



Pengembangan PLTMH dengan Model Multipowerhouse (MPH) untuk Optimalisasi Air Buangan Turbin PLTMH Garassik di Sungai Garassik Kab. Enrekang

Muhammad Khaidir^{1*}, Fadhli Rahman², Syahrul Mustafa³

¹Program Studi Teknik Elektro, Universitas Islam Makassar, Indonesia

²Program Studi Teknik Mesin, Universitas Islam Makassar, Indonesia

³Program Studi Teknik Listrik, Politeknik Bosowa Makassar, Indonesia

*Email : muh_khaidir.dty@uim-makassar.ac.id

Abstract: The Garassik Micro-Hydro Power Plant in Panassang Village, Enrekang Regency, with an installed capacity of 3.7 kW, experiences an energy deficit due to the community's electricity demand of 390.74 kWh per day. Despite its efficient operation, the plant generates a maximum of only 88.8 kWh per day, underscoring the need for capacity enhancement. This study explores the potential of utilizing turbine wastewater as an energy source by designing a Multi Powerhouse (MPH) Micro-Hydro Power Plant to optimize water energy usage. The proposed MPH system evaluates water energy potential, determines optimal powerhouse placements for effective head height, and calculates total power output. Unlike the single-powerhouse model, the MPH system addresses water flow limitations, particularly during periods of reduced flow, significantly improving total power output to 160.235 kW, a 171% increase. Key advantages of the MPH model include better utilization of turbine wastewater, enhanced operational flexibility, and improved water energy efficiency. Using a descriptive quantitative research method, this study begins with a location survey to collect turbine wastewater characteristics, followed by mathematical modeling for analysis. Results reveal output flow rates of 0.189 m³/s, 0.187 m³/s, and 0.185 m³/s across three powerhouses, with effective head heights of 24.782 m, 29.725 m, and 34.729 m, respectively. The system uses Crossflow turbines, ideal for medium heads and moderate flow rates. Economic analysis indicates an NPV of IDR 2.400.000.000,- an IRR of 14%, and a BCR of 2.5, with a payback period of 5.45 years, making the project financially viable and sustainable.

Keywords: Micro Hydro Power Plant (PLTMH); Multi Powerhouse (MPH); turbine waste water; renewable energy.

1. PENDAHULUAN

Sebaran potensi energi baru terbarukan (EBT) terbesar di Indonesia terdapat di desa, dengan energi air sebagai salah satu potensi yang paling menarik untuk dikembangkan (Praditya Tampubolon, 2019). Desa-desa di Indonesia memiliki sumber daya air yang melimpah, memberikan peluang besar sekaligus tantangan dalam pengembangan pembangkit listrik tenaga air (PLTA) skala kecil, seperti pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) (Khaidir et al., 2022). PLTMH merupakan pembangkit listrik berskala kecil yang memanfaatkan air sebagai sumber penggerak turbin, dengan prinsip kerja melibatkan reservoir untuk menampung atau membelokkan air dari aliran sungai (Mardiyanto et al., 2023). Air tersebut dialirkan melalui pipa penstock menuju powerhouse, dimana turbin memutar generator untuk menghasilkan energi listrik (Marliansyah et al., 2018). Meskipun demikian, efisiensi operasi PLTMH sangat tergantung pada volume air yang tersedia dan factor-faktor eksternal seperti musim

kemarau yang mengurangi debit air dapat menambah kinerja sistem (Irvan Siswanto *et al.*, 2023).

Sebagai contoh, pada PLTMH Garassik di Sungai Garassik, Desa Tallu Bamba, Kabupaten enrekang, beroperasi dengan kapasitas 5 kW untuk melayani kebutuhan listrik 78 kepala keluarga. Meskipun mendukung kebutuhan penerangan malam hari, PLTMH ini sering menghadapi kendala kurangnya debit air, terutama saat musim kemarau, yang berdampak pada penurunan output daya listrik. Fenomena ini menyoroti perlunya desain inovatif untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi air dan mengoptimalkan kapasitas daya.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mencoba untuk mengatasi masalah ini. Shenglian Guo *dkk.*, menawarkan desain integrasi antar waduk untuk optimalisasi volume air, namun solusi ini memerlukan biaya operasional tinggi yang tidak terlalu efisien untuk skala kecil (Guo *et al.*, 2009). Phouthavanh Soracchampa *dkk.*, meneliti model penjadwalan aliran air waduk, namun pendekatan ini masih menghadapi kendala penurunan pasokan air selama musim kemarau dan sedimentasi tanah (Sorachampa *et al.*, 2020). Papadakis C. Nikolaos, *dkk.* mengusulkan model PLTA pompa untuk efisiensi air, namun sistem ini memerlukan konsumsi listrik yang besar untuk pengoperasian pompa, yang tidak cocok untuk skala mikrohidro (Nikolaos *et al.*, 2023).

Berdasarkan tinjauan terhadap berbagai pendekatan yang telah ada, masih terdapat celah signifikan dalam pengembangan sistem PLTMH yang efisien untuk desa dengan masalah berkurangnya debit air, terutama pada musim kemarau. Sementara banyak solusi berfokus pada peningkatan kapasitas waduk atau penggunaan pompa yang memerlukan konsumsi listrik besar, dan juga belum ada solusi yang dapat mengatasi masalah efisiensi operasional dengan memanfaatkan energi air buangan turbin dalam sistem PLTMH. Selain itu, pendekatan yang ada umumnya memiliki biaya operasional yang tinggi atau memerlukan peralatan tambahan yang kurang sesuai untuk skala kecil.

