

STUDI PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO DI WADUK TUKUL KABUPATEN PACITAN

Tami Pratiwi¹, Pitojo Tri Juwono²

¹Mahasiswa Program Sarjana Teknik Pengairan Universitas Brawijaya

²Dosen Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya Malang

Jalan MT. Haryono 167 Malang 65145 Indonesia

¹email: tamipratiwi@gmail.com

ABSTRAK: Pembangunan Waduk Tukul yang terletak di Desa Karanggede, Kecamatan Arjosari, Kabupaten Pacitan. Waduk Tukul memiliki fungsi sebagai kebutuhan air baku sebesar 300 liter/ detik. Kebutuhan air baku pada Kabupaten Pacitan sebesar 120liter/orang/hari. Maka air baku pada Waduk Tukul mampu melayani 216.000 orang. Selain itu, pada tahap kedua Waduk Tukul juga dimanfaatkan sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro. Kebutuhan listrik pada Kab. Pacitan masih belum terpenuhi, sekitar 32% dari penduduk Pacitan tidak mendapatkan listrik. Ada sekitar 2000 KK yang belum mendapatkan listrik. Walaupun, hal ini telah didukung dengan Pembangkit Listrik Tenaga Udara kebutuhan ini masih belum terpenuhi. Pada studi ini didapatkan nilai debit outflow sebesar 1 m³/ dt sebagai dasar perencanaan untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro pada Waduk Tukul, Pacitan. Dengan tinggi jatuh pada perencanaan ini sebesar 60,12 meter. Pipa pesat yang digunakan pada perencanaan pembangkit listrik tenaga mikrohidro Waduk tukul diameter 0,70 meter berbahan weilded steel dan panjang 214,82 meter. Turbin yang digunakan di lapangan adalah turbin francis. Daya yang dihasilkan pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Waduk Tukul adalah 2 x 0,227 MW. Dalam perhitungan analisa kelayakan ekonomi pada studi ini meliputi BCR, NPV, IRR, Analisa sesnsitivitas dan Payback Periode. Nilai dari parameter tersebut adalah sebagai berikut BCR = 1,25, NPV = Rp 9.088.552.693,94, IRR = 10,21%, dan Payback Periode = 16 tahun.

Kata Kunci: PLTMH, Waduk, Turbin Francis, Daya Listrik, Kelayakan Ekonomi

ABSTRACT: Construction of Tukul Reservoir located in Karanggede Village, Arjosari District, Pacitan Regency. Tukul Reservoir has a function as raw water requirement of 300 liters / sec. Raw water needs in Pacitan Regency are 120 liters / person / day. So the raw water in Tukul Reservoir is able to serve 216.000 people. In addition, in the second phase the Tukul Reservoir is also used as a Micro-hydro Power Plant. Electricity needs in Kab. Pacitan is still not met, around 32% of Pacitan residents do not get electricity. There were around 2000 families who had not received electricity. Although, this has been supported by the Air Power Plant this need is still not met. In this study, the value of outflow discharge is 1 m³ / sec as a basis for planning for Microhydro Power Plant in Tukul Reservoir, Pacitan. With a head gross in this plan amounting to 60.12 meters. Penstock used in micro hydro power plant planning Reservoir tukul diameter 0.70 meters made of weilded steel and length 214.82 meters. The turbine used in the field is the French turbine. The power generated at the Tukul Tube Micro Hydro Power Plant is 2 x 0.227 MW. In the calculation of economic feasibility analysis in this study include BCR, NPV, IRR, sensitivity analysis and payback period. The values of these parameters are as follows BCR = 1.25, NPV = Rp. 9,088,552,693.94, IRR = 10.21%, and Payback Period = 16 years

Keywords: MHPP, Reservoir, Francis Turbine, Electric Power, Economic Feasibility

PENDAHULUAN

Air merupakan sumber daya alam yang memiliki peranan penting bagi seluruh makhluk hidup. Tanpa air proses dalam kehidupan tidak dapat berlangsung baik untuk manusia, tumbuhan dan hewan. Di Indonesia, hak masyarakat terhadap penggunaan air dijamin melalui Undang – Undang Dasar Negara Republik Indonesia. Air merupakan sumber daya yang harus dijaga dan dimanfaatkan secara optimum untuk keberlangsungan hidup, keberadaan air merupakan hal yang vital dalam aspek kehidupan. Keberadaan ini dapat dimanfaatkan sebagai kebutuhan pangan, irigasi, domestik serta sumber daya energi yang ramah lingkungan.

Sumber daya energi ramah lingkungan harus dikembangkan guna mengurangi penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi untuk aktifitas manusia. Pengurangan ini bermanfaat agar membentuk rosot efek rumah kaca dibumi. Efek rumah kaca memiliki dampak besar dalam kehidupan makhluk hidup, Dalam hal ini pemanfaatan air dapat dikembangkan menjadi pembangkit listrik tenaga air yang merupakan pemanfaatan energi ramah lingkungan untuk bumi. Oleh karena itu pendayagunaan air ini memberikan nilai yang sangat positif dalam segi lingkungan dan ekonomi.

Pada tahun 2014, Kebutuhan listrik pada Kab. Pacitan masih belum terpenuhi, sekitar 32% dari penduduk Pacitan tidak mendapatkan listrik. Ada sekitar 2000 KK yang belum mendapatkan listrik. Walaupun, hal ini telah didukung dengan PLTU yang ada dipacitan namun kebutuhan ini masih belum terpenuhi. Pada tahun 2016 sempat terjadi penurunan kapasitas dari PLTU di Pacitan yang berdampak pada pemadaman listrik bergilir. Sampai saat ini tetap tidak mampu memenuhi kebutuhan listrik pada Kabupaten Pacitan.

