLTMH**

Tata letak dan dimensi PLTMH ditentukan berdasarkan hasil analisis debit air dan head efektif. Perhitungan dimensi dilakukan berdasarkan debit air yang tersedia dan kapasitas turbin yang digunakan. Analisis tata letak mengacu pada kondisi geografis Sungai Damar agar sistem PLTMH dapat beroperasi secara optimal. Perhitungan tata letak dan dimensi dapat dihitung sesuai dengan persamaan 2.22 hingga 2.25.

### **3.4.7 Analisis Ekonomi**

Analisis ekonomi dilakukan dengan menghitung produksi energi tahunan, harga pokok produksi listrik, serta evaluasi kelayakan proyek berdasarkan metode Payback Period dan Net Present Value (NPV). Perhitungan dilakukan sesuai dengan persamaan 2.21 hingga 2.24.

### 3.5 Flowchart Penelitian



Gambar 3. 5 Flowchart Penelitian

### **3.6 Analisis**

#### **3.6.1 Analisis Debit dan Head**

Analisis debit air dimulai dengan pengumpulan data historis debit Sungai Damar selama periode 10 tahun (2010-2020) yang diperoleh dari Badan Pusat Statistik (BPS) Kabupaten Kendal. Data bulanan ini kemudian diurutkan dari nilai terbesar ke terkecil untuk memudahkan perhitungan probabilitas. Sementara Analisis head dilakukan melalui pengukuran elevasi menggunakan Google Earth untuk menentukan elevasi titik intake (tertinggi) dan elevasi power house (terendah). Head bruto diperoleh dari selisih antara kedua elevasi tersebut. Selanjutnya dilakukan perhitungan kehilangan energi (head loss) yang terdiri dari major losses serta minor losses.

Hasil dari kedua analisis ini menghasilkan parameter utama berupa debit andalan (Q80) dan head efektif yang menjadi dasar perencanaan PLTMH. Parameter-parameter ini digunakan untuk menentukan jenis dan kapasitas turbin yang sesuai, menghitung potensi daya yang dapat dibangkitkan, serta merencanakan dimensi komponen-komponen sipil PLTMH.

#### **3.6.2 Analisis Teknis**

Analisis ini fokus pada pemilihan peralatan yang tepat untuk pembangkit listrik. Berdasarkan data debit air dan ketinggian yang sudah diolah, ditentukan jenis turbin yang paling sesuai untuk lokasi tersebut. Selain itu, dilakukan juga perhitungan untuk menentukan ukuran pipa dan komponen teknis lainnya. Semua perhitungan ini mengacu pada standar yang berlaku untuk memastikan pembangkit dapat beroperasi dengan baik.

#### **3.6.3 Analisis Ekonomi**

Analisis ekonomi menghitung semua biaya yang diperlukan untuk membangun dan mengoperasikan pembangkit listrik, mulai dari biaya pembelian peralatan, biaya konstruksi, hingga biaya operasional. Perhitungan juga dilakukan untuk mengetahui berapa lama waktu yang diperlukan untuk mengembalikan modal investasi dan keuntungan yang bisa didapatkan. Analisis ini penting untuk memastikan proyek menguntungkan secara finansial.

## BAB IV HASIL DAN ANALISA

Merujuk pada model penelitian sesuai Gambar 3.1 dan data tinggi jatuh air sesuai Gambar 3.4 serta perhitungan data debit andalan Q80. Data dan hasil perhitungan tersebut digunakan untuk menentukan potensi daya, jenis turbin, dan kelayakan ekonomi menggunakan metode NPV. Hasil ini menjadi dasar rekomendasi pengembangan PLTMH di Sungai Damar.

### 4.1 Analisis Debit Air

Ketersediaan data debit yang akurat dan dalam rentang waktu yang cukup panjang sangat diperlukan untuk mengetahui karakteristik aliran sungai dan menentukan debit andalan yang dapat digunakan dalam perencanaan. Dalam penelitian ini, digunakan data debit rata-rata bulanan Sungai Damar selama 10 tahun dari 2010 sampai dengan 2020 yang diperoleh dari Badan Pusat Statistik (BPS) Kabupaten Kendal yang ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Rata-rata debit 10 tahun Sungai Damar

<b>Bulan</b>	<b>Liter/detik</b>
Januari	2602,65
Februari	2580,2
Maret	2367,3
April	2328,8
Mei	2086,45
Juni	1582,95
Juli	1455,4
Agustus	1070,6
September	1188,9
Oktober	1307,2
November	1676,95
Desember	2108,6