Penelitian ini menawarkan desain PLTMH Multipowerhouse (MPH) sebagai solusi efektif untuk memanfaatkan energi air buangan turbin. Desain ini bertujuan untuk meningkatkan kapasitas daya pembangkit, mengurangi dampak lingkungan, dan memastikan keberlanjutan energi lokal tanpa memerlukan biaya operasional yang tinggi atau konsumsi energi tambahan. Dengan pendekatan ini, diharapkan dapat meningkatkan efisiensi dan daya tanggap sistem terhadap fluktuasi debit air.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahapan Penelitian

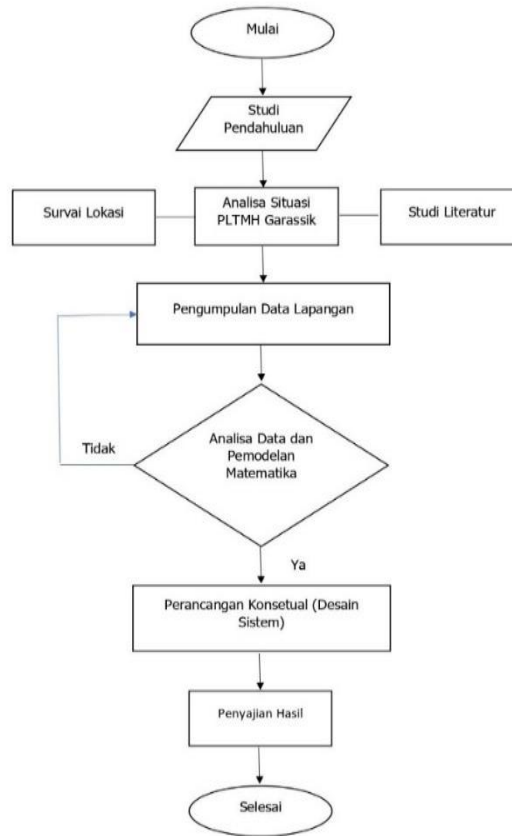
Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif karena tahapannya dianggap cocok dengan permasalahan yang diteliti. Berikut adalah tahapan penelitian yang telah dan akan diteliti :

1. Tahapan awal yang telah dilakukan dalam penelitian ini adalah studi pendahuluan yaitu survey Lokasi dan analisis situasi terkait permasalahan yang terjadi, selanjutnya menganalisis data dan informasi terkait sungai Garassik termasuk karakteristik aliran

air, topografi, dan kondisi lingkungan. Dilanjutkan dengan studi literatur terkait permasalahan dan mencari solusi hingga ditemukan sebuah model yang dianggap mampu mengatasi permasalahan tersebut untuk mengoptimalkan pemanfaatan energi air dan meningkatkan kapasitas produksi energi listrik di PLTMH sungai Garassik.

2. Tahap kedua adalah tahapan yang akan dilaksanakan untuk memperoleh desain PLTMH Multipowerhouse (MPH) dengan tahapan sebagai berikut :
 - a. Pengumpulan Data Lapangan ;
 - Melakukan survei lapangan di Sungai Garassik untuk mengumpulkan data tentang debit air, tinggi jatuh (head), dan karakteristik aliran air lainnya.
 - Mengidentifikasi lokasi potensial untuk pembangunan PLTMH Multipowerhouse berdasarkan data lapangan dan ketersediaan infrastruktur.
 - b. Analisa data dan Permodelan Matematika ;
 - Menghitung dan mengembangkan model matematika untuk memprediksi kinerja PLTMH Multipowerhouse berdasarkan variabel-variabel yang relevan dari data lapangan yang didapatkan, seperti debit air, head air, dan efisiensi turbin. Model ini digunakan untuk mengoptimalkan desain sistem dan memprediksi output listrik yang dihasilkan.
 - Metode validasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah validasi silang terhadap data debit air dan head yang diperoleh melalui simulasi dengan data aktual dari lokasi. Hasil perhitungan matematis dibandingkan dengan data pengukuran langsung untuk mengevaluasi tingkat akurasi model
 - c. Perancangan Konseptual (Desain Sistem) ;
 - Mengembangkan rancangan konseptual PLTMH Multipowerhouse berdasarkan data lapangan, studi literatur, hasil Analisa data dan permodelan matematis.
 - Pemilihan parameter seperti jenis dan diameter pipa, panjang pipa, efisiensi sistem, dan spesifikasi turbin dilakukan berdasarkan studi literatur dan ketersediaan material lokal. Asumsi-asumsi dalam model, seperti efisiensi turbin sebesar 98% dan kecepatan aliran konstan, dipilih untuk memastikan desain sistem tetap realistis dan dapat diimplementasikan sesuai dengan kondisi di lapangan
 - Memilih jenis turbin, kapasitas sistem, dan komponen peralatan lainnya sesuai dengan karakteristik aliran air Sungai Garassik.
 - d. Penyajian Data Hasil ;
 - Merangkum dan menyajikan hasil analisis dalam bentuk grafik, tabel, dan diagram untuk memberikan gambaran yang jelas dan komprehensif tentang kinerja dan desain PLTMH Multipowerhouse

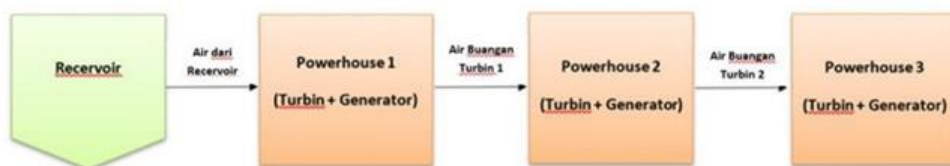
Tahapan penelitian dapat dilihat pada flowchart berikut :