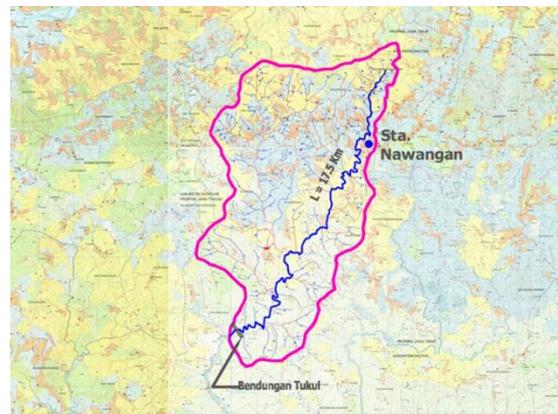
Pembangunan Waduk Tukul yang terletak di Desa Karanggede, Kecamatan Arjosari, Kabupaten Pacitan. Waduk Tukul memiliki fungsi utama sebagai kebutuhan air baku sebesar 300 liter/ detik. Kabupaten Pacitan termasuk kota besar maka kebutuhan air baku pada daerah tersebut sebesar 120liter/orang/hari. Maka air baku pada Waduk Tukul mampu melayani 216.000 orang. Selain itu, Waduk Tukul juga dimanfaatkan sebagai Pembangkit Listri

Tenaga Mikrohidro dengan rencana awal yaitu 2 x 0,127 Megawatt.

Tujuan dari studi ini adalah untuk mengetahui seberapa besar potensi energi yang ada dengan memanfaatkan potensi air yang ada di pada Bendungan Tukul sebagai PLTMH, agar dapat menghasilkan energi listrik guna penambahan energi listrik masyarakat di wilayah tersebut. Selain itu, juga sebagai sumber energi alternatif lain yang dapat menggantikan energi saat ini yang menggunakan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui.

METODOLOGI

Lokasi Studi



Gambar 1. Peta Lokasi Studi

Secara geografis Waduk Tukul dibangun dengan memanfaatkan Sungai Telu yang terletak di Desa Karanggede, Kecamatan Arjosari, Kabupaten Pacitan. Luas DAS Telu adalah 47,80 Km². Dengan panjang sungai 17,50 Km.

Data yang Diperlukan

Dalam studi ini diperlukan data-data yang mendukung guna memudahkan dalam menganalisa dari permasalahan yang ada, maka diperlukan beberapa data sebagai berikut:

1. Data Bendungan Tukul
2. Data topografi
3. Data klimatologi
4. Data hujan

Langkah – Langkah Studi

Tahap perencanaan PLTMH di Desa Sanankerto Kecamatan Turen Kabupaten Malang sebagai berikut:

1. Melakukan Analisa Hidrologi
 - a. Melakukan Uji Homogenitas Data
Metode yang digunakan adalah Metode RAPS (*Rescaled Adjusted Partial Sum*), guna mengetahui

- tingkat homogenitas data karena tidak semua data mengandung keakurasian dan ketelitian.
- b. Melakukan Uji Abnormalitas Data
Metode yang digunakan adalah *Inlier-Outlier*. Tujuan dari uji ini adalah untuk mengetahui bisa atau tidaknya data diperoleh untuk digunakan.
 - c. Menghitung Evaporasi potensial dengan metode Penman
 - d. Menghitung debit andalan dengan metode F.J. Mock, dan Tahun Dasar Perencanaan.
2. Melakukan perhitungan untuk pola operasi waduk
 3. Melakukan perhitungan untuk dimensi bangunan seperti pipa pesat (*penstock*) yaitu menghitung tebal, panjang dan diameter pipa pesat.
 4. Menentukan tinggi jatuh efektif.
 5. Menentukan turbin yang digunakan.
 6. Menghitung Analisa Kelayakan Ekonomi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisa Hidrologi

Data hujan yang digunakan harus diuji kualitas data (data tersebut homogen atau tidak), maka diperlukan adanya uji homogenitas data, yang dalam pembahasan ini menggunakan metode RAPS (*Rescaled Adjusted Partial Sums*). Berdasarkan hasil dari pengujian RAPS diketahui bahwa data yang digunakan untuk kajian studi ini bersifat homogen / konsisten.

Data yang telah konsisten kemudian perlu diuji lagi dengan uji abnormalitas. Uji ini digunakan untuk mengetahui apakah data maksimum dan minimum dari rangkaian data yang ada layak atau tidak. Uji yang digunakan adalah uji *Inlier-Outlier*. Dimana data yang menyimpang dari dua batas ambang, yaitu ambang bawah (XL) dan ambang atas (XH) akan dihilangkan. Dalam perhitungan studi ini diperoleh nilai batas ambang atas (XH) sebesar 137,02 dan nilai batas ambang bawah (XL) sebesar 37,58, karena data hujan yang diuji masih berada dalam nilai batas ambang atas dan nilai batas ambang bawah maka data hujan yang ada dapat digunakan secara keseluruhan.

Analisa Debit Andalan

Dalam perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro ini, dikarenakan minimalnya data maka metode perhitungan debit pembangkitan menggunakan metode

simulasi perimbangan air dari Dr. F.J. Mock, yang didahului dengan perhitungan Evapotranspirasi Potensial. Sedangkan untuk pemilihan debit andalan yang nantinya akan dijadikan debit pembangkit metode yang digunakan dalam perencanaan ini adalah dengan menggunakan Metode Bulan Dasar Perencanaan.

Evapotranspirasi

Evapotranspirasi potensial terjadi apabila tersedia cukup air untuk memenuhi pertumbuhan optimum. Evapotranspirasi potensial merupakan salah satu faktor yang digunakan dalam perhitungan pembangkitan data curah hujan menjadi data debit dengan metode F.J. Mock. Perhitungan evapotranspirasi potensial pada studi ini menggunakan metode Penman.