## 1. Perhitungan Debit Andalan Q80

### a. Urutkan data debit dari yang terbesar ke terkecil:

Langkah ini bertujuan untuk menyusun data debit air berdasarkan nilai terbesar hingga terkecil. Pengurutan ini diperlukan sebagai bagian dari perhitungan debit andalan Q80, di mana nilai Q80 dihitung menggunakan interpolasi pada posisi tertentu dalam urutan data. Proses ini memastikan akurasi dalam menentukan debit yang dapat diandalkan untuk perencanaan PLTMH. Urutan debit dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Urutan debit dari terbesar ke terkecil

No	Bulan	Debit (Liter/detik)
1	Januari	2602,65
2	Februari	2580,20
3	Maret	2367,30
4	April	2328,80
5	Desember	2108,60
6	Mei	2086,45
7	November	1676,95
8	Juni	1582,95
9	Oktober	1307,20
10	Juli	1455,40
11	September	1188,90
12	Agustus	1070,60

### b. Perhitungan Debit Andalan Q80:

Perhitungan debit andalan Q80 dilakukan untuk menentukan debit air yang dapat diandalkan sepanjang tahun dengan probabilitas ketersediaan 80%. Langkah ini penting dalam perencanaan PLTMH karena debit andalan menjadi dasar untuk menghitung potensi daya dan menentukan spesifikasi komponen utama seperti turbin dan pipa pesat. Debit andalan dapat dihitung

menggunakan persamaan (2.1) dan interpolasi atau jika hasil berada di antara 2 data bisa hitung menggunakan persamaan (2.2).

$$\text{Jumlah data } (n) = 12 \text{ bulan}$$

$$\text{Posisi } Q_{80} = \left(\frac{80}{100}\right) \times (n+1) = 0.8 \times 13 = 10.4$$

Karena 10.4 berada di antara data ke-10 dan ke-11, perlu dilakukan interpolasi:

Data ke-10: 1307.20 L/s

Data ke-11: 1188,9 L/s

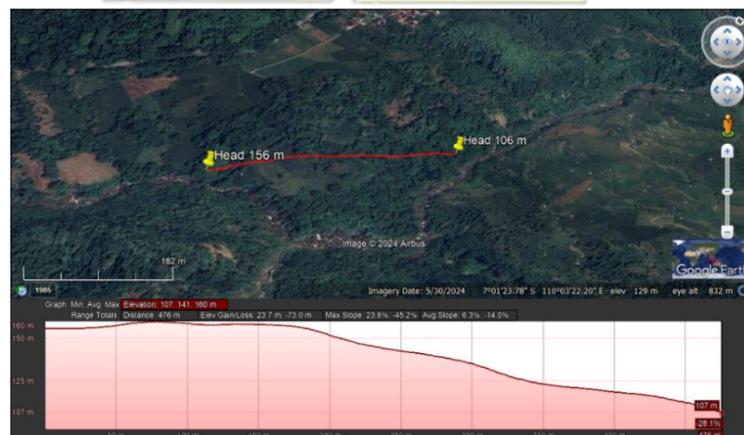
Interpolasi:

$$\begin{aligned} Q_{80} &= 1307.20 - \frac{10.4-10}{11-10} \times (1307.20-1188,9) \\ &= 1307.20 - 0.4 \times 236.6 \\ &= 1307.20 - 1188,9 \\ &= 1259.88 \text{ L/s} = 1.25988 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Debit andalan  $Q_{80}$  sebesar 1.25988  $\text{m}^3/\text{s}$  akan digunakan sebagai debit desain PLTMH karena mewakili ketersediaan air yang dapat diandalkan sepanjang tahun dengan probabilitas 80%.

#### 4.2 Analisis Head (Tinggi Jatuh Air)

Parameter kedua dalam perencanaan PLTMH adalah tinggi jatuh air (head). Head yang tersedia akan menentukan besarnya energi potensial yang dapat dikonversi menjadi energi listrik. Perbedaan head tertinggi dan terendah dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Pengukuran Head

Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan Google Earth, diperoleh bahwa panjang kedua titik adalah 476 meter didapat pula data elevasi sebagai berikut:

Elevasi titik intake (tertinggi) : 156 mdpl

Elevasi lokasi power house (terendah): 106 mdpl

#### 4.2.1 Perhitungan *head* bruto

Head bruto dihitung dari selisih antara elevasi tertinggi dan elevasi terendah pada lokasi penelitian.