Gambar 1. Tahapan Analisa dan Desain Penelitian

2.2 Model Desain Sistem

PLTMH Model Multipowerhouse merupakan model yang peneliti tawarkan untuk memanfaatkan air buangan turbin, dimana prosesnya adalah air buangan turbin dari powerhouse 1 dialirkan menuju powerhouse ke 2 untuk memutar turbin 2, dan selanjutnya air buangan turbin powerhouse 2 dialirkan menuju powerhouse ke 3 untuk memutar turbin 3, dan berlanjut ke powerhouse berikutnya. Pada penelitian ini, dibatasi sampai 3 powerhouse. Dengan tawaran model ini, peneliti akan mengidentifikasi dan menganalisis karakteristik sungai Garassik Desa Kab. Enrekang sebagai lokasi penelitian untuk mengetahui kelayakan desain model PLTMH Multipowerhouse. Berikut adalah diagram blok gambaran desain model yang ditawarkan



Gambar 2. Diagram Blok Desain Model PLTMH MPH

2.3 Formulasi Sistem

2.3.1 Head Pada Setiap Powerhouse

Penentuan head pada desain PLTMH Multipowerhouse (MPH) didasarkan pada perbedaan elevasi titik aliran air. Head 1 (H_1) dihitung dari reservoir ke powerhouse 1, Head 2 (H_2) dari powerhouse 1 ke powerhouse 2, dan Head 3 (H_3) dari powerhouse 2 ke powerhouse 3.

$$\begin{aligned} H_1 &= \text{Tinggi jatuh air dari reservoir ke powerhouse 1} \\ H_2 &= \text{Tinggi jatuh air dari powerhouse 1 ke powerhouse 2} \\ H_3 &= \text{Tinggi jatuh air dari powerhouse 2 ke powerhouse 3} \end{aligned}$$

Formulasi H_{eff} , dipengaruhi oleh adanya kehilangan head (H_{loss}) dengan formulasi sebagai berikut :

$$H_{eff} = H_{pengukuran} - H_{lossPH}$$

Dalam sistem aliran air melalui pipa penstock, kehilangan head (H_{loss}) memengaruhi perubahan debit air yang masuk ke turbin. Kehilangan head terjadi akibat gesekan, turbulensi, atau perubahan jalur aliran, yang dipengaruhi oleh panjang (L) dan diameter pipa (D), kecepatan aliran (v), serta koefisien gesekan (f). Kehilangan ini mengurangi energi fluida yang tersedia, sehingga memengaruhi efisiensi sistem dan kinerja turbin. Metode Darcy-Weisbach digunakan untuk menghitung H_{loss} , yang kemudian dihubungkan dengan perubahan debit menggunakan hukum kontinuitas aliran fluida (Feng et al., 2024). Hukum ini menyatakan bahwa debit (Q) dalam aliran tertutup tetap konstan selama tidak ada kebocoran, bergantung pada kecepatan aliran (v) dan luas penampang (A) pipa sesuai rumus :

$$Q = v \cdot A$$

Prinsip hidrodinamika dengan rumus Darcy-Weisbach :

$$H_{loss,n} = f \cdot \frac{L_n}{D_n} \cdot \frac{(v_n)^2}{2g}$$

Dimana kecepatan aliran (V) dihitung dari debit(Q) dan luas penampang (A) pipa:

$$\begin{aligned} A &= \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \\ v &= \frac{Q}{A} \end{aligned}$$

Substitusi $v = Q/A$ ke dalam rumus kehilangan head sehingga :

$$H_{loss,n} = f \cdot \frac{L_n}{D_n} \cdot \frac{(Q_n/A_n)^2}{2g}$$

Maka :

$$H_{loss,n} = f \cdot \frac{L_n}{D_n} \cdot \frac{4v_n^2}{\pi^2 \cdot D_n^5 \cdot 2g}$$

Deangan demikian H_{loss} berbanding lurus dengan kuadran debit (Q^2)

$$H_{loss} \propto Q^2$$

2.3.2 Debit Air keluaran Powerhouse

Debit air untuk setiap powerhouse dapat di formulasikan sebagai berikut :

$$Q_n = Q_{in} \sum_{i=1}^{n-1} Q_{loss}$$

Penentuan kehilangan debit air (Q_{loss}) pada Powerhouse 1, dan 2 perlu mempertimbangkan aliran air dari satu powerhouse ke powerhouse berikutnya, serta factor-faktor yang mempengaruhinya, yaitu Panjang pipa (L), diameter pipa (D), koefisien gesekan (f), kecepatan aliran (v), perubahan head (H_{loss}) akibat system pipa dan diameter yang digunakan. Berikut adalah formulasi perhitungan dalam penentuan debit keluaran (Q_{out}) untu setiap powerhouse. Menghitung debit air keluaran powerhouse 1, 2 dan 3. Kehilangan debit (Q_{loss}) secara empiris dapat dihubungkan dengan kehilangan head (H_{loss}) melalui formulasi berikut :

$$Q_{loss,PH} = Q_{in} \cdot \frac{H_{loss}}{H_{ukur}}$$

$$Q_{out,PH} = Q_{in} - Q_{loss,PH}$$

2.3.3 Daya Total

Untuk menghitung daya listrik pada PLTMH dengan model multipowerhouse yang terdiri dari 3 powerhouse, peneliti menggunakan pendekatan berbasis daya total yang dihasilkan oleh masing-masing powerhouse. Setiap powerhouse 109yst memiliki debit air (Q), head (H), dan efisiensi sustem (η). Selanjutnya daya listrik total dihitung dengan menjumlahkan daya yang dihasilkan oleh masing-masing powerhouse. Berikut adalah formulasi output daya PLTMH Multipowerhouse (Bhandari, 2023) :

$$P_{Total} = \sum_{i=1}^3 \eta_i \cdot \rho \cdot Q_i \cdot H_i$$

P_{Total} = Daya listrik total yang dihasilkan oleh tiga powerhouse (Watt)

