

# STUDI PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MINI HIDRO BATU BALAI KECAMATAN AIR NIPIS KABUPATEN BENGKULU SELATAN

Abdan Izzan Ghafara<sup>1</sup>, Pitojo Tri Juwono<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Program Sarjana Teknik Pengairan Universitas Brawijaya

<sup>2</sup>Dosen Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya Malang

Jalan MT. Haryono 167 Malang 65145 Indonesia

<sup>1</sup>email: [abdanizzanghafara@yahoo.com](mailto:abdanizzanghafara@yahoo.com)

**ABSTRAK** : Desa Batu Balai yang terletak di Kecamatan Air Nipis, Kabupaten Bengkulu Selatan, Provinsi Bengkulu yang dilewati Sungai Bengkenang mampu mengalirkan debit yang dapat diandalkan sepanjang tahunnya. Pemanfaatan sungai tersebut belum begitu maksimal meskipun ada beberapa pemanfaatan air sebagai sumber air irigasi dan kebutuhan air baku, namun sejatinya tetap tidak maksimal mengingat debitnya yang ideal untuk sumber pembangkit listrik. Pemanfaatan Sungai Bengkenang sebagai sumber Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (PLTM) dapat dilakukan, dengan melakukan studi untuk mengetahui kelayakan dari aspek teknis dan ekonomi. Hasil kajian yang dilakukan menunjukkan bahwa debit andalan yang digunakan yaitu  $Q_{40\%} = 6,234 \text{ m}^3/\text{dt}$  dan debit rancangan yang digunakan  $Q_{100\text{th}} = 343,504 \text{ m}^3/\text{dt}$ . Bangunan pendukung yang digunakan yaitu bendung mercu bulat, kolam olak bak tenggelam, *intake*, saluran transisi, *sandtrap*, *waterway*, *surge tank*, *penstock*, *tailrace*. Pada *waterway* dan *penstock* digunakan pipa bertekanan, dengan jenis pipa *Glass Fiber Reinforced Plastic* (GRP), diameter *waterway* sebesar 1,80 m dengan ketebalan sebesar 20,85 mm dan diameter *penstock* utama sebesar 1,6 m dengan ketebalan sebesar 18,00 mm. Dengan tinggi jatuh efektif sebesar 42,877m didapat kapasitas terpasang yaitu  $2 \times 1,10 \text{ MW}$  menggunakan turbin *francis* sumbu horisontal. Energi yang mampu dihasilkan yaitu sebesar 12,18 GWh dengan faktor kapasitas sebesar 63,19%. Dari analisa kelayakan ekonomi yang dilakukan dengan menggunakan beberapa parameter kelayakan yaitu  $\text{BCR} = 1,599$ ,  $\text{NPV} = \text{Rp } 76.725.259.450,03$ ,  $\text{IRR} = 11,53\%$ , dan *Payback Periode* = 5 tahun 8 bulan 12 hari.

**Kata kunci** : PLTM, daya dan energi, debit andalan, GRP, kelayakan ekonomi

**ABSTRACT** : Batu Balai Village which is located in Air Nipis district, South Bengkulu Regency, Bengkulu Province which is passed by Bengkenang River is able to drain reliable discharge throughout the year. The utilization of the river is not yet maximal although there are several uses of water as an irrigation and raw water needs, but in fact it is still not optimal considering the ideal discharge for the source of power plant. Utilization of Bengkenang River as a source of Minihydro Power Plant can be done, by doing studies to determine the feasibility of technical and economic aspects. The results of the study showed that dependable discharge was  $Q_{40\%} = 6,234 \text{ m}^3/\text{s}$  and the designed flood discharge used by  $Q_{100\text{th}} = 343,504 \text{ m}^3/\text{s}$ . Supporting buildings used are rounded crest dams, submerged bucket type, intakes, feeder canal, *sandtrap*, *waterway*, *surge tanks*, *penstock*, and *tailrace*. Pressurized pipes are used in the *waterway* and *penstock*, with *Glass Fiber Reinforced Plastic* (GRP) pipe type, diameter of *waterway* is 1,80 m with 20,85 mm of thickness and main *penstock* diameter is 1,6 m with 18,00 mm of thickness. With an effective head of 42,877 m, the installed capacity is  $2 \times 1,10 \text{ MW}$  using a Francis turbine with horizontal axis. The energy that can be produced is 12,18 GWh with a capacity factor of 63.19%. From the economic feasibility analysis by using several economical parameters that is  $\text{BCR} = 1,599$ ,  $\text{NPV} = \text{Rp } 76.725.259.450,03$ ,  $\text{IRR} = 11.53\%$ , and *Payback Period* = 5 years 8 months and 12 days.