$$\begin{aligned} \text{Head bruto} &= \text{Elevasi tertinggi} - \text{Elevasi terendah} \\ &= 156 \text{ m} - 106 \text{ m} \\ &= 50 \text{ m} \end{aligned}$$

#### 4.2.2 Perhitungan *head* efektif

Tahapan perencanaan PLTMH perlu diperhitungkan kehilangan energi (*head loss*) yang terjadi sepanjang sistem pembawa air, tetapi harus diketahui terlebih dahulu panjang penstock sesuai dengan persamaan (2.12) dan kecepatan aliran sesuai dengan persamaan (2.13) serta diameter penstock sesuai dengan persamaan (2.14). Selanjutnya *Head loss* dapat dicari dengan persamaan (2.17) untuk major losses dan persamaan (2.18) untuk minor losses.

Panjang Total Pipa

Panjang lintasan horizontal: 276 meter

Tinggi vertikal : 50 meter

$$\text{Panjang total} = \sqrt{(50^2 + 276^2)}$$

$$= 280.5 \text{ m}$$

Kecepatan air dalam pipa pesat

$$\begin{aligned} V_p &= 0.125\sqrt{(2 \times g \times h)} \\ &= 0.125\sqrt{(2 \times 9.81 \times 50)} \\ &= 2.47 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Diameter pipa pesat

$$D = \sqrt{((4 \times Q)/(\pi \times V_p))}$$

$$= \sqrt{(4 \times 1.25988)/(\pi \times 2.47)}$$

$$= 0.8 \text{ m}$$

Kehilangan energi pada saluran pembawa (major losses).

$$hf = 0.0207 \times (280.5/0.8) \times (2.47^2/2 \times 9.81)$$

$$= 2.26 \text{ m}$$

Kehilangan energi akibat belokan dan sambungan (*minor losses*)

$$hm = 3.1 \times (2.47^2/2 \times 9.81)$$

$$= 0.96 \text{ m}$$

Hasil Akhir

$$htotal = hf + hm = 2.26 + 0.96 = 3.22 \text{ m}$$

$$\text{Head Efektif} = \text{Head Total} - htotal$$

$$= 50 - 3.22$$

$$= 46.78 \text{ m}$$

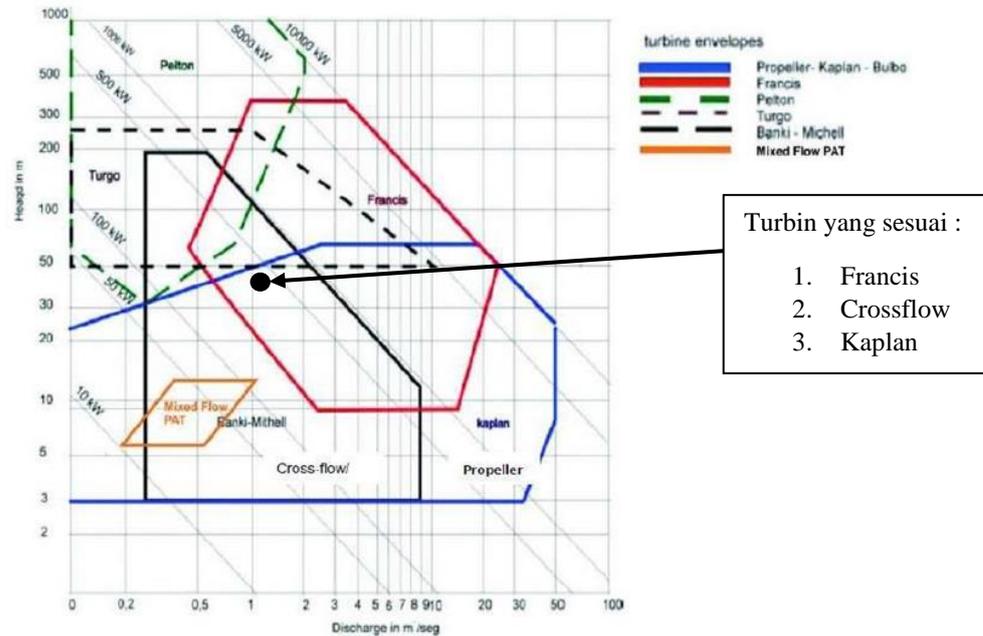
### 4.3 Analisis Teknis

Setelah mendapatkan parameter utama berupa debit andalan dan head efektif, tahap berikutnya adalah melakukan analisis teknis untuk menentukan potensi daya serta pemilihan komponen utama PLTMH. Analisis teknis ini sangat penting untuk memastikan bahwa sistem PLTMH yang akan dibangun dapat beroperasi secara optimal dan efisien.