η_i = Efisiensi powerhouse ke- i (untuk $i=1,2,3$)

ρ = Massa jenis air (kg/m^3), biasanya 1000 kg/m^3

g = Percepatan gravitasi (m/s^2), biasanya 9.81

Q_i = Debit air melalui powerhouse ke- i (m^3/s)

H_i = Head air untuk powerhouse ke- i (m)

2.3.4 Analisa kelayakan Ekonomi

Perhitungan kelayakan ekonomi PLTMH MPH merupakan salah satu aspek krusial yang mendasari implementasi kelayakan sistem PLTMH MPH. Berikut adalah formulasi yang di gunakan dalam penentuan kelayakan ekonomi desain PLTMH MPH (Dwi Damarian et al., 2023) :

A. Net Present Value (NPV)

NPV merupakan nilai sekarang dari manfaat proyek dikurangi biaya proyek, dengan mempertimbangkan faktor diskonto. NPV positif menunjukkan bahwa proyek menghasilkan keuntungan lebih besar dari pada biaya, sehingga layak untuk dilaksanakan. Forumulasinya sebagai berikut :

$$\sum_{t=1}^n \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} - C_0$$

Keterangan : B_t = Manfaatn (benefit) tahunan pada tahun ke- t

C_t = Biaya tahunan per tarif ke- t

r = Suku bunga diskon (%)

n = Umur proyek (tahun)

C_0 = Biaya infestasi awal

B. Internal Rate Of Return (IRR)

IRR merupakan tingkat diskonto (r) dimana NPV proyek sama dengan nol. IRR menggambarkan tingkat pengembalian internal proyek, dan proyek dianggap layak jika IRR lebih besar dari pada suku bunga atau tingkat diskonto yang berlaku, dengan formulasi berikut :

$$NPV = 0$$

C. Pay Back Perio (PBP)

PBP adalah waktu yang diperlukan untuk mengembalikan investasi awal proyek dari manfaat bersih tahunan. Semakin pendek BPP, semakin cepat investasi kembali dan proyek dinggap lebih menarik. Formulasinya sebagai berikut :

$$PBP = \frac{\text{Ivestasi Awal}}{\text{Manfaat Tahunan Bersih}}$$

D. Benefit Cost Ratio (BCR)

BCR merupakan rasio antara manfaat total proyek dan biaya total proyek. BCR lebih besar dari 1 menunjukkan bahwa manfaat proyek lebih besar dari pada biayanya, sehingga proyek layak secara ekonomi, dengan formulasi berikut :

$$\frac{\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Profil PLTMH Garassik

PTMH Garassik memanfaatkan aliras sungai Garassik terletak di Dusun Panassang, Desa Tallu Bamba, Kecamatan Enrekang, Kabupaten Enrekang, Provinsi Sulawesi

Selatan. Berdasarkan data BPS Kab. Enrekang tahun 2024, wilayah ini memiliki jumlah penduduk sekitar 399 jiwa dengan 83 rumah tangga (KK) (BPS Kabupaten Enrekang, 2024) yang saat ini menggunakan sumber energi listrik dari Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dengan daya terpasang masing-masing rumah sebesar 450 Watt. Namun, daya tersedia dari PLTMH sebesar 3,7 kW masih belum mencukupi kebutuhan energi masyarakat karena pemakaian energi listrik melebihi kapasitas yang tersedia di setiap rumah. Berikut adalah profil data PLTMH Garassik:

Tabel 1. Profil PLTMH Garassik

No	Data	Keterangan
1	Kapasitas Daya Terpasang	3,7 kW
2	Daya Min/Maks Generator	Min 3,6 kW – Maks 5 kW
3	Turbin	Cross Flow
4	Debit Air Masukan (Q_{in})	0,191 m ³ /detik
5	Head (Tinggi Jatuh Air)	25 m
6	Panjang Pipa Penstock	40 m
7	Diameter/Ketebalan Pipa Penstock	16 inch/5,6 mm
8	Volume Reservoir	2,86 m ³ /detik



Gambar 3. Kondisi Generator AC Sinkron dan Reservoir PLTMH Garassik

3.2 Kebutuhan Energi Listrik Masyarakat

Kebutuhan energi listrik harian dihitung berdasarkan konsumsi rata-rata per rumah. Rincian lebih lanjut mengenai kebutuhan energi listrik (Watt-hour) warga Dusun Panassang disajikan dalam table 3 berikut:

Tabel 2. Kebutuhan Energi Listrik Warga Dusun Panassang

No	Jenis Beban	Daya (watt)	Jumlah Unit (Buah)	Waktu Operasi per hari (Jam)	Konsumsi Energi (Wh)
1	Lampu LED	15	166	12	29.880
2	Lampu LED	20	94	12	22.560
3	Lampu LED	35	97	12	40.740
4	Lampu Pijar	5	160	24	19.200
5	TV	120	78	6	56.160