Tabel 1. Hasil Perhitungan Evapotranspirasi

No	Bulan	Et ₀ (mm)
1	Januari	3.846
2	Febuari	3.607
3	Maret	3.339
4	April	3.236
5	Mei	2.840
6	Juni	2.486
7	Juli	2.668
8	Agustus	2.917
9	September	3.387
10	Oktober	3.408
11	November	3.404
12	Desember	3.326

Sumber : Hasil Perhitungan (2018)

Metode F.J. Mock

Metode simulasi F.J. Mock ini menganggap bahwa hujan yang jatuh pada Daerah Aliran Sungai (catchment area) sebagian akan hilang sebagai evapotranspirasi, sebagian akan langsung menjadi limpasan permukaan (direct run off) dan sebagian lagi akan masuk ke dalam tanah (infiltrasi). Dalam metode ini terdapat dua prinsip pendekatan perhitungan aliran permukaan yang terjadi di sungai, yaitu neraca air di atas permukaan tanah dan neraca air bawah tanah yang semua berdasarkan hujan, iklim dan kondisi tanah.

Bulan Dasar Perencanaan

Metode yang digunakan dalam perencanaan ini adalah dengan menggunakan Metode Basic Month atau Metode Bulan Dasar Perencanaan. Data diurutkan dari debit

yang terbesar ke debit yang terkecil kemudian digunakan persamaan berikut untuk mendapatkan nilai keandalan dari tiap debit. Keandalan yang digunakan pada studi ini adalah :

1. Debit air cukup (26,02%)
2. Debit air normal (50,68%)
3. Debit air rendah (75,34%)
4. Debit air kering (97,34%)

Simulasi Waduk

Simulasi waduk ini bertujuan untuk menentukan debit pembangkit PLTMH, mengontrol debit yang tersedia dalam tampungan waduk apakah bisa memenuhi kebutuhan PLTMH, dan apakah debit yang keluar dari PLTMH dan yang keluar dari pelimpah (spillway) dapat ditampung oleh sungai di bagian hilir dari Bendungan Tukul ini.

Pada keempat simulasi yang direncanakan didapatkan debit rencana sebesar 1 m³/detik, serta perkiraan headloss sebesar 10% dari tinggi jatuh kotor. Maka diperkirakan akan mendapatkan daya sebesar

$$\begin{aligned} \text{Debit} &= 1 \text{ m}^3/\text{detik} \\ \text{Head gross} &= 60,12 \text{ m} \\ \text{Headloss} &= 10\% \text{ Tinggi jatuh kotor} \\ &= 6,12 \text{ m} \\ \text{Head Effective} &= 60,12 - 6,12 \\ &= 54,00 \\ \text{Daya} &= 9,81 \times \eta \times Q \times H_{\text{eff}} \\ &= 9,81 \times 0,80 \times 1,00 \times 54,00 \\ &= 424,606 \text{ kW} \end{aligned}$$

Tenaga Air dengan kapasitas paling tinggi 10 MW (sepuluh megawatt) harus mampu beroperasi dengan faktor kapasitas (capacity factor) paling sedikit sebesar 65% (enam puluh lima persen. Nilai kapasitas faktor pada keempat simulasi operasi waduk pada Bendungan Tukul adalah sebagai berikut,

$$\begin{aligned} \text{Debit Air Cukup } 26,02\% \\ \text{Daya PLTMH} &= 424 \text{ kW} \\ \text{Rerata Energi Tahunan} &= 257.134,14 \\ \text{Kapasitas faktor} &= \frac{\text{Rerata Energi Tahunan}}{\text{Energi Maksimum}} \\ &= \frac{257.134,14}{315.907,354} \\ &= 81,40\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Debit Air Normal } 50,68\% \\ \text{Daya PLTMH} &= 424 \text{ kW} \\ \text{Rerata Energi Tahunan} &= 220.756,15 \\ \text{Kapasitas faktor} &= \frac{\text{Rerata Energi Tahunan}}{\text{Energi Maksimum}} \\ &= \frac{220.756,15}{315.907,354} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 69,88\% \\ \text{Debit Air Rendah } 75,30\% \\ \text{Daya PLTMH} &= 424 \text{ kW} \\ \text{Rerata Energi Tahunan} &= 166.379,45 \\ \text{Kapasitas faktor} &= \frac{\text{Rerata Energi Tahunan}}{\text{Energi Maksimum}} \\ &= \frac{166.379,45}{315.907,354} \\ &= 52,67\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Debit Musim Kering } 97,34\% \\ \text{Daya PLTMH} &= 424 \text{ kW} \\ \text{Rerata Energi Tahunan} &= 103,545.93 \\ \text{Kapasitas faktor} &= \frac{\text{Rerata Energi Tahunan}}{\text{Energi Maksimum}} \\ &= \frac{103,545.93}{301,648.54} \\ &= 34,33\% \end{aligned}$$

Dengan melihat nilai kapasitas faktor serta energi rerata tahunan dan daya yang dibangkitkan oleh PLTMH Bendungan Tukul sementara ini dinilai layak beroperasi secara teknis pada keandalan debit air cukup dan debit air normal.