#### 4.3.1 Pemilihan Turbin

Pemilihan jenis turbin merupakan aspek krusial dalam perencanaan PLTMH karena akan mempengaruhi efisiensi dan keandalan sistem secara keseluruhan. Pemilihan didasarkan pada dua parameter utama dan pemilihan turbin sesuai turbine application chart dapat dilihat pada Gambar 4.2.

- Head efektif = 46.78 m
- Debit andalan  $Q_{80} = 1.25988 \text{ m}^3/\text{s}$



Gambar 4.2 Pemilihan Turbin

Untuk menentukan jenis turbin yang paling sesuai, dilakukan perhitungan kecepatan spesifik ( $N_s$ ) menggunakan persamaan (2.19) dengan menggunakan putaran standar  $N = 1500$  rpm, maka kecepatan spesifik:

$$N_s = 1500 \times \frac{1.25988^{0.5}}{46.78^{0.75}}$$

$$N_s = 1500 \times \frac{1.122}{17,887}$$

$$N_s = 94,09 \text{ rpm}$$

Berdasarkan nilai kecepatan spesifik yang diperoleh ( $N_s = 94,09$ ) dan mengacu pada kriteria pemilihan turbin pada Tabel 2.3, maka Turbin Francis menjadi pilihan yang paling sesuai[17], dikarenakan:

1. Nilai  $N_s$  berada dalam rentang optimal turbin Francis ( $60 < N_s < 300$ ).
2. Head efektif (46.78 m) sesuai dengan rentang operasi turbin Francis ( $10 < H < 350$ ).
3. Memiliki efisiensi tinggi yaitu 85-90%.

### 4.3.2 Perhitungan Potensi Daya

Menghitung potensi daya yang dapat dibangkitkan oleh PLTMH, digunakan persamaan dasar konversi energi air menjadi energi listrik dengan

mempertimbangkan berbagai faktor efisiensi yang nilainya bergantung pada jenis turbin dan generator yang digunakan dipenelitian ini menggunakan 0,765. Perhitungan potensi daya menggunakan persamaan (2.20).

$$\begin{aligned} P &= 1.25988 \times 9.81 \times 0.765 \times 46.78 \\ &= 442.3 \text{ kW} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan potensi daya menunjukkan potensi daya yang cukup besar, yaitu 442.3 kW

### 4.3.3 Pemilihan Generator

Berdasarkan hasil perhitungan daya sebesar 442.3 kW, direkomendasikan spesifikasi generator sebagai berikut:

Tipe: Generator sinkron 3 fase

Tegangan : 400V/230V

Frekuensi : 50 Hz

Putaran : 1500 rpm

Power factor (PF) = 0.8

Efisiensi = 90%

Kapasitas minimum generator

$$= (\text{Daya turbin} \times \text{Safety factor}) / \text{Power factor}$$

$$= (442,3 \times 1.1) / 0.8$$

$$= 608,16 \text{ kVA}$$

Kapasitas standar yang dipilih: 630 kVA (standar terdekat di atas minimum)

Pemilihan generator dengan kapasitas 630 kVA didasarkan pada beberapa pertimbangan:

1. Memberikan faktor keamanan untuk mengantisipasi beban puncak.
2. Menjamin umur operasi yang lebih panjang karena generator tidak selalu beroperasi pada kapasitas maksimum.
3. Mengakomodasi potensi pertumbuhan beban di masa depan.
4. Memberikan fleksibilitas dalam pengoperasian dan pemeliharaan.

Berdasarkan hasil analisis teknis, maka disimpulkan bahwa pembangunan PLTMH Damar secara teknis layak dengan potensi daya yang cukup besar. Kombinasi head efektif 46.78 m dan debit andalan Q80 sebesar 1.25988 m<sup>3</sup>/s dapat menghasilkan daya hingga 442.3 kW dengan menggunakan turbin Francis dan generator sinkron 630 kVA.

