

Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) di Sungai Damar Kecamatan Pageruyung Kabupaten Kendal

¹Abu Abdillah Muhammad dan ²Muhamad Haddin
^{1,2}Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung
Jl. Kaligawe Raya No.Km.4, Semarang, Jawa Tengah, Indonesia
e-mail: abdillahabu26@gmail.com

Abstrak-- Meningkatnya konsumsi energi listrik akibat pertumbuhan penduduk dan industri, serta dominasi energi fosil yang berdampak negatif terhadap lingkungan, mendorong pengembangan energi terbarukan seperti Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). Penelitian ini mengkaji tentang potensi PLTMH sebagai upaya mendukung target bauran Energi Baru Terbarukan (EBT) nasional sebesar 23% pada tahun 2025. 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. Metode penelitian yang dilakukan meliputi analisis data debit air 10 tahun terakhir, pengukuran head efektif, estimasi perhitungan potensi daya dan analisis ekonomi dengan metode NPV. Sebagai obyek penelitian ditentukan di Sungai Damar, Kecamatan Pageruyung, Kabupaten Kendal, Jawa Tengah. Hasil menunjukkan bahwa dengan debit andalan $Q_{80} = 1,21256 \text{ m}^3/\text{s}$, head efektif = 46,78 meter menggunakan turbin Francis dihasilkan daya 425,69 kW dengan generator sinkron 630 kVA. Analisis kelayakan ekonomi menunjukkan bahwa total investasi Rp 10.949.212.500 dengan payback period 3,36 tahun dan NPV positif Rp 17.863.241.325 untuk periode operasi 20 tahun, dengan harga pokok produksi listrik Rp 120,04/kWh dan proyeksi produksi energi tahunan 2.736.435,84 kWh. Hasil ini artinya layak secara ekonomi dan berkontribusi signifikan terhadap target EBT nasional.

Kata kunci: PLTMH, Sungai Damar Debit Aliran, Head Efektif, Turbin Francis, Potensi Daya, Kelayakan Ekonomi.

Abstract-- The increasing electricity consumption due to population and industrial growth, along with the dominance of fossil energy that negatively impacts the environment, drives the development of renewable energy such as Micro-hydro Power Plants (MHP). This research examines the potential of MHP as an effort to support the national New and Renewable Energy (NRE) mix target of 23% by 2025. The model is determined as MHP starting from flow discharge, water head height, turbine, and generator. The specified parameters are: discharge, water head height, turbine type, and generator. The research methods include analysis of water discharge data from the last 10 years, effective head measurement, power potential calculation estimates, and economic analysis using the NPV method. The research object is located at Damar River, Pageruyung District, Kendal Regency, Central Java. Results show that with a dependable flow $Q_{80} = 1.21256 \text{ m}^3/\text{s}$, effective head = 46.78 meters using a Francis turbine produces 425.69 kW of power with a 630 kVA synchronous generator. Economic feasibility analysis results show a total investment of IDR 10,949,212,500 with a payback period of 3.36 years and positive NPV of IDR 17,863,241,325 for a 20-year operation period, with electricity production cost of IDR 120.04/kWh and projected annual energy production of 2,736,435.84 kWh. These results indicate economic viability and significant contribution to the national NRE target.

Keywords: MHP, Damar River, Flow Discharge, Effective Head, Francis Turbine, Power Potential, Economic Feasibility.

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk dan perkembangan industri. Salah satu tantangan utama adalah memenuhi kebutuhan energi tersebut secara berkelanjutan dan ramah lingkungan. Penggunaan energi fosil yang masih dominan tidak hanya terbatas jumlahnya, tetapi juga berdampak negatif terhadap lingkungan melalui emisi gas rumah kaca yang berkontribusi pada perubahan iklim global [1].