No	Jenis Beban	Daya (watt)	Jumlah Unit (Buah)	Waktu Operasi per hari (Jam)	Konsumsi Energi (Wh)
6	Kulkas	100	64	24	153.600
7	Setrika	350	47	1	16.450
8	Rice cooker	350	59	1	20.650
9	Dispenser	75	42	10	31.500
Total Konsumsi Energi Listrik					390.740

Analisis konsumsi energi dan daya pembangkit menunjukkan bahwa total energi yang dikonsumsi sebesar 390.740 Wh atau setara dengan 390,74 kWh. Energi ini menunjukkan jumlah keseluruhan yang digunakan dalam sistem selama periode tertentu. Di sisi lain, daya pembangkit yang tersedia memiliki kapasitas 3,7 kW. Jika diasumsikan pembangkit ini beroperasi secara terus-menerus selama 24 jam penuh, maka energi maksimum yang dapat dihasilkan oleh pembangkit dalam sehari adalah sebesar 88,8 kWh. Namun, konsumsi energi yang jauh lebih besar dari kapasitas ini menunjukkan bahwa pembangkit tidak dapat sepenuhnya memenuhi kebutuhan tersebut hanya dengan kapasitas yang ada. Oleh karena itu, dapat diasumsikan bahwa energi tambahan dipenuhi dari sumber daya lainnya, atau terdapat kesalahan dalam asumsi operasi pembangkit selama 24 jam.

3.3 Head Setiap Powerhouse

Penentuan head dihitung dengan melakukan pengukuran situasional (kontur) menggunakan alat ukur teodolit atau total station, selang ukur, dan roll meter. Nilai head setiap powerhouse dapat dilihat dalam table berikut :

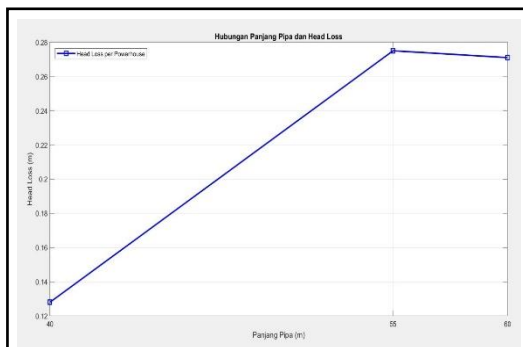
Tabel 3. Hasil Pengukuran Langsung Head

No	Lokasi	Head
1	Powerhouse 1 (PH1)	25 meter
2	Powerhouse 2 (PH2)	30 meter
3	Powerhouse 3 (PH3)	18 meter

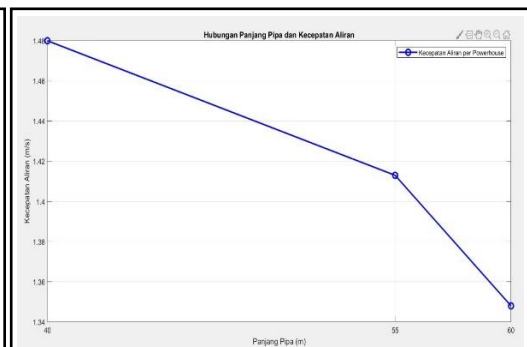
Nilai head di atas mengalami perubahan akibat kehilangan head (H_{loss}) yang terjadi selama aliran air melalui pipa penstock menuju powerhouse. Kehilangan ini disebabkan oleh gesekan, turbulensi, dan hambatan dalam sistem, yang memengaruhi efisiensi serta daya yang dihasilkan. Kehilangan head (H_{loss}) dihitung menggunakan rumus Darcy-Weisbach dan hukum kontinuitas fluida dengan hasil sebagai berikut :

Tabel 4. Hasil Perhitungan Kehilangan head (H_{loss}) dan Head Efektif (H_{effPH})

No	Lokasi	H_{ukur}	Panjang pipa (L)	D (inchi)	A (m^2)	V m/s	H_{lossPH} (m)	H_{effPH} (m)
1.	PH1	25	40	16'	0.129	1.48	0.218	24,782
2.	PH2	30	55	16'	0.129	1.413	0.275	29,725
3.	PH3	35	60	16'	0.129	1.348	0.271	34,729



Gambar 4. Hubungan antara panjang pipa dan kehilangan head



Gambar 5. Hubungan panjang pipa dan kecepatan aliran fluida

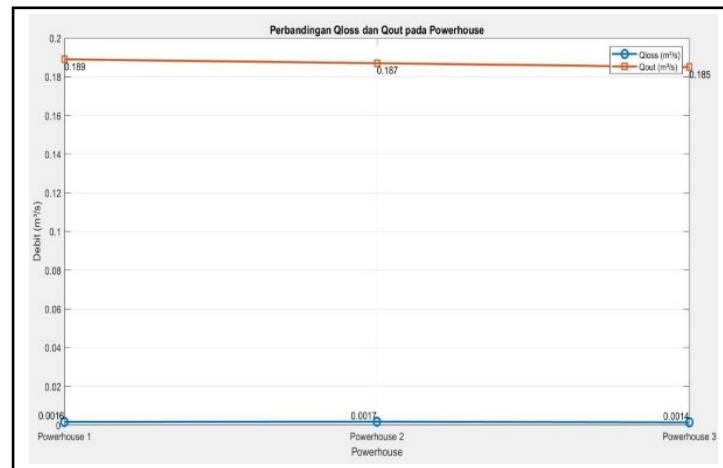
Gambar 4 menunjukkan hubungan antara panjang pipa dan kehilangan head (H_{loss}). Terlihat bahwa kehilangan head meningkat seiring bertambahnya panjang pipa, mengikuti pola linear. Hal ini menggambarkan bahwa semakin panjang pipa, gesekan fluida dengan dinding pipa semakin besar, sehingga energi yang hilang dalam bentuk head loss juga bertambah. Selanjutnya grafik pada Gambar 5 menunjukkan hubungan antara panjang pipa (L) dan kecepatan aliran fluida (V). Terlihat bahwa kecepatan cenderung menurun seiring bertambahnya panjang pipa. Hal ini disebabkan oleh peningkatan gesekan internal pada fluida dan dinding pipa, yang mengurangi energi kinetik fluida, sehingga kecepatan aliran menurun.