#### 4.4 Analisis Dimensi dan Tata Letak Komponen PLTMH

Berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan parameter-parameter utama pada Gambar 4.1 jarak total antara head tertinggi dengan head terendah sejauh 476 meter, maka dapat dilakukan analisis dimensi dan tata letak komponen-komponen utama PLTMH sebagai berikut:

##### 4.4.1 Analisis Dimensi Intake

Bendung dan intake dirancang dengan mempertimbangkan debit air yang dibutuhkan untuk operasi PLTMH. Dengan debit desain sebesar 1.25988 m<sup>3</sup>/s, dilakukan perhitungan dimensi sebagai berikut:

Perhitungan debit intake menggunakan persamaan (2.3):

$$\begin{aligned} Q_{\text{intake}} &= 1.25988 \times 1,2 \\ &= 1,51186 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Untuk menentukan lebar pintu air, digunakan persamaan (2.4):

$$\begin{aligned} 1,51186 &= 0,8 \times b \times 1,5 \times \sqrt{(2 \times 9,8 \times 0,25)} \\ b &= 2,2 \text{ meter} \end{aligned}$$

##### 4.4.2 Analisis Dimensi Bak Pengendap

Dimensi bak pengendap dihitung menggunakan persamaan (2.5) dan (2.6):

$$\begin{aligned} \text{Volume bak} &= 20 \times 1,51186 \\ &= 30,2372 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Dengan mempertimbangkan rasio panjang dan lebar 3:1, diperoleh dimensi:

- Dengan volume 30,2372 m<sup>3</sup>
- Jika panjang = 7,5 m
- Lebar = 2,5 m
- Maka kedalaman

$$h = 30,2372 / (7,5 \times 2,5)$$

$$= 1,61 \text{ m}$$

#### 4.4.3 Analisis Dimensi Saluran Pembawa

Menggunakan persamaan (2.7) dan (2.8), dengan asumsi kecepatan aliran 1,5 m/s:

$$\begin{aligned} A &= 1.25988/1,5 \\ &= 0,8399 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Dimensi saluran:

- Dengan asumsi kecepatan aliran 1,5 m/s
- Lebar diambil 1,2 m
- Kedalaman

$$\begin{aligned} h &= 0,8399/1,2 \\ &= 0,69 \approx 0,7 \text{ m} \end{aligned}$$

- Panjang ditentukan dari survei topografi = 180 m

#### 4.4.4 Analisis Dimensi Bak Penenang

Perhitungan volume bak penenang menggunakan persamaan (2.9) dengan data debit desain 1.25988 m<sup>3</sup>/d :

$$\begin{aligned} V &= 15 \times 1.25988 \\ &= 18,8982 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Dimensi yang direkomendasikan:

- Panjang: 4 meter
- Lebar: 3 meter
- Kedalaman

$$\begin{aligned} h &= 18,8982/(4 \times 3) \\ &= 1,58 \text{ m} \approx 1,6 \text{ m} \end{aligned}$$

#### 4.4.5 Analisis Dimensi Pipa Pesat

Perhitungan dimensi pipa pesat menggunakan persamaan (2.11) hingga (2.16):

- a. Panjang Total Pipa

$$\text{Panjang lintasan horizontal} = 276 \text{ meter}$$

$$\text{Tinggi vertikal} = 50 \text{ meter}$$

$$\begin{aligned} \text{Panjang total} &= \sqrt{(50^2 + 276^2)} \\ &= 280.5 \text{ m} \end{aligned}$$

- b. Kecepatan air dalam pipa pesat

$$\begin{aligned} V_p &= 0.125\sqrt{(2 \times 9.81 \times 50)} \\ &= 2.47 \text{ m/s} \end{aligned}$$

- c. Diameter pipa pesat

$$\begin{aligned} D &= \sqrt{((4 \times 1.25988)/(\pi \times 2.47))} \\ D &= 0.8 \text{ m} \end{aligned}$$

- d. Ketebalan minimal pipa

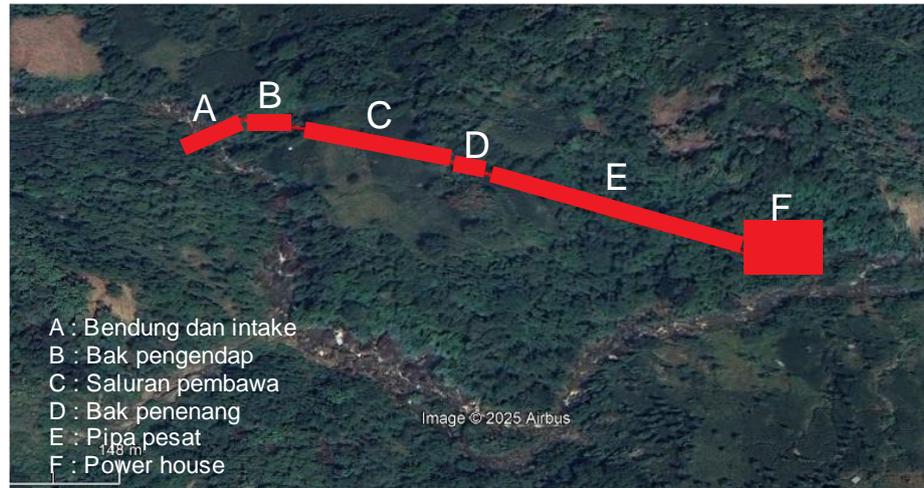
$$\begin{aligned} t_{min} &= (508 + 800)/400 \\ &= 3.27 \text{ mm} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, spesifikasi pipa pesat yang direkomendasikan adalah pipa baja dengan diameter 800 mm, tebal 4 mm, dan panjang total 280.5 m.