Berdasarkan data Dewan Energi Nasional (DEN), komposisi energi nasional Tahun 2023 masih sangat bertumpu pada sumber energi konvensional. Batubara mendominasi dengan kontribusi 40,46%, diikuti minyak bumi 30,18%, dan gas bumi 16,28%. Sementara itu, Energi Baru Terbarukan (EBT) hanya berkontribusi sebesar 13,09%. Meskipun terdapat peningkatan sebesar 0,79% dari tahun sebelumnya, pencapaian ini masih jauh dari target yang ditetapkan yaitu 17,87%. Pemerintah telah menetapkan

target ambisius untuk meningkatkan bauran EBT menjadi 19,49% pada tahun 2024 dan 23% pada tahun 2025 [2]. Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) merupakan salah satu alternatif energi terbarukan yang menjanjikan. Sistem pembangkit skala kecil ini memanfaatkan kekuatan air sebagai penggerak utama dan dapat diimplementasikan pada berbagai sumber air seperti aliran irigasi, sungai, atau air terjun. Prinsip kerjanya bergantung pada aliran air, ketinggian jatuh air (*head*), dan volume debit air yang tersedia. Kabupaten Kendal, salah satu dari 35 kabupaten/kota di Provinsi Jawa Tengah, memiliki potensi untuk pengembangan PLTMH, khususnya di Kecamatan Pageruyung. Dengan luas wilayah 51,43 km² dan ketinggian 414.004 mdpl, kecamatan ini memiliki beberapa sungai potensial, termasuk Sungai Damar yang terletak di Desa Gebangan. Sungai Damar memiliki luas DAS sekitar 29,93 km² dengan panjang aliran mencapai 48 km.

Permasalahannya adalah bagaimana memanfaatkan potensi debit Sungai Damar untuk PLTMH. Dampak potensialnya adalah peningkatan kontribusi EBT dalam upaya memperkuat kapasitas penyediaan energi nasional. Solusinya adalah melakukan studi komprehensif tentang potensi PLTMH di Sungai Damar.

Penelitian ini membahas tentang potensi PLTMH dengan mempertimbangkan: potensi debit air, ketinggian jatuh air (*head*). Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis untuk pengembangan PLTMH di wilayah tersebut, sekaligus berkontribusi pada upaya pemerintah dalam meningkatkan penggunaan energi terbarukan di Indonesia.

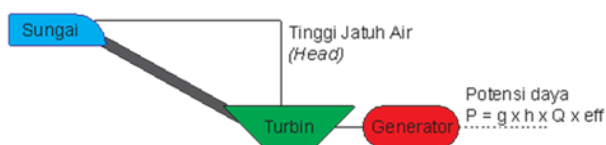
II. STUDI PUSTAKA

Beberapa penelitian terdahulu tentang potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) telah dilakukan, antara lain: studi potensi PLTMH di aliran Sungai Kejawar, Banyumas [3]. PLTMH Riam Pagung, Desa Sanatab, Kabupaten Sambas dengan debit 0,1 m³/det dan head efektif 46,5 meter, potensi daya mekanik yang dihasilkan mencapai 30 kW dengan penggunaan turbin Crossflow dipasang menggunakan sistem kopel langsung [4]. Studi perencanaan PLTMH di Desa Pinogu menunjukkan debit air sebesar 1,69 m³/detik dengan tinggi jatuh air maksimum 3,57 m, menghasilkan potensi daya terbangkitkan sebesar 29,83 kW [5].

III. METODE

A. Model Penelitian

Perancangan sebuah PLTMH memerlukan dua parameter kunci yaitu debit air dan tinggi jatuh air (*head*) yang menjadi dasar menentukan jenis turbin yang sesuai serta kapasitas generator yang dibutuhkan. Model penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Model Penelitian

B. Metode Penelitian

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]. Analisis membutuhkan data minimal selama lima tahun, namun untuk mendapatkan hasil yang optimal, sebaiknya menggunakan data pencatatan selama 10 tahun [7]. Perhitungan probabilitas dengan menggunakan persamaan (1) dan jika hasil terletak di antara 2 (dua) debit maka dapat dihitung interpolasi menggunakan persamaan (2).

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

dengan: Q_x = Probabilitas yang di inginkan, $x / 100$ = Probabilitas dalam bentuk pecahan, n = Jumlah data

$$Q_x = Q_1 - \frac{P_2 - P_1}{P_x - P_1} \times (Q_1 - Q_2) \quad (2)$$

dengan: Q_x = Probabilitas yang diinginkan. 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 .