Bangunan Pengambilan

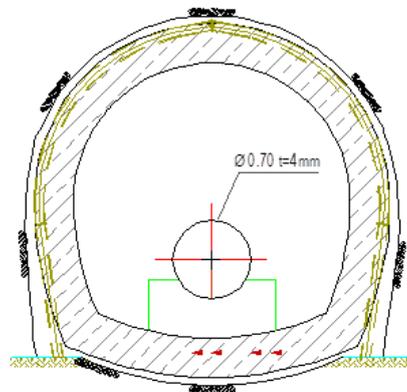
Bangunan pengambilan pada studi ini menggunakan tipe sandar

Data yang diketahui sebagai berikut :

Elevasi Pintu Pengambilan 1	= +175,90
Elevasi Pintu Pengambilan 2	= +165,00
Debit Rencana	= 1 m ³ /dt
Lebar saluran	= 1 meter
Kemiringan saluran (direncanakan)	= 0,025
Koefisien kekasaran (n) (beton)	= 0,017
Bentuk penampang (direncanakan)	= segi empat

Bangunan pengambilan untuk studi ini memanfaatkan bangunan pengambilan yang telah ada pada Bendungan Tukul.

Pipa Pesat (Penstock)



Gambar 2. Pipa Pesat (penstock)

Dalam penentuan diameter pipa pesat akan digunakan perhitungan dari European Standard Hydropower Association (ESHA). Adapun parameter-parameter untuk merencanakan pipa pesat berdasarkan rumus empiris yang digunakan yaitu debit pembangkitan, tinggi jatuh efektif (digunakan tinggi jatuh kotor), panjang saluran dan juga kekasaran material pipa. Parameter-parameter tersebut sebagai berikut :

Debit rencana (Q) = 1,00 m³/dt
 Tinggi Jatuh (H) = 60,12 meter
 Kekasaran pipa (n) = 0.012
 Panjang pipa pesat (L) = 214,82 meter

Adapun perhitungan diameter pipa pesat sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Diameter} &= 2,69 \left(\frac{n^2 Q^2 L}{H} \right)^{0,1875} \\ &= 2,69 \left(\frac{0,012^2 \cdot 1,00^2 \cdot 214,82}{60,12} \right)^{0,1875} \\ &= 0,650 \text{ m} \approx 0,70 \text{ meter} \end{aligned}$$

Adapun perhitungan ketebalan pipa pesat sebagai berikut :

Dari hasil perhitungan sebelumnya, total tekanan hidrostatik adalah H+(Δp (+)), sehingga didapatkan nilai ketinggian 60,12+0.007 = 60,127 meter. Sehingga tekanan hidrostatik sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Tekanan Hidrostatik,} \\ &= P_o + p_{hg} \\ &= 60120 + 1000 \times 60,12 \times 9.81 \\ &= 649951,97 \text{ N/m}^2 \\ &= 0,00065 \text{ kN/mm}^2 \end{aligned}$$

Parameter yang dibutuhkan pada perhitungan ketebalan pipa adalah tegangan tarik ijin yaitu 0.137 kN/mm² (pipa baja) dan efisiensi pengelasan sebesar 1,0 (hasil pengelasan diperiksa dengan tegangan yang cukup). Sehingga, perhitungan ketebalan pipa adalah sebagai berikut

$$\begin{aligned} \text{Tebal pipa,} \\ &= \frac{P \times d}{2 \times \sigma_f \times K_f} + e_s \\ &= \frac{0,00065 \times 0,75}{2 \times 0,137 \times 1} + 2 \\ &= 3,660 \text{ mm} \approx 4 \text{ mm} \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan maka tebal baja direncanakan 4,00 mm

Minimum Operation Level

Menurut ESHA terdapat beberapa persamaan dalam menghitung ketinggian air minimum sebelum pipa pesat.

$$\begin{aligned} \text{Knauss} &= D \cdot 1 + 2,3 \cdot \frac{V}{\sqrt{g \cdot D}} \\ &= 0,70 \cdot 1 + 2,3 \cdot \frac{1,819}{\sqrt{9,81 \cdot 1}} \end{aligned}$$

$$= 1,818$$

$$\begin{aligned} \text{Nagarkar} &= 4,4 (V \cdot D^{0,50})^{0,54} \\ &= 4,4 \cdot (1,819 \cdot 0,70^{0,50})^{0,54} \\ &= 11,262 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Rohan} &= 1,474 \cdot V^{0,48} \cdot D^{0,76} \\ &= 1,474 \cdot 1,819^{0,48} \cdot 0,70^{0,76} \\ &= 1,498 \end{aligned}$$

Diambil hasil perhitungan dari Rohan yang memiliki nilai paling kecil, sehingga didapat kedalaman tampungan waduk efektif lebih besar. Maka MOL terdapat pada elevasi:
 MOL = El. Dasar intake + H Intake + Ht
 = 175,90 + 1 + 1,498
 = 178,398

Kehilangan Tinggi Tekan

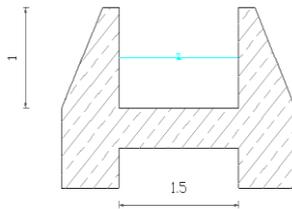
Dalam pembangkit listrik tenaga mikrohidro, daya bersih yang dihasilkan akan didapat setelah didapatkannya nilai tinggi jatuh bersih. Tinggi jatuh bersih adalah tinggi jatuh yang telah dikurangi dengan kehilangan tinggi yang terjadi pada alur PLTMH, mulai dari masuknya air dari bangunan pengambilan sampai dengan muka air pada tailrace.

Bedasarkan perhitungan kehilangan tinggi, berikut ini adalah rekapitulasi kehilangan tinggi sebelum pipa pesat dan setelah pipa pesat ditampilkan pada tabel berikut ini.