#### 4.4.6 Tata Letak Komponen

Berdasarkan analisis teknis dan topografi lokasi, tata letak komponen PLTMH diatur sebagai berikut:

- 1) Bendung dan Intake (0 - 10 m)
- 2) Bak Pengendap (10 - 17.5 m)
- 3) Saluran Pembawa (17.5 - 197.5 m)
- 4) Bak Penenang (197.5 - 201.5 m)
- 5) Pipa Pesat (201.5 - 476 m)
- 6) Power House (476 m)



Gambar 4.3 Perkiraan tata letak komponen PLTMH

Tata letak ini dirancang untuk mengoptimalkan aliran air dan meminimalkan kehilangan energi sepanjang sistem PLTMH. Jarak antar komponen telah mempertimbangkan aspek hidrolik dan kemudahan dalam operasi serta pemeliharaan.

#### 4.5 Analisis Ekonomi

Analisis ekonomi merupakan aspek penting dalam menentukan kelayakan pembangunan PLTMH Sungai Damar. Analisis ini mencakup perhitungan total investasi, biaya operasional, pendapatan, dan evaluasi kelayakan menggunakan metode Net Present Value (NPV). Analisis ini diperlukan untuk memastikan bahwa proyek ini tidak hanya layak secara teknis tetapi juga menguntungkan secara finansial.

##### 4.5.1 Perhitungan Total Investasi dan Biaya Operasional Tahunan

Perhitungan total investasi awal dan biaya operasional tahunan yang diperlukan untuk pembangunan dan pengoperasian Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Sungai Damar. Perhitungan ini didasarkan pada rincian biaya yang telah disajikan pada lampiran. Berdasarkan rincian biaya pada lampiran, total investasi awal untuk pembangunan PLTMH Sungai Damar dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Total investasi awal

<b>Komponen Biaya</b>	<b>Jumlah (Rp)</b>
Pekerjaan Sipil	2.336.212.500
Peralatan Mekanik	3.000.000.000
Peralatan Elektrik	2.500.000.000
Upah Pekerja	2.113.000.000
Biaya Lain-lain	1.000.000.000
<b>Total Investasi Awal</b>	<b>10.949.212.500</b>

Biaya operasional dan maintenance tahunan diasumsikan 3% dari biaya total investasi [18], sehingga:

$$\text{Biaya O\&M} = 3\% \times \text{Rp } 10.949.212.500$$

$$\text{Biaya O\&M} = \text{Rp } 328.476.375 \text{ per tahun}$$

Perhitungan ini penting untuk mengevaluasi kelayakan ekonomi pembangunan PLTMH Sungai Damar serta menentukan rasio keuntungan yang dapat dihasilkan dalam jangka panjang.

#### 4.5.2 Perhitungan Produksi Energi Tahunan

Perhitungan produksi energi tahunan yang dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Sungai Damar. Berdasarkan persamaan (2.21).

$$P_{net} = 442,3 \text{ kW}$$

$$t = 8.760 \text{ jam (waktu operasi per tahun)}$$

$$PF \text{ (Power Factor)} = 0,8$$

$$\begin{aligned} \text{Produksi Energi per Tahun} &= 442,3 \times 8.760 \times 0,8 \\ &= 3.104.294,4 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan Produksi Energi Per Tahun ini menunjukkan bahwa PLTMH Sungai Damar memiliki potensi untuk menghasilkan energi listrik sebesar 3.104.294,4 kWh per tahun. Angka ini menjadi dasar dalam analisis kelayakan ekonomi, termasuk estimasi pendapatan tahunan dari penjualan listrik yang dihasilkan.