Komponen PLTMH secara umum terdiri dari:

1. Bendung dan intake

Bendung merupakan struktur penghalang yang dibangun melintang, sedangkan pintu pengambilan air (*intake*) merupakan komponen yang dipasang di ujung pipa. Ukuran pintu masuk air ialah harus sebesar 120 persen dari debit air yang rencana atau debit air desain PLTMH seperti pada persamaan (3) untuk merencanakan tinggi pintu air dan persamaan (4) untuk lebar pintu air.

$$Q_{\text{Intake}} = Q \times 120\% \quad (3)$$

dengan: Q_{Intake} = Debit air pada intake (m³/detik), Q = Debit desain pembangkit (m³/detik)

$$Q = 0,8 \times b \times a \sqrt{2 \times g \times h} \quad (4)$$

dengan: Q = debit aliran air (m³/detik), b = lebar ambang/pintu air (m), a = Tinggi bukaan pintu air (m), 2 = Konstanta, g = percepatan gravitasi (m/detik²), h = Tinggi muka air di atas ambang (m).

2. Bak pengendap

Bak pengendap harus memiliki dimensi yang 10-20 kali lebih besar dari volume debit airnya untuk memastikan efektivitas penyaringan seperti pada persamaan (5) untuk mencari volume ukuran panjang dan lebarnya dan persamaan (6) dapat di cari berapa kedalaman yang perlu di buat.

$$V = 20 \times Q_{\text{Intake}} \quad (5)$$

dengan: V = Volume bak pengendap (m³), 20 = konstanta waktu pengendapan (detik), Q_{Intake} = Debit air pada intake (m³/detik).

$$V = p \times l \times h \quad (6)$$

dengan: V = volume bak pengendap (m³), p = panjang bak pengendap (m), l = lebar bak pengendap (m), h = kedalaman bak pengendap (m).

3. Saluran Pembawa (*Channel/Carrier*)

Perencanaan PLTMH dilakukan dengan mendapatkan nilai kecepatan pada saluran pembawa sehingga dapat di

temukan luas menggunakan persamaan (7) untuk menentukan lebar saluran pembawa dan persamaan (8) untuk menentukan dalam dari saluran pembawa.

$$A = \frac{Q}{v} \quad (7)$$

dengan: A = luas penampang basah bak pengendap (m^2), Q = debit aliran ($m^3/detik$), V = kecepatan aliran bak pengendap ($m/detik$).

$$A = h \times l \quad (8)$$

dengan: A = luas penampang basah bak pengendap (m^2), h = kedalaman bak pengendap (m), l = lebar bak pengendap (m).

4. Bak Penenang (Forebay)

Untuk memastikan memenuhi kebutuhan air dalam pipa pesat maka ukuran bak penenang di buat lebih kecil dari bak pengendap seperti persamaan (9) untuk menentukan volume kemudian bisa di tentukan ukuran panjang serta lebarnya dan persamaan (10) untuk menentukan berapa kedalaman yang perlu di buat.

$$V = 15 \times Q \quad (9)$$

dengan: V = volume forebay (m^3), 15 = konstanta waktu retensi (detik), Q = debit ($m^3/detik$).

$$V = p \times l \times h \quad (10)$$

dengan: V = volume forebay (m^3), p = panjang forebay (m), l = lebar forebay (m), h = kedalaman forebay (m).

5. Pipa pesat

Desainnya harus memperhitungkan kemampuan menahan berbagai tekanan, termasuk tekanan dari water hammer [11] Untuk penentuan panjang serta ukuran penstock sendiri menggunakan persamaan (11) hingga (17).

Panjang penstock = p penstock lurus + p penstock miring (11)

p_{pens}

$$miring = \sqrt{\text{panjang lintasan}^2 + \text{tinggi penstock}^2} \quad (12)$$

Kecepatan air dalam penstock

$$V_p = 0,125 \sqrt{2 \times g \times h} \quad (13)$$

Diameter penstock

$$D = \sqrt{\frac{4Q_p}{V_p}} \quad (14)$$

Penampang penstock

$$A_p = \frac{Q_p}{V_p} \quad (15)$$

Ketebalan minimal penstock

$$t_{\min} = \frac{508 + D}{400} \quad (16)$$

dengan: V_p = kecepatan air dalam penstock (m/s), D = diameter penstock (m), A_p = penampang penstock (m^2), t_{\min} = tebal minimal penstock (mm).