3.4 Debit Pada Setiap Powerhouse

Penentuan debit keluaran pada setiap powerhouse dilakukan dengan menggunakan perhitungan debit air berdasarkan metode *continuity equation* (kontinuitas aliran). Debit air pada setiap powerhouse dipengaruhi oleh penurunan kecepatan aliran yang terjadi akibat bertambahnya panjang pipa penstock. Selain itu, faktor-faktor lain yang memengaruhi meliputi diameter pipa, material dan kekasaran permukaan pipa, serta gradien elevasi antara sumber air dan powerhouse. Kondisi tersebut menyebabkan kehilangan energi aliran yang berdampak langsung pada debit keluaran dan efisiensi operasional setiap powerhouse. Kehilangan energi tersebut, juga berkaitan dengan kehilangan head, di mana penurunan head efektif mengakibatkan pengurangan daya yang dapat dihasilkan oleh turbin. Berikut disajikan formulasi hasil perhitungan kehilangan debit dan debit keluaran pada setiap powerhouse :

Tabel 5. Hasil perhitungan kehilangan debit dan debit keluaran

No	Lokasi	H_{ukur}	H_{loss}	A	V	Q_{inPH}	Q_{LossPH}	Q_{outPH}
1	PH1	25	0.218	0.129	1.48	0,191	0,0016	0,189
2	PH2	30	0.275	0.129	1.413	0,189	0,0017	0,187
3	PH3	35	0.271	0.129	1.348	0,187	0,0014	0,185



Gambar 6. Grafik Hubungan Q_{LossPH} dan Q_{lossPh}

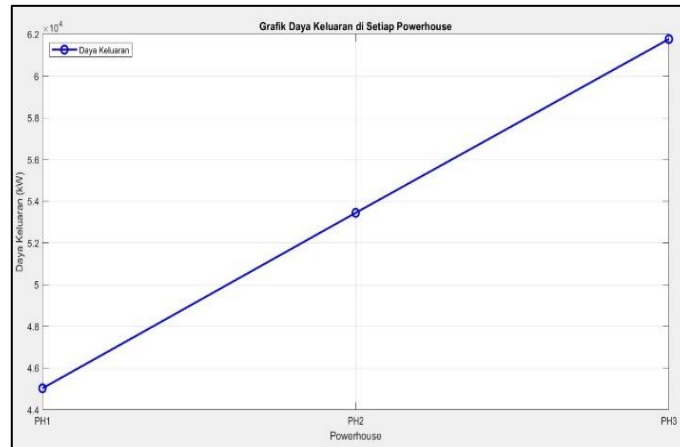
Berdasarkan Tabel 5 dan Gambar 6 di atas, terlihat kehilangan debit di setiap powerhouse disebabkan oleh faktor-faktor seperti gesekan di dalam pipa dan konversi energi dalam sistem. Debit keluar (Q_{lossPh}) di setiap powerhouse juga berkurang seiring berjalannya aliran fluida, dengan nilai 0,189 m³/s untuk Powerhouse 1, 0,187 m³/s untuk Powerhouse 2, dan 0,185 m³/s untuk Powerhouse 3. Meskipun nilai kehilangan debit sangat kecil, penurunan yang terus-menerus ini menunjukkan adanya efek kumulatif dari gesekan dan hambatan dalam sistem pipa terhadap aliran fluida. Secara keseluruhan, meskipun kehilangan debit relatif kecil, tetap ada dampak yang tercermin dalam penurunan debit keluar di setiap tahap

3.5 Daya PLTMH Model Multipowerhouse

Daya total PLTMH Multipowerhouse dihitung dengan menentukan output daya dari setiap powerhouse. Jumlah dari output daya masing-masing powerhouse tersebut merupakan daya total sistem. Perhitungan menggunakan metode formulasi daya pada PLTMH, dan Parameter yang digunakan adalah η (efisiensi system), ρ (densitas air), g (percepatan gravitasi), Q (debit aliran air), dan H (tinggi jatuh air/head). Jumlah dari semua daya yang dihasilkan oleh powerhouse tersebut memberikan daya total sistem. Berikut adalah hasil perhitungannya :

Tabel 6. Tabel Hasil Perhitungan Daya

No	Lokasi	ρ (kg/m ³)	g	H_{effPH} (m)	Q_{ouPh} (m ³ /s)	η_{Ph} (%)	P_{outPh} (kW)
1	Powerhouse 1	1000	9,8	24,782	0,189	98	45,029
2	Powerhouse 1	1000	9,8	29,725	0,187	98	53,439
3	Powerhouse 1	1000	9,8	34,729	0,185	98	61,767
Daya Total PLTMH Multipowerhouse							160,235