**Keyword** : Minihydro Power Plant, power and energy, dependable discharge, GRP, economic feasibility

## PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik dewasa ini akan terus meningkat seiring dengan membaiknya kondisi perekonomian, penambahan jumlah penduduk, dan peningkatan pembangunan yang berkelanjutan. Namun dalam kenyataannya belum keseluruhan penduduk dapat merasakan energi listrik tersebut. Hal ini dimungkinkan karena terbatasnya produksi listrik serta jarak jangkauan yang tidak dapat dipenuhi, maka untuk itu perlu adanya peranan dari pemerintah dan perusahaan listrik dalam memenuhi kebutuhan listrik tersebut.

Upaya pemecahan dari permasalahan tersebut adalah pembangunan tenaga listrik tambahan untuk memenuhi kebutuhan listrik bagi penduduk yang bersumber dari Perusahaan Listrik Negara (PLN) maupun sumber yang lainnya. Pembangunan ketenagalistrikan beserta infrastruktur pendukungnya bertujuan untuk pemerataan konsumsi energi listrik agar dapat memacu pertumbuhan ekonomi di daerah berdasarkan pasal 3 ayat 1 UU No. 20 Tahun 2002 tentang ketenagalistrikan.

Oleh karena itu diperlukan alternatif pembangunan tenaga listrik yaitu menggunakan sumber daya alam setempat seperti halnya Pembangkit Listrik Tenaga Mini Hidro (PLTM). Melihat sangat potensialnya sumber daya air di Indonesia, serta untuk mengembangkan pembangkit listrik pada masyarakat daerah, yang nantinya memungkinkan terwujudnya program kemandirian energi Indonesia sebesar 35000 MW, maka perlu dibangun teknologi pembangkit listrik tenaga mini hidro sebagai upaya mewujudkan hal tersebut.

Desa Batu Balai yang terletak pada Kecamatan Air Nipis, Kabupaten Bengkulu Selatan ini dilewati Sungai Bengkenang yang debitnya dapat diandalkan setiap tahunnya. Pemanfaatan sungai tersebut belum begitu maksimal meskipun digunakan sebagai sumber irigasi dan air baku. Dengan kondisi kontur dan aliran debit yang memenuhi secara teknis untuk dilakukannya perencanaan PLTM, maka badan usaha diharapkan memanfaatkan hal tersebut guna memenuhi ketahanan energi terbarukan yang ramah lingkungan.

Tujuan dari studi ini nantinya adalah guna mengetahui potensi yang dapat di hasilkan dari perencanaan PLTM Batu Balai ini, adapun potensi yang akan dihitung adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui besarnya debit banjir dan debit andalan pada PLTM Batu Balai
2. Mengetahui desain dan dimensi bangunan PLTM Batu Balai.
3. Mengetahui tinggi jatuh efektif pada lokasi PLTM Batu Balai.
4. Mengetahui Jenis Turbin yang digunakan pada PLTM Batu Balai.
5. Mengetahui Daya dan energi pembangkitan yang mampu dihasilkan pada PLTM Batu Balai.
6. Mengetahui kelayakan ekonomi pada perencanaan PLTM Batu Balai.

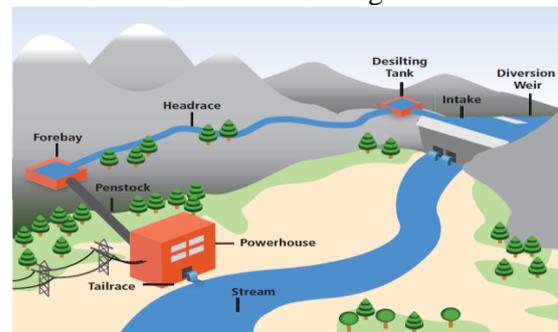
## TINJAUAN PUSTAKA

### Pembangkit Listrik Tenaga Mini Hidro

Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (PLTM) atau yang biasa disebut dengan *Small-scale hydropower systems* diklasifikasikan sebagai pembangkit listrik tenaga air dengan kapasitas pembangkitan yaitu berkisar antara 1000 kW sampai dengan 30 MW setiap unitnya. Secara singkat, cara kerja PLTM yaitu