Kehilangan energi pada saluran penstock

$$hf = f \times \left(\frac{L}{D}\right) \times \left(\frac{V^2}{2g}\right) \quad (17)$$

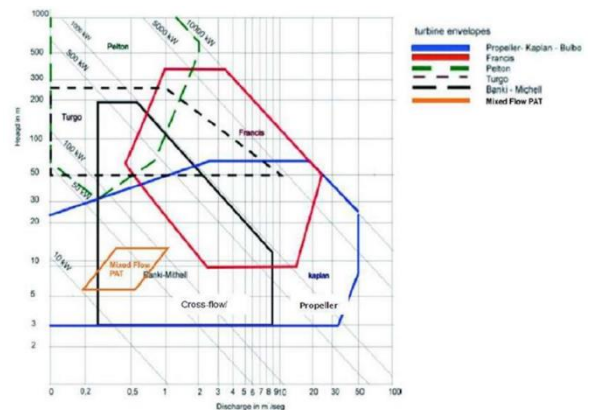
dengan: f = koefisien gesek pipa (0,21), L = panjang pipa (m), D = diameter pipa (m), V = kecepatan aliran (m/s), g = 9.81 m/s^2 (gravitasi).

Kehilangan energi akibat belokan dan sambungan penstock ditunjukkan pada persamaan (18).

$$hm = K \times (V^2/2g) \quad (18)$$

dengan: K_{total} = 3.1 (total koefisien kerugian), V = kecepatan aliran (m/s), g = gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$).

Pemilihan dan perencanaan turbin air ditentukan oleh berbagai faktor kritis, termasuk volume debit aliran air, head (tinggi jatuh air), kecepatan spesifik, kecepatan rotasi turbin, kecepatan perangkat yang digerakkan, orientasi poros turbin, dan biaya konstruksi instalasi. Di antara semua faktor ini, debit dan head aliran air menjadi parameter paling menentukan.



Gambar 2. Turbine application chart

Gambar 2 mengilustrasikan hubungan antara karakteristik turbin dengan tiga parameter utama: kecepatan aliran air, ketinggian (head), dan daya output.

Kecepatan spesifik adalah kecepatan putar turbin yang menghasilkan daya sebesar satuan daya pada tinggi terjun (H) satu satuan panjang. Kecepatan spesifik turbin dicari dengan menggunakan persamaan (19).

$$Ns = N \frac{Q^{0.5}}{H^{0.75}} \quad (19)$$

dengan : Ns = kecepatan spesifik (rpm), N = kecepatan putar turbin (rpm), Q = debit air (m^3/s), H = tinggi air jatuh net (m).

Besarnya debit yang dipakai sebagai debit rencana/ debit desain, bisa merupakan debit minimum dari maksimum, tergantung fungsi yang direncanakan PLTMH [10]. Besarnya daya yang dihasilkan ditunjukkan pada persamaan (20).

$$P = g \times Q \times \eta_t \times \eta_g \times H_{eff} \quad (20)$$

dengan : P = daya (kW), g = gravitasi (m/s^2), Q = debit air (m^3/s), η_t = efisiensi turbin (%), η_g = efisiensi generator (%), H_{eff} = head efektif (m).

Perhitungan nilai 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 (21).

$$\text{Produksi Energi per Tahun} = P_{\text{net}} \times 8.760 \times \text{PF} \quad (21)$$

dengan : P_{net} = daya bersih (kW), PF = faktor daya

Harga pokok produksi mencerminkan total biaya yang dibutuhkan untuk memproduksi energi dalam operasional pembangkit. Secara teori dapat dipergunakan persamaan (22).

$$HPP_{\text{per kWh}} = \frac{\text{Biaya Operasional Tahunan}}{\text{Produksi Energi Tahunan}} \quad (22)$$

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).

Payback period merupakan indikator yang menunjukkan durasi waktu yang diperlukan untuk mengembalikan biaya investasi awal. Payback period dapat dicari dengan persamaan (23).

$$\text{Payback Period} = \frac{\text{Biaya Investasi}}{\text{Arus kas bersih}} \times 1 \text{ tahun} \quad (23)$$

dengan: Investasi Awal (I_0) = Total pengeluaran modal untuk instalasi mikrohidro, Arus Kas Tahunan = Pendapatan bersih tahunan dari pembangkit listrik,

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 (24).