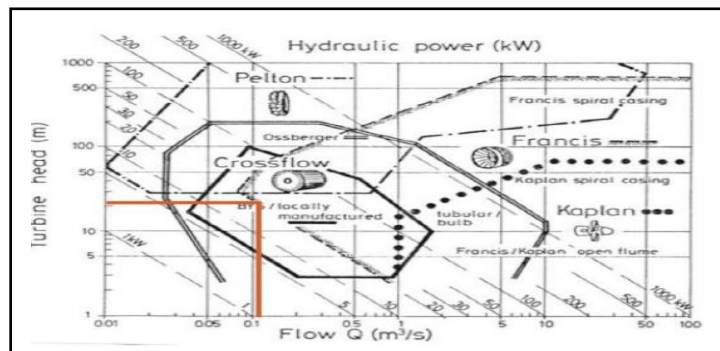


Gambar 7. Daya Powerhouse

Pada Gambar 7 dan Tabel 6, terlihat perbedaan signifikan dalam daya yang dihasilkan oleh ketiga powerhouse. Powerhouse 1 menghasilkan daya terendah, yaitu 45,029 kW, karena debit aliran air dan tinggi jatuh (head) yang lebih rendah dibandingkan unit lainnya. Powerhouse 2 menghasilkan daya 53,439 kW, menunjukkan bahwa peningkatan head dan debit secara optimal dapat meningkatkan daya. Powerhouse 3 mencatat daya tertinggi sebesar 61,767 kW, berkat pemanfaatan head dan debit yang lebih besar. Dengan total daya gabungan 160,235 kW dan efisiensi sistem 98%, sistem PLTMH Multipowerhouse dirancang untuk memaksimalkan potensi energi air secara optimal.

3.6 Penentuan Jenis Turbin

Pemilihan jenis turbin sangat dipengaruhi oleh kombinasi head dan debit yang tersedia di lokasi. Dari grafik pada Gambar 8 dibawah ini, dan berdasarkan perhitungan head setiap powerhouse pada desain PLTMH MPH berada pada rentang 24 sampai 34 meter dan debit air rata-rata powerhouse 0.187 m³/s, maka turbin Crossflow bisa menjadi pilihan yang tepat karena dapat beroperasi secara efisien pada head menengah dan debit sedang. Berikut grafik penentuan jenis-jenis turbin dan spesifikasi yang biasanya digunakan pada PLTMH :



Gambar 8. Grafik Penentuan Jenis Turbin

3.7 Kelayakan Ekonomis

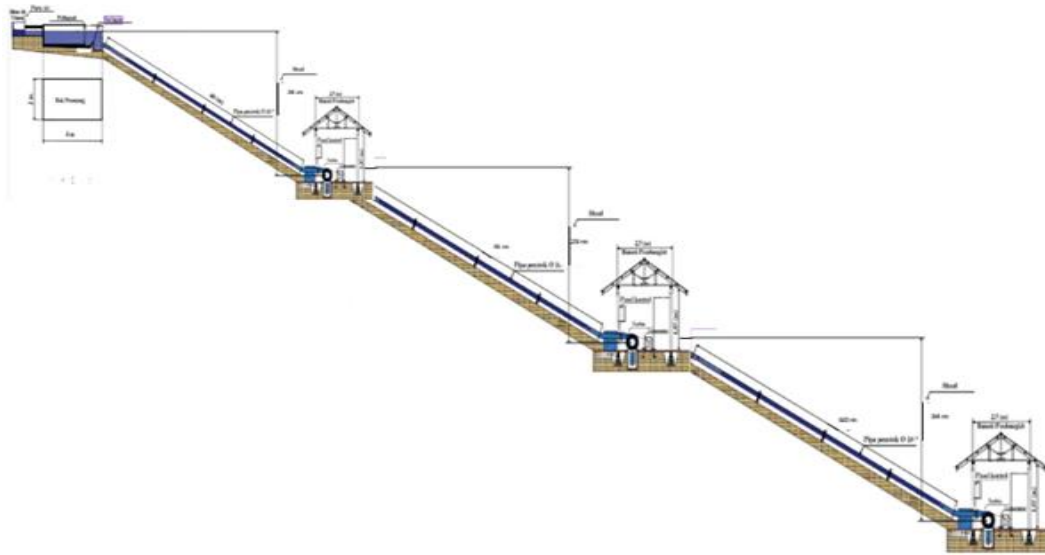
Pemilihan parameter dan asumsi dalam perhitungan kelayakan ekonomi PLTMH Multipowerhouse (MPH) didasarkan pada kondisi teknis dan kebutuhan local. Biaya investasi awal sebesar Rp 3.000.000.000,-, mencakup pengadaan komponen utama seperti turbin crossflow, generator sinkron, dan pipa penstock yang dipilih karena efisiensi dan ketersediannya dipasar. Biaya operasional tahunan sebesar Rp 50.000.000,- diasumsikan mencakup pemeliharaan rutin, inspeksi dan perbaikan ringan. Manfaat tahunan sebesar Rp 600.000.000,-, dihitung berdasarkan potensi penghematan energi masyarakat dan pendapatan dari surplus listrik dengan asumsi tarif Rp 1.000/kWh. Suku bunga diskonto sebesar 10% dipilih sebagai standar umum proyek energi terbarukan di Indonesia. Periode proyek selama 20 tahun didasarkan pada umur teknis komponen utama, dengan asumsi inflasi dan harga listrik stabil. Asumsi ini dibuat konservatif untuk memastikan hasil perhitungan tetap relevan meskipun ada fluktuasi kecil dalam kondisi aktual. Berikut adalah hasil perhitungan NPV, IRR, PBP, dan BCR :