Tabel 2. Kehilangan Tinggi Tekan PLTMH Waduk Tukul

No	Keterangan	Kehilangan Tinggi Tekan
1	Kehilangan pada intake	0.013
2	Kehilangan pada trashrack	0.553
3	Kehilangan pada pemasukan pipa pesat	0.186
4	Kehilangan Akibat belokan 1	0.133
5	Kehilangan Akibat belokan 2	0.133
6	Kehilangan Akibat belokan 3	0.133
7	Kehilangan akibat gesekan	0.848
8	kehilangan akibat keluaran pipa	0.200
Total		2.197

Saluran Pembuang (Tail Race)



Gambar 3. Saluran Pembuang (Tailrace)

Saluran pembuang akan mengalirkan aliran air yang semula digunakan untuk pembangkitan listrik menuju ke sungai. Pada studi ini penampang saluran yang digunakan adalah persegi sama seperti pada saluran pengarah. Adapun perencanaan dimensi saluran pembuang sebagai berikut.

- Debit Rencana = 1,00 m³/dt
- Lebar saluran = 1,50 meter
- Kemiringan saluran = 0,002 (direncanakan)
- Koefisien kekasaran = 0,017 (beton)
- Bentuk penampang = segi empat (direncanakan)

Dengan cara coba-coba, berdasarkan dimensi saluran pembuang yang direncanakan didapatkan tinggi muka air 0,546 meter

Debit (Q)

$$\begin{aligned}
 Q &= 1,00 = \frac{1}{n} A R^{2/3} S^{1/2} \\
 &= \frac{1}{0,017} (b \cdot h) \left(\frac{b \cdot h}{b + 2h} \right)^{2/3} S^{1/2} \\
 &= \frac{1}{0,017} (1,50 \cdot h) \left(\frac{1,50 \cdot h}{1,50 + 2h} \right)^{2/3} 0,0020^{1/2} \\
 &= h = 0,546 \text{ meter (coba-coba)}
 \end{aligned}$$

Tinggi Saluran

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{3} x h + h \\
 &= \frac{1}{3} x 0,546 + 0,546 \\
 &= 0,728 \text{ meter} \sim 1 \text{ m}
 \end{aligned}$$

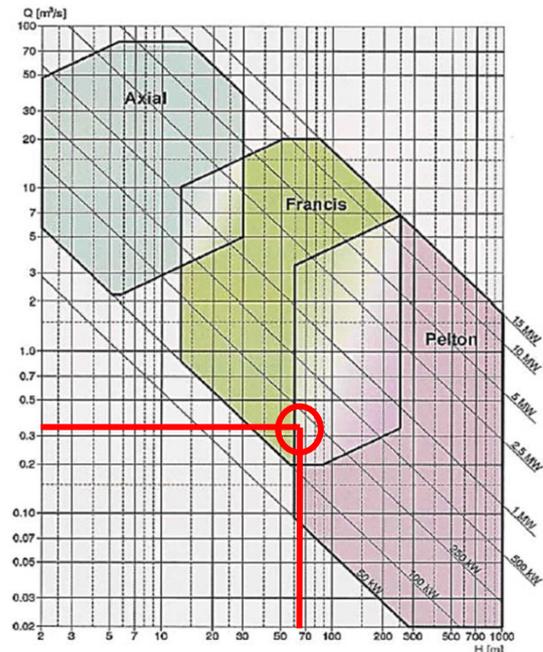
Dari perhitungan maka tinggi saluran tailrace yang direncanakan adalah 1 m dengan lebar 1,50 m.

Turbin

Dalam pemilihan turbin, penentuan dilakukan dengan parameter debit dan tinggi jatuh efektif. Penentuan turbin yang akan digunakan dapat menggunakan cara grafik dan berdasarkan kecepatan spesifik. Parameter untuk penentuan dengan grafik adalah sebagai berikut.

Dalam pemilihan turbin, penentuan dilakukan dengan parameter debit dan tinggi jatuh efektif. Penentuan turbin yang akan digunakan dapat menggunakan cara grafik

dan berdasarkan kecepatan spesifik. PLTMH Bendungan Tukul direncanakan menggunakan 2 unit turbin. Apabila dibagi 2 unit turbin maka debit yang digunakan adalah 0,50 m³/detik. Tinggi jatuh kotor sebesar 60,120 meter. Dari parameter tersebut didapatkan jenis turbin yang paling cocok untuk karakteristik lokasi. Penentuan dengan grafik ditampilkan pada gambar dibawah ini.

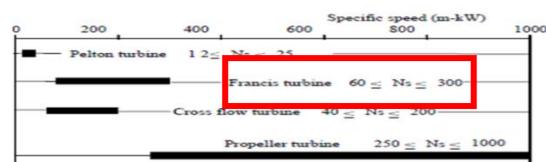


Gambar 4. Grafik Penentuan Turbin dengan Tinggi Jatuh dan Debit

Untuk memastikan pemilihan turbin yang paling tepat, selain menggunakan cara grafik cara yang dapat digunakan adalah menggunakan kecepatan spesifik. Namun terlebih dahulu perlu dihitung nilai kecepatan spesifik maksimum berikut ini (menggunakan *gross head*) berdasarkan JICA.

$$\begin{aligned}
 \text{Kec. spesifik maksimum} &= \frac{23000}{H+30} + 40 \\
 &= \frac{23000}{60,12+30} + 40 \\
 &= 295,215 \text{ m-kW}
 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan kecepatan spesifik maksimum, dapat ditinjau turbin yang paling cocok adalah turbin francis.



Gambar 5. Grafik Penentuan Turbin dengan Kecepatan Spesifik

Generator

Dalam penentuan generator PLTMH Bendungan Tukul, akan dipertimbangkan kecepatan spesifik dan jumlah kutub generator. Berdasarkan perhitungan didapatkan kisaran jumlah kutub generator yang digunakan adalah dengan kutub yang berjumlah 2 dan kecepatan putar 3000 rpm (50 Hz) atau 3600 rpm (60 Hz). Untuk studi ini yang dipilih adalah spesifikasi generator dengan frekuensi 60 Hz.