#### 4.5.3 Perhitungan Harga Pokok Produksi

Bagian ini membahas perhitungan harga pokok produksi (HPP) energi listrik yang dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Sungai Damar. Perhitungan ini dilakukan untuk mengetahui besarnya biaya produksi per kilowatt-jam (kWh) serta pendapatan tahunan yang dapat diperoleh. Dengan tarif listrik Rp 1.310/kWh (sesuai tarif dasar listrik PP 112 2022).

$$\begin{aligned} \text{Pendapatan per tahun} &= 3.104.294,4 \text{ kWh} \times \text{Rp } 1.310 \\ &= \text{Rp } 4.067.630.664 \end{aligned}$$

Perhitungan Harga Pokok Produksi merujuk pada persamaan (2.22):

$$\begin{aligned} \text{HPP per kWh} &= \text{Biaya Operasional Tahunan} / \text{Produksi Energi Tahunan} \\ &= \text{Rp } 328.476.375 / 3.104.294,4 \\ &= \text{Rp } 105,8/\text{kWh} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan Harga Pokok Produksi (HPP) ini menunjukkan bahwa biaya produksi per kWh untuk PLTMH Sungai Damar adalah sebesar Rp 105,8 /kWh. Angka ini jauh lebih rendah dibandingkan tarif listrik yang diterapkan, sehingga memberikan indikasi bahwa PLTMH ini memiliki potensi keuntungan yang signifikan. Analisis ini menjadi salah satu parameter penting dalam menentukan kelayakan ekonomi proyek.

#### 4.5.4 Perhitungan Payback Period

Bagian ini membahas perhitungan waktu pengembalian investasi atau payback period untuk pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Sungai Damar. Payback period adalah salah satu indikator kelayakan ekonomi yang penting untuk mengetahui berapa lama investasi awal dapat kembali

melalui arus kas bersih tahunan. Perhitungan payback period didasarkan pada persamaan (2.23).

$$\begin{aligned} \text{Arus kas bersih tahunan} &= \text{Pendapatan} - \text{Biaya operasional} \\ &= \text{Rp } 4.067.630.664 - \text{Rp } 328.476.375 \\ &= \text{Rp } 3.739.154.289 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Payback Period} &= (\text{Biaya Investasi} / \text{Arus kas bersih}) \times 1 \text{ tahun} \\ &= (\text{Rp } 10.949.212.500 / \text{Rp } 3.739.154.289) \times 1 \text{ tahun} \\ &= 2,93 \text{ tahun} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan *payback periods* ini menunjukkan bahwa waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan seluruh biaya investasi awal PLTMH Sungai Damar adalah 2,93 tahun. Dengan waktu pengembalian yang relatif singkat, proyek ini menunjukkan potensi kelayakan ekonomi yang tinggi dan layak untuk direalisasikan.

#### 4.5.5 Analisis NPV

Analisis Net Present Value (NPV) untuk mengevaluasi kelayakan ekonomi proyek pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Sungai Damar. NPV digunakan untuk menentukan apakah proyek ini menghasilkan nilai bersih yang positif. Perhitungan NPV dengan merujuk pada persamaan (2.24) dengan asumsi tingkat diskonto = 10% dan periode analisis = 20 tahun, maka:

$$NPV = -10.949.212.500 + \sum [3.739.154.289 / (1+0,1)^t]$$

Total Nilai Sekarang:

$$\sum \text{Present Value} = 33.918.453.625$$

Hasil Akhir NPV:

$$\begin{aligned} NPV &= -10.949.212.500 + 33.918.453.625 \\ NPV &= \text{Rp } 22.969.241.125 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai NPV proyek adalah Rp 22.969.241.125. Nilai NPV yang positif ini menunjukkan bahwa proyek PLTMH Sungai Damar layak secara ekonomi, karena dapat menghasilkan keuntungan bersih yang signifikan setelah mempertimbangkan tingkat diskonto selama periode analisis 20 tahun.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis dapat disimpulkan bahwa:

- a. Berdasarkan analisis debit dan head, Sungai Damar memiliki debit andalan Q80 sebesar 1.25988 m<sup>3</sup>/s dengan head efektif 46,78 meter, menghasilkan potensi daya terbangkitkan mencapai 442,3 kW.
- b. Berdasarkan analisis teknis dengan parameter kecepatan spesifik (Ns) sebesar 94,09 rpm, pemilihan turbin Francis dengan generator sinkron 630 kVA merupakan konfigurasi optimal untuk kondisi hidrolis yang tersedia, dengan kemampuan produksi energi tahunan mencapai 3.104.294,4 kWh.
- c. Hasil analisis ekonomi menunjukkan prospek investasi yang menjanjikan dengan total investasi awal Rp 10.949.212.500, periode pengembalian modal (payback period) selama 2,93 tahun, dan nilai Net Present Value (NPV) yang positif sebesar Rp 22.969.241.125 untuk periode analisis 20 tahun dengan tingkat diskonto 10%.