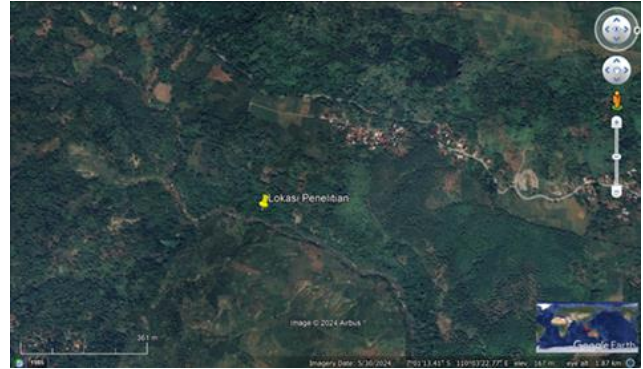
$$\text{NPV} = -I_0 + \sum [CF_t / (1+r)^t] \quad (24)$$

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), Σ = Penjumlahan selama masa proyek

Jika nilai NPV lebih besar dari nol ($\text{NPV} > 0$), investasi tersebut dinilai menguntungkan dan memberikan manfaat ekonomis, sehingga proyek layak untuk dilaksanakan. Jika nilai NPV kurang dari nol ($\text{NPV} < 0$), investasi tersebut tidak memberikan manfaat ekonomis dan berpotensi merugikan, sehingga proyek sebaiknya tidak dilanjutkan. Jika nilai NPV sama dengan nol ($\text{NPV} = 0$), investasi berada pada titik impas di mana tidak menghasilkan keuntungan maupun kerugian bagi perusahaan.

C. Lokasi Penelitian

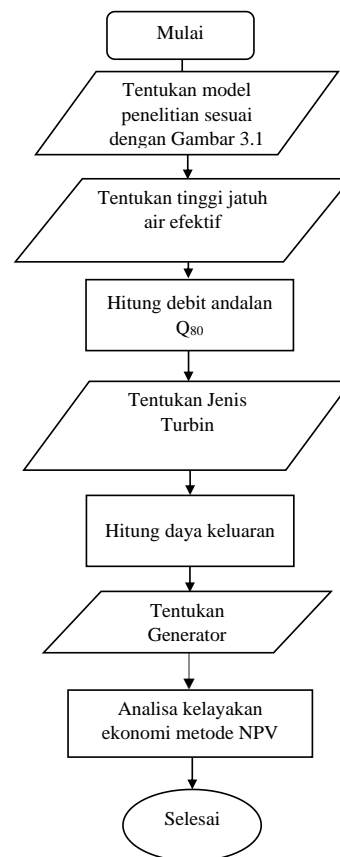
Penelitian potensi pembangkit listrik tenaga mikro hidro dilakukan pada Sungai Damar yang terletak di Desa Gebangan, Kecamatan Pageruyung, Kabupaten Kendal. Lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Lokasi Penelitian

D. Flowchart

Tahapan penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 3, sebagai rangkaian proses penelitian dari tahapan mulai sampai selesai.



Gambar 3. Flowchart Penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Debit air

Penelitian ini menggunakan data debit rata rata bulanan Sungai Damar selama 10 tahun dari 2010 sampai dengan 2020 yang diperoleh dari Badan Pusat Statistik (BPS) Kabupaten Kendal [16]. Pengurutan diperlukan sebagai bagian dari perhitungan debit andalan Q_{80} , di mana nilai Q_{80} dihitung menggunakan interpolasi pada posisi tertentu dalam urutan data yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Urutan debit rata rata 10 tahun

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	Agustus	1070,60
12	September	46,80

Perhitungan debit andalan Q_{80} dilakukan untuk menentukan debit air yang dapat diandalkan sepanjang tahun dengan probabilitas ketersediaan 80%. Debit andalan dapat dihitung menggunakan persamaan (1) dan interpolasi atau jika hasil berada di antara 2 data bisa hitung menggunakan persamaan (2).