Pembangkitan Energi

Analisa pembangkitan energi pada studi ini dihitung secara series, yaitu dilakukan simulasi energi dari pada keempat kondisi debit yang telah ditentukan sesuai dari data debit yang diambil. Dalam simulasi energi ini secara umum memiliki cara yang sama dengan simulasi operasi waduk, namun didalamnya sudah digunakan hasil dari perhitungan yang telah dilakukan seperti hasil perhitungan kehilangan tinggi tekan.

Pada keempat simulasi yang direncanakan didapatkan debit rencana sebesar 1 m³/detik, serta nilai headloss sebesar 2,197 meter. Maka diperkirakan akan mendapatkan daya sebesar

$$\begin{aligned} \text{Debit} &= 1 \text{ m}^3/\text{detik} \\ \text{Head gross} &= 60,12 \text{ m} \\ \text{Headloss} &= 2,197 \text{ m} \\ \text{Head Effective} &= 60,12 - 2,197 \\ &= 57,92 \text{ m} \\ \text{Daya} &= 9,81 \times \eta \times Q \times H_{\text{eff}} \\ &= 9,81 \times 0,80 \times 1,00 \times 57,92 \\ &= 454,545 \text{ kW} \end{aligned}$$

Nilai kapasitas faktor pada keempat simulasi operasi waduk pada Bendungan Tukul adalah sebagai Berikut,

$$\begin{aligned} \text{Debit Air Cukup} &= 26,02\% \\ \text{Daya PLTMH} &= 454 \text{ kW} \\ \text{Rerata Energi Tahunan} &= 274.965,32 \\ \text{Kapasitas faktor} &= \frac{\text{Rerata Energi Tahunan}}{\text{Energi Maksimum}} \\ &= \frac{274.965,32}{338.181,81} \\ &= 81,31\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Debit Air Normal} &= 50,68\% \\ \text{Daya PLTMH} &= 454 \text{ kW} \\ \text{Rerata Energi Tahunan} &= 233.755,23 \\ \text{Kapasitas faktor} &= \frac{\text{Rerata Energi Tahunan}}{\text{Energi Maksimum}} \\ &= \frac{233.755,23}{338.181,81} \\ &= 69,12\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Debit Air Rendah} &= 75,30\% \\ \text{Daya PLTMH} &= 454 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Rerata Energi Tahunan} &= 173.112,72 \\ \text{Kapasitas faktor} &= \frac{\text{Rerata Energi Tahunan}}{\text{Energi Maksimum}} \\ &= \frac{173.112,72}{338.181,81} \\ &= 51,19\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Debit Musim Kering} &= 97,34\% \\ \text{Daya PLTMH} &= 454 \text{ kW} \\ \text{Rerata Energi Tahunan} &= 110.689,38 \\ \text{Kapasitas faktor} &= \frac{\text{Rerata Energi Tahunan}}{\text{Energi Maksimum}} \\ &= \frac{110.689,38}{322.338,68} \\ &= 34,33\% \end{aligned}$$

Dengan melihat nilai kapasitas faktor serta energi rerata tahunan dan daya yang dibangkitkan oleh PLTMH Bendungan Tukul ini dinilai layak beroperasi secara teknis pada keandalan debit air cukup dan debit air normal.

Komponen Biaya

Komponen biaya pada studi ini terdiri dari pembangunan bangunan sipil, peralatan elektromekanikal sampai dengan biaya instalasinya. Dalam perhitungan komponen biaya pembangunan ini menggunakan pendekatan rumus empiris dari RETscreen Canada. Berdasarkan hasil perhitungan estimasi biaya menggunakan rumus empiris dari RETscreen Canada, didapatkan nilai biaya keseluruhan yang ditampilkan pada tabel berikut ini.

Tabel 3. Komponen Biaya PLTMH Waduk Tukul

C	Komponen	Biaya
C1	Teknis	267,931,228.00
C2	Elektromekanika	2,307,269,336.62
C3	Instalasi Peralatan Elektromekanikal	346,090,400.49
C4	Komponen Kabel Transmisi	579,016,267.43
C5	Subtansi dan Transforme	111,582,547.60
C6	Instalasi Subtansi dan Transformer	16,737,382.14
C7	Pekerjaan Sipil	11,017,982,623.17
C8	Pipa Pesat	2,357,039,388.71
C9	Instalasi Pipa Pesat	305,020,025.41
C10	Biaya lainlain	301,445,205.11
	Total	17,610,114,404.67

Nilai Sekarang (Present Value)

Dalam penentuan nilai sekarang, diperlukan skema finansial agar dapat

dihitung nilai sekarang tersebut, nantinya perhitungan nilai sekarang (present value) diajukan sebagai parameter untuk mengestimasi indikator kelayakan ekonomi.

Adapun skema finansial untuk PLTMH Bendungan Tukul yaitu sebagai berikut

Biaya investasi = Rp. 17.610.114.404,67
 Pendanaan = 40% modal awal dan 60% pinjaman
 Modal = Rp. 5.283.034.321,40
 Pinjaman = Rp. 12.327.080.083,27
 Biaya O&P = 2.5% biaya total = Rp. 5.850.960.510,95

Bunga bank = 6,75%
 Periode operasi = 20 tahun
 Periode pinjaman = 7 tahun
 Energi tahunan = 2,805,062.76 kWh
 Dengan harga per kWh Rp.1.729,32 kWh untuk tahun ke 1 sampai 9 dan Rp. 1.080,83 kWh untuk tahun ke 10 sampai 20

Dari hasil seluruh perhitungan pengeluaran maka berikut ini adalah rekapitulasi biaya untuk *present value* biaya Tabel 4. Present Value Biaya PLTMH Waduk Tukul