#### **5.2 Saran**

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, berikut adalah saran-saran untuk pengembangan PLTMH Sungai Damar:

- a. Perlu dilakukan studi teknis lebih detail sebelum pembangunan dimulai, termasuk pemeriksaan kondisi tanah, pengukuran debit air secara rutin, dan kajian dampak lingkungan untuk memastikan pembangkit dapat beroperasi dengan aman dalam jangka panjang.
- b. Penting untuk membentuk organisasi pengelola PLTMH yang melibatkan warga setempat dan memberikan pelatihan teknis kepada calon operator agar dapat mengelola pembangkit dengan baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] “Permen ESDM Nomor 12 Tahun 2017”.
- [2] KEMENTERIAN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL, “Pemerintah Kejar Target Tingkatkan Bauran EBT.” Accessed: Nov. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/pemerintah-kejar-tingkatkan-bauran-ebt>
- [3] U. Rizki, H. Jawadz, H. Prasetijo, and W. H. Purnomo, “STUDI POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKRO HIDRO (PLTMH) DI ALIRAN SUNGAI DESA KEJAWAR BANYUMAS STUDY OF THE POTENTIAL A MICRO HYDRO POWER PLANT IN THE RIVER KEJAWAR VILLAGE BANYUMAS,” 2019. [Online]. Available: <http://dinarek.unsoed.ac.id>
- [4] F. Shaufi, “STUDI POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKRO HIDRO (PLTMH) BERBANTUAN PROGRAM CASIMIR DI RIAM PAGUNG DESA SANATAB KECAMATAN SAJINGAN BESAR KABUPATEN SAMPAS,” 2020.
- [5] Susanto Ointu, Muammar Zainuddin, and Frengki Eka Putra Surusa, “Studi Perencanaan Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Berdasarkan Potensi Air yang Ada di Desa Pinogu,” 2020.
- [6] KEMEN. PUPR, “STANDAR PERENCANAAN IRIGASI,” 2013.
- [7] T. E. Saragi, E. Oktavianus Zai, and E. Zebua, “ANALISA DEBIT ANDALAN (STUDI KASUS PADA PLTM PARMONGAN II),” 2023.
- [8] “MENTERI ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL REPUBLIK INDONESIA,” 2012.
- [9] I. Gusti Putu Andhita Mahayana, L. Jasa, and I. Gusti Ngurah Janardana, “RANCANG BANGUN PROTOTYPE PLTMH DENGAN TURBIN PELTON SEBAGAI MODUL PRAKTIKUM,” 2020.
- [10] Ferry Maulana Rahman, “STUDI POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO PADA SALURAN IRIGASI DI DESA KALISIDI KECAMATAN UNGARAN BARAT KABUPATEN SEMARANG,” 2019.
- [11] Fanis Abdillah, “STUDI POTENSI DAN PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKRO HIDRO DI BENDUNG SIMBANG KECAMATAN DORO KABUPATEN PEKALONGAN,” 2022.
- [12] Z. Hafiz Muhammad and F. Anggara, “ANALISA HEAD POMPA WATER INTAKE TERHADAP SELF CLEANING FILTER PADA PT.XY,” 2019.

- [13] YONANDA AZIS SAPUTRA, “STUDI POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO (PLTMH) DI SUNGAI MANCINGAN PEKON SEDAYU KECAMATAN SEMAKA KABUPATEN TANGGAMUS PROVINSI LAMPUNG,” 2021.
- [14] A. Sugiri and dan A. Yudi Eka R, “STUDI POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO (PLTMH) DI SUNGAI CIKAWAT DESA TALANG MULIA KECAMATAN PADANG CERMIN KABUPATEN PESAWARAN PROPINSI LAMPUNG,” 2013.
- [15] Ismail and Supriono, “Analisis Ekonomi Energi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Meragun (Desa Meragun, Kec. Nanga Taman, Kab. Sekadau),” 2013.
- [16] “DATA DEBIT SUNGAI KABUPATEN KENDAL.”
- [17] ENNI MASURI BANCIN, “ANALISA KINERJA TURBIN FRANCIS DENGAN TURBIN ARCHIMEDES SCREW DI PLTMH KOMBIH KABUPATEN PAKPAK BHARAT,” 2020.
- [18] “PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MINIHIDRO (PLTM) DI WADUK KARIAN,” 2023.