Tabel 7. Hasil perhitungan kelayakan ekonomis

No	Parameter	Nilai	Keterangan
1	Biaya investasi awal (C_0)	Rp 3.000.000.000	Total biaya awal untuk pembangunan PLTMH MPH
2	Biaya operasional tahunan (C_1)	Rp 50.000.000	Biaya rutin per tahun untuk biaya pemeliharaan dan operasional sistem
3	Manfaat Tahunan (B_t)	Rp 600.000.000	Pendapatan dari biaya penghematan energi dan dan penjualan surplus listrik
4	Suku bunga diskonto (r)	10%	Tingkat suku Bunga yang digunakan untuk menghitung nilai sekarang
5	Umur proyek	20 tahun	Periode proyek dihitung berdasarkan umur teknis sistem
6	VPV	Rp 2.400.000.000	Nilai bersih proyek setelah dikurangkan biaya investasi awal, menunjukkan proyek menguntungkan
7	IRR	14%	Tingkat pemberian internal, lebih besar dari suku bunga diskonto (10%), proyek layak
8	PBP	5,45 Tahun	Waktu yang dibutuhkan untuk pembelian inverstasi awal, lebih pendek dari umur proyek
9	BCR	2,5	Rasion manfaat terhadap biaya menunjukkan proyek layak secara ekonomis.

3.8 Desain Model PLTMH Multipowerhouse (MPH)

Desain Model PLTMH MPH dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 9. Desain Model PLTMH Multipowerhouse (MPH)

4. KESIMPULAN

PLTMH Garassik dengan daya terpasang 3,7 kW tidak dapat memenuhi kebutuhan energi masyarakat sebesar 390,74 kWh per hari, mengakibatkan defisit energi. Meskipun efisiensinya tinggi, daya maksimum yang dihasilkan hanya 88,8 kWh per hari, sehingga perlu peningkatan kapasitas pembangkit. Model multipowerhouse dengan total daya 160,235 kW dan efisiensi 98% terbukti dapat mengatasi defisit energi serta mendukung stabilitas jaringan listrik lokal. Analisis kelayakan ekonomi menunjukkan proyek ini menguntungkan dengan NPV IDR 2,4 miliar, IRR 14%, BCR 2,5, dan PBP 5,45 tahun. Rekomendasi untuk implementasi meliputi pengadaan material yang efisien dan pelatihan teknis untuk operator lokal. Penelitian lanjutan dapat berfokus pada pengembangan model multipowerhouse skala besar serta integrasi dengan energi terbarukan lainnya.

REFERENSI

- Bhandari, S. R. (2023). A Comprehensive Study of Micro Hydro Plant and its Potential: A Case Study: Studi Komprehensif Pembangkit Mikro Hidro dan Potensinya: Studi Kasus. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and ...*, 3(June), 18–28. <https://journal.irpi.or.id/index.php/ijeere/article/view/478>
- BPS Kabupaten Enrekang. (2024). Catalogue: 1102001.7316. *Kabupaten Enrekang Dalam Angka 2024*, 49. <https://enrekangkab.bps.go.id/publikasi.html>
- Dwi Damarian, K., Dwi Giriantari, I. A., & Jati, I. K. (2023). Studi Kelayakan Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (Pltmh) Di Sungai Yeh Dikis Banjar Lebah Kabupaten Tabanan. *Jurnal SPEKTRUM*, 10(2), 26.

<https://doi.org/10.24843/spektrum.2023.v10.i02.p4>

- Feng, D. Q., Fan, J. J., Wang, W. J., Xia, C. X., & Li, A. (2024). New formula of vegetation roughness height and Darcy–Weisbach friction factor in channel flow. *Journal of Hydrology*, 636(May). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131278>
- Guo, S., Li, X., Liu, P., & Guo, F. (2009). Optimal operation of cascade hydropower plants. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC, April*. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2009.4918570>
- Irvan Siswanto, Artoto Arkundato, Lutfi Rohman, & Bowo Eko Cahyono. (2023). Electric Power Analysis and System Optimization of Micro-Hydro Power Plants at the Sentool Plantation, Jember. *Jurnal Inovasi Sains Dan Teknologi Untuk Masyarakat*, 1(1), 8–22. <https://doi.org/10.19184/instem.v1i1.360>
- Khaidir, M., Mustafa, S., & Irvawansyah, I. (2022). Analisis Potensi Tenaga Air Pada Sungai Tabang Di Dusun Nating. Desa Sawitto, Kecamatan Bungin, Kabupaten Enrekang. *Joule (Journal of Electrical Engineering)*, 3(1), 144–153. <https://doi.org/10.61141/joule.v3i1.238>
- Mardiyanto, I. R., Raharjo, J., Utami, S., Mursanto, W. B., & Rahardjo, A. H. (2023). An Improvement in Power Quality and By-Product of the Run-Off River Micro Hydro Power Plant. *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering*, 120(6), 1295–1305. <https://doi.org/10.32604/ee.2023.027756>
- Marliansyah, R., Putri, D. N., Khootama, A., & Hermansyah, H. (2018). Optimization potential analysis of micro-hydro power plant (MHPP) from river with low head. *Energy Procedia*, 153, 74–79. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.10.021>
- Nikolaos, P. C., Marios, F., & Dimitris, K. (2023). A Review of Pumped Hydro Storage Systems. *Energies*, 16(11). <https://doi.org/10.3390/en16114516>
- Praditya Tampubolon, A. C. A. (2019). Laporan Status Energi Bersih Indonesia. *Iesr*, 1–23. www.iesr.or.id
- Sorachampa, P., Tippayawong, N., & Ngamsanroj, K. (2020). Optimizing multiple reservoir system operation for maximum hydroelectric power generation. *Energy Reports*, 6, 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.11.043>