Jumlah data (n) = 12 bulan

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

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: 1070.60 L/s

Interpolasi:

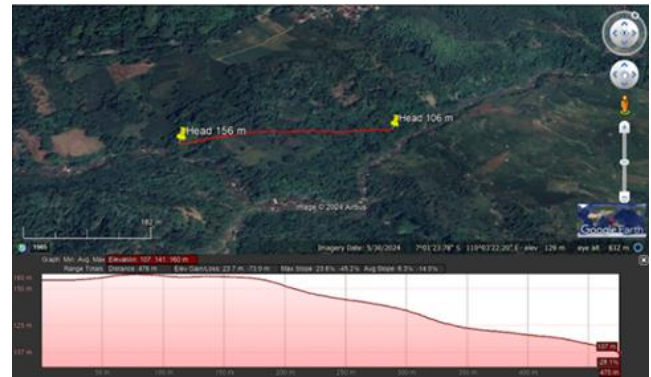
$$\begin{aligned}
 Q_{80} &= 1307.20 - \frac{10.4-10}{11-10} \times (1307.20-1070.60) \\
 &= 1307.20 - 94.64 \\
 &= 1212.56 \text{ L/s} \\
 &= 1.21256 \text{ m}^3/\text{s}
 \end{aligned}$$

Debit andalan Q_{80} sebesar 1.21256 m^3/s akan digunakan sebagai debit desain PLTMH karena mewakili ketersediaan air yang dapat diandalkan sepanjang tahun dengan probabilitas 80%.

B. Analisis Head (Tinggi Jatuh Air)

Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan Google Earth pada lokasi penelitian dan dapat dilihat pada Gambar 4., diperoleh data elevasi sebagai berikut:

Elevasi titik intake (tertinggi) : 156 mdpl
 Elevasi lokasi power house (terendah): 106 mdpl
 Head bruto : 50 meter



Gambar 4. Pengukuran Head

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 (14) dan kecepatan aliran sesuai dengan persamaan (15) serta diameter penstock sesuai dengan persamaan (16). Selanjutnya Head loss dapat dicari dengan persamaan (19) untuk major losses dan persamaan (20) untuk minor losses.

Panjang Total Pipa

Panjang lintasan horizontal: 276 meter

Tinggi vertikal : 50 meter

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

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

$$\begin{aligned}
 D &= \sqrt{((4 \times 1.21256)/(\pi \times 2.47))} \\
 &= 0.79 \text{ m} \approx 0.8 \text{ m (dibulatkan ke ukuran standar)}
 \end{aligned}$$

Kehilangan energi pada saluran pembawa (major losses).

$$\begin{aligned}
 h_f &= 0.0207 \times (280.5/0.8) \times (2.47^2/2 \times 9.81) \\
 &= 2.26 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Kehilangan energi akibat belokan dan sambungan (minor losses)

$$\begin{aligned}
 h_m &= 3.1 \times (2.47^2/2 \times 9.81) \\
 &= 0.96 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Hasil Akhir

$$h_{total} = h_f + h_m = 2.26 + 0.96 = 3.22 \text{ m}$$

$$\text{Head Efektif} = \text{Head Total} - h_{total}$$

$$= 50 - 3.22$$

$$= 46.78 \text{ m}$$

C. Pemilihan Turbin

Menentukan jenis turbin yang paling sesuai, dilakukan perhitungan kecepatan spesifik (N_s) menggunakan persamaan (21) dengan menggunakan putaran standar $N = 1500 \text{ rpm}$, maka kecepatan spesifik:

$$N_s = 1500 \times \frac{1.21256^{0.5}}{46.78^{0.75}}$$

$$N_s = 1500 \times \frac{1.101}{17,887}$$

$$N_s = 92,33 \text{ rpm}$$

Berdasarkan nilai kecepatan spesifik ($N_s = 92,33$) dan mengacu pada kriteria pemilihan turbin, maka Turbin Francis menjadi pilihan yang paling sesuai, 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%.

D. Perhitungan Potensi Daya

Persamaan dasar konversi energi air menjadi energi listrik dengan mempertimbangkan berbagai faktor efisiensi yang nilainya bergantung pada jenis turbin dan generator yang digunakan. Penelitian ini menggunakan 0,765. Perhitungan potensi daya menggunakan persamaan (21).

$$P = 1.21256 \times 9.81 \times 0.765 \times 46.78 \\ = 425.69 \text{ kW}$$

Hasil perhitungan potensi daya menunjukkan potensi daya yang cukup besar, yaitu 425.69 kW

E. Pemilihan Generator

Berdasarkan hasil perhitungan daya sebesar 425.69 kW, direkomendasikan spesifikasi generator:

Tipe = Generator sinkron 3 fase
Tegangan = 400V/230V
Frekuensi = 50 Hz
Putaran = 1500 rpm
Power factor (PF) = 0.8
Efisiensi = 90%
Kapasitas minimum generator
= $(425.69 \times 1.1) / 0.8$
= 585,32 kVA

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

F. Analisis Dimensi dan Tata Letak Komponen PLTMH

1. Intake

Perhitungan debit intake menggunakan faktor keamanan 120% untuk mengantisipasi kehilangan air. Sesuai dengan persamaan (3) dan persamaan (4):

$$Q_{\text{intake}} = 1,21256 \times 1,2 \\ = 1,45507 \text{ m}^3/\text{s}$$

Untuk menentukan dimensi pintu air, digunakan persamaan:

$$1,45507 = 0,8 \times b \times 1,5 \times \sqrt{(2 \times 9,8 \times 0,25)} \\ b = 2,2 \text{ meter}$$

2. Bak Pengendap

Volume bak pengendap dihitung menggunakan persamaan (5) dan persamaan (6):

$$V = 20 \times 1,45507 \\ = 29,1014 \text{ m}^3$$

Dengan mempertimbangkan rasio panjang:lebar=3:1, dimensi bak:

$$\text{Panjang} : 7,5 \text{ m} \\ \text{Lebar} : 2,5 \text{ m} \\ \text{Kedalaman} = 29,1014 / (7,5 \times 2,5) \\ = 1,55 \text{ m}$$

3. Saluran Pembawa

Perhitungan dimensi menggunakan persamaan (7) dan (8):

$$A = 1,21256 / 1,5 \\ = 0,808373 \text{ m}^2$$

Dengan lebar saluran 1,2 m, kedalamannya:

$$h = 0,808373 / 1,2 \\ = 0,67 \approx 0,7 \text{ m}$$

4. Bak Penenang

Volume bak penenang dihitung dengan persamaan (9):

$$V = 15 \times 1,21256 \\ = 18,1884 \text{ m}^3$$

Dimensi yang direkomendasikan:

$$\text{Panjang: 4 meter} \\ \text{Lebar: 3 meter} \\ \text{Kedalaman} = 18,1884 / (4 \times 3) \\ = 1,52 \approx 1,5 \text{ m}$$

5. Pipa Pesat

Perhitungan dimensi pipa pesat menggunakan persamaan (11) hingga (16).

Panjang pipa dihitung menggunakan teorema Pythagoras:

$$\text{Panjang total} = \sqrt{(\text{panjang horizontal}^2 + \text{tinggi}^2)} \\ = \sqrt{(276^2 + 50^2)} \\ = 280,5 \text{ m}$$

Kecepatan air dalam pipa:

$$V_p = 0,125 \sqrt{(2 \times 9,81 \times 50)} \\ = 2,47 \text{ m/s}$$

Diameter pipa:

$$D = \sqrt{((4 \times 1,21256) / (\pi \times 2,47))} \\ = 0,79 \text{ m} \approx 0,8 \text{ m}$$

Ketebalan minimal pipa:

$$t_{\text{min}} = (508 + 800) / 400 \\ = 3,27 \text{ mm (4 mm untuk faktor keamanan)}$$

G. Analisis Ekonomi

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. Tabel 2 menunjukkan total investasi.

Tabel 2. Total Investasi Awal

Komponen Biaya	Jumlah (Rp)
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
Total Investasi Awal	10.949.212.500

Biaya operasional dan maintenance tahunan diasumsikan 3% dari biaya total investasi [14], sehingga:

$$\text{Biaya O\&M} = 3\% \times \text{Rp } 10.949.212.500 \\ \text{Biaya O\&M} = \text{Rp } 328.476.375 \text{ per tahun}$$

2. Perhitungan Produksi Energi Tahunan

Jam operasional menggunakan 8.040 jam atau kurang lebih 335 hari karena pada bulan September mengalami penyusutan debit air dapat dihitung menggunakan persamaan (21).

$$P_{net} = 425,69 \text{ kW}$$

$$t = 8.040 \text{ jam (waktu operasi per tahun)}$$

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

$$\begin{aligned} \text{Produksi Energi per Tahun} &= 425,69 \times 8.040 \times 0,8 \\ &= 2.736.435,84 \text{ kWh} \end{aligned}$$