Biaya	Biaya Sekarang
Harga Modal	5,811,337,753.54
Harga Cicilan Utang	24,013,152,002.21
Harga Biaya OP	5,850,960,510.95
Total	35,675,450,266.70

Sumber : Hasil Perhitungan

Selain perhitungan pengeluaran, ada pula perhitungan besarnya manfaat dari PLTMH Bendungan Tukul, dengan menggunakan nilai produksi energi tahunan dan harga listrik per kWh yang mengacu pada Permen ESDM No. 14 tahun 2014 maka

Produksi energi tahunan = 2,805,062.76kWh

Harga listrik = 1.729,32 /kWh

Manfaat tahunan = 2.805.062.762,835.270,31 × 1.792,32 = Rp. 4.850.851.138,4

PV manfaat pada tahun ke-1 = Rp. 4.850.851.138,4 × (P/A;6.75;1) = Rp. 4.850.851.138,4 × 0.937 = Rp. 4.544.277.346,51

Sehingga manfaat tahunan sampai 20 tahun operasi PLTMH Bendungan Tukul adalah sebagai berikut ditampilkan pada tabel berikut ini.

Tabel 5. Present Value Manfaat Keseluruhan PLTMH Waduk Tukul

Tahun Ke	Manfaat Tahunan	Faktor Konversi	Manfaat Sekarang
1	4,850,851,138.46	0.937	4,544,277,346.51
2	4,850,851,138.46	0.878	4,256,864,416.56
3	4,850,851,138.46	0.822	3,988,005,992.21
4	4,850,851,138.46	0.77	3,736,125,546.84
5	4,850,851,138.46	0.722	3,500,252,910.24
6	4,850,851,138.46	0.676	3,279,054,098.32
7	4,850,851,138.46	0.633	3,072,044,025.99
8	4,850,851,138.46	0.593	2,878,252,523.01
9	4,850,851,138.46	0.556	2,696,588,147.87
10	3,031,781,961.54	0.521	1,579,027,840.12
11	3,031,781,961.54	0.488	1,479,585,391.78
12	3,031,781,961.54	0.457	1,386,282,301.91
13	3,031,781,961.54	0.428	1,298,966,981.42
14	3,031,781,961.54	0.401	1,217,033,073.91
15	3,031,781,961.54	0.376	1,140,328,990.28
16	3,031,781,961.54	0.352	1,068,475,757.80
17	3,031,781,961.54	0.33	1,001,397,581.90
18	3,031,781,961.54	0.31	938,336,517.10
19	3,031,781,961.54	0.29	879,216,768.85
20	3,031,781,961.54	0.272	823,886,748.05
Jumlah			44,764,002,960.65

Net Present Value

Nilai sekarang bersih (*net present value*) adalah selisih antara nilai manfaat sekarang dengan nilai biaya sekarang. Berdasarkan perhitungan sebelumnya, dapat dihitung nilai NPV yang tentunya lebih dari 0. Adapun nilai NPV pada studi ini adalah Rp.9,088,552,693.94

Internal Rate of Return

Internal rate of return menunjukkan suku bunga dimana nilai BCR = 1 dan NPV = 0, dengan cara perhitungan yang sama perhitungan nilai sekarang untuk manfaat dan biaya. Untuk mendapatkan nilai IRR maka perlu dihitung nilai sekarang untuk biaya dan manfaat menggunakan beberapa suku bunga, sehingga faktor pengalinya akan berbeda. Dengan cara yang sama, akan dihitung nilai sekarang dari manfaat dan biaya dengan suku bunga 10% dan 15%. Berdasarkan hasil

perhitungan didapatkan nilai IRR sebesar 10,21%

Payback Period

Periode pengembalian atau *payback period* akan menunjukkan berapa lama jangka waktu proyek PLTMH Bendungan Tukul akan mengembalikan seluruh biaya-biaya yang dikeluarkan. Dengan biaya-biaya yang telah dihitung sebelumnya dan juga nilai manfaat yang telah dihitung, lama waktu proyek mengembalikan keseluruhan biaya adalah

$$\begin{aligned} \text{Payback Period} &= \frac{\text{Total PV Biaya}}{\text{Rerata PV Manfaat}} \\ &= \frac{35,675,450,266.70}{2,238,200,148.03} \\ &= 15.939 \text{ tahun} \approx 16 \text{ tahun} \end{aligned}$$

Sehingga periode pengembalian untuk keseluruhan biaya yang dikeluarkan adalah selama 16 tahun.

Analisa Sensitivitas

Analisa sensitivitas bertujuan untuk mengetahui apa yang terjadi pada hasil proyek apabila terjadi kemungkinan perubahan dalam perubahan nilai-nilai untuk biaya dan manfaat masih merupakan perkiraan, sehingga bila terjadi asumsi- asumsi yang tidak sama dengan keadaan sebenarnya.

Sehingga, dilakukan perhitungan terhadap kondisi berikut:

1. Komponen cost naik 10 %, benefit tetap
2. Komponen cost turun 10 %, benefit tetap
3. Komponen cost tetap, benefit naik 10%
4. Komponen cost tetap, benefit turun 10%
5. Komponenn cost naik 10 %, benefit turun 10%
6. Komponen cost, turun 10 %, benefit naik 10%.

Maka didapatkan hasil sebagai berikut

Tabel 6. Analisa Sensitivitas

Kondisi	B/C	IRR
1	1.14	8.86%
2	1.39	11.47%
3	1.38	11.35%
4	1.13	8.71%
5	1.03	7.19%
6	1.53	12.49%

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari pembahasan yang telah dilakukan dengan maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Dalam perhitungan simulasi operasi waduk pada perencanaan PLTM Bendungan Tukul menggunakan metode basic month dengan 4 simulasi kondisi debit yaitu:

- Debit Air Cukup 26,02%
- Debit Air Normal 50,68%
- Debit Air Rendah 75,30%
- Debit Musim Kering 97,34%

Bedasarkan keempat kondisi didapatkan nilai debit outflow sebesar 1 m³/ dt sebagai dasar perencanaan untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro pada Waduk Tukul, Pacitan.

Menurut Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 12 Tahun 2017, Tenaga Air dengan kapasitas paling tinggi 10 MW (sepuluh megawatt) harus mampu beroperasi dengan faktor kapasitas (capacity factor) paling sedikit sebesar 65%. Berdasarkan keempat simulasi kondisi debit didapatkan nilai kapasitas faktor adalah sebagai berikut,

- Debit Air Cukup
Kapasitas Faktor = 81,35%
- Debit Air Normal
Kapasitas Faktor = 68,60%
- Debit Air Rendah
Kapasitas Faktor = 51,19%
- Debit Musim Kering
Kapasitas Faktor = 34,33%

2. Perencanaan pipa pesat dan turbin pada PLTM di Bendungan Tukul adalah sebagai berikut:

Pipa pesat (penstock) yang direncanakan:

Debit Rencana (Q) = 1,00 m³/dt

Tinggi Jatuh (H) = 60,12 m

Kekasaran Pipa (n) = 0.012

Jenis Pipa = *Welded Steel*

Panjang Pipa Pesat = 214,82 m

Diameter Pipa Pesat = 0,70 m

Tebal Pipa Pesat = 4 mm

Klafifikasi turbin berdasarkan tinggi jatuh kotor sebesar 60,12m tinggi jatuh efektif sebesar 57,923 m dan dengan jumlah turbin sebanyak 2 unit. Daya yang dihasilkan sebesar (2× 0,227 MW) maka turbin yang dipilih pada perencanaan PLTM Bendungan Tukul ini adalah turbin Francis.

3. Parameter yang digunakan dalam perhitungan analisa kelayakan ekonomi pada studi ini adalah BCR, NPV, IRR, Analisa sesnsitivitas dan Payback Periode

dengan usia guna bangunan 20 tahun. Besarnya parameter tersebut adalah sebagai berikut:

BCR	= 1.33
NPV	= Rp. 9.088.552.693
IRR	= 7,183 %
Payback Periode	= 16 tahun

Berdasarkan hasil dari perhitungan analisa ekonomi diatas dapat disimpulkan bahwa secara ekonomi PLTM Bendungan Tukul layak untuk di bangun.

Saran

Diketahui bahwa pembangunan Waduk Tukul dibangun dengan memanfaatkan Sungai Telu yang terletak di Desa Karanggede, Kecamatan Arjosari, Kabupaten Pacitan. Agar PLTM Bendungan Tukul ini dapat terealisasi dengan baik dan memberikan manfaat yang optimal maka penulis memberikan saran sebagai berikut:

1. Perlu adanya keseriusan dari pihak pemerintah baik pemerintah daerah maupun pusat untuk mendukung pembangunan PLTMH Bendungan Tukul ini sebagai pemanfaatan energi terbarukan guna mewujudkan program kemandirian energi Indonesia yaitu program 35.000 MW.
2. Pembangunan PLTM ini tentunya melibatkan kegiatan ekonomi yang luas, sehingga diharapkan potensi tersebut dapat dimanfaatkan seluas-luasnya untuk menggerakkan ekonomi dalam negeri, yaitu dengan memanfaatkan produsen peralatan dalam negeri.
3. Perlunya konsep pembangunan berkelanjutan (sustainable development) dalam pembangunan PLTM Bendungan Tukul ini, yaitu dengan upaya melibatkan semua pihak (pemerintah dan masyarakat) untuk menjaga kelestarian DAS Telu, agar ketersediaan debit airnya tetap terjaga.

DAFTAR PUSTAKA

- Dake, J.M. 1985. Hidrolika Teknik. Jakarta: Erlangga.
- Dandekar, MM dan K.N. Sharma. 1991. Pembangkit Listrik Tenaga Air. Jakarta : Universitas Indonesia.
- Departemen Pekerjaan Umum.1999. *Panduan Perencanaan Bendungan Urugan Volume II Analisis Hidrologi*. Jakarta : Departemen Pekerjaan Umum.
- Patty, O.F. 1995. *Tenaga Air*. Surabaya : Erlangga.
- Harto, Sri. 1993. *Analisis Hidrologi*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- Hadisussanto, Nugroho. 2010. *Aplikasi Hidrologi*. Malang :
- Hydraulic Gates and Penstock Association. 2003. *Technical Standards for Gates and Penstocks*. Japan : Hydraulic Gates and Penstock Association.
- Johnson, K & Hart, A. *The Small Hydropower Handbook*. Colorado : Colorado Energi Office.
- Kodoatie, Robert J.1995. *Analisis Ekonomi Teknik*. Yogyakarta: Andi Yogyakarta.
- Penche, Celso. 2004. *Guidebook on How to Develop a Small Hydro Site*. Belgia : ESHA (European Small Hydropower Association).
- Singhal M. K. & Arun Kumar. 2015. *Optimum Design of Penstock for Hydro Projects*. India : AHEC, Indian Institute of Technology.
- Suyanto, Adhie, Trie M. Sunaryo, dan Roestam Sjarief. 2001. *Ekonomi Teknik Proyek Sumber Daya Air*. Jakarta: MHI.
- Ramos, Helena. 2000. *Guidelines For Design Small Hydropower Plants*. Irlandia : WREAN (Western Regional Energi Agency & Network) and DED (Department of Economic Development)
- RETScreen International. 2001.*Small Hydro Project Analysis*. Minister of Natural : Canada