3. Perhitungan Harga Pokok Produksi

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) dan hitung menggunakan persamaan (22).

$$\begin{aligned} \text{Pendapatan per tahun} &= 2.736.435,84 \text{ kWh} \times \text{Rp } 1.310 \\ &= \text{Rp } 3.584.730.950 \end{aligned}$$

Perhitungan Harga Pokok Produksi:

$$\begin{aligned} \text{HPP per kWh} &= \text{Biaya Operasional Tahunan} / \text{Produksi Energi Tahunan} \\ &= \text{Rp } 328.476.375 / 2.736.435,84 \\ &= \text{Rp } 120,04/\text{kWh} \end{aligned}$$

4. Perhitungan Payback Period

Payback period adalah salah satu indikator kelayakan ekonomi yang penting untuk mengetahui berapa lama investasi awal dapat kembali melalui arus kas bersih tahunan dapat dihitung menggunakan persamaan (23).

$$\begin{aligned} \text{Arus kas bersih tahunan} &= \text{Pendapatan} - \text{Biaya operasional} \\ &= \text{Rp } 3.584.730.950 - \text{Rp } 328.476.375 \\ &= \text{Rp } 3.256.254.575 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} PP &= (\text{Biaya Investasi} / \text{Arus kas bersih}) \times 1 \text{ tahun} \\ &= (\text{Rp } 10.949.212.500 / \text{Rp } 3.256.254.575) \times 1 \text{ tahun} \\ &= 3,36 \text{ tahun} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan payback periods ini menunjukkan bahwa waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan seluruh biaya investasi awal PLTMH Sungai Damar adalah 3,36 tahun.

5. Analisis NPV

NPV digunakan untuk menentukan apakah proyek ini menghasilkan nilai bersih yang positif dan dihitung menggunakan persamaan (25). Asumsi tingkat diskonto = 10% dan periode analisis = 20 tahun, maka:

$$NPV = -10.949.212.500 + \sum [3.256.254.575 / (1+0,1)^i]$$

Perhitungan Nilai Sekarang per Tahun:

$$\begin{aligned} \text{Tahun 1: } &3.256.254.575 / (1+0,1)^1 = 2.960.231.432 \\ \text{Tahun 2: } &3.256.254.575 / (1+0,1)^2 = 2.691.119.484 \\ \text{Tahun 3: } &3.256.254.575 / (1+0,1)^3 = 2.446.472.258 \\ \text{Tahun 4: } &3.256.254.575 / (1+0,1)^4 = 2.224.065.689 \\ \text{Tahun 5: } &3.256.254.575 / (1+0,1)^5 = 2.021.877.899 \end{aligned}$$

Total Nilai Sekarang:

$$\sum \text{Present Value} = 28.812.453.825$$

Hasil Akhir NPV:

$$NPV = -10.949.212.500 + 28.812.453.825$$

$$NPV = \text{Rp } 17.863.241.325$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai NPV proyek adalah Rp 17.863.241.325. 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.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan terhadap potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) di Sungai Damar, Kecamatan Pageruyung, Kabupaten Kendal, dapat disimpulkan bahwa:

- Berdasarkan analisis debit dan head, Sungai Damar memiliki debit andalan Q80 sebesar 1,21256 m³/s dengan head efektif 46,78 meter, menghasilkan potensi daya terbangkitkan mencapai 425,69 kW.
- Berdasarkan analisis teknis dengan parameter kecepatan spesifik (Ns) sebesar 92,33 rpm, pemilihan turbin Francis dengan generator sinkron 630 kVA merupakan konfigurasi optimal untuk kondisi hidrolik yang tersedia, dengan kemampuan produksi energi tahunan mencapai 2.736.435,84 kWh.
- Hasil analisis ekonomi menunjukkan prospek investasi yang menjanjikan dengan total investasi awal Rp 10.949.212.500, periode pengembalian modal (payback period) selama 3,36 tahun, dan nilai Net Present Value (NPV) yang positif sebesar Rp 17.863.241.325 untuk periode analisis 20 tahun dengan tingkat diskonto 10%.

REFERENSI

- [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. Prasetyo, and W. H. Purnomo, "Studi Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (Pltmh) Di Aliran Sungai Desa Kejawan Banyumas Study Of The Potential A Micro Hydro Power Plant In The River Kejawan 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 Sambas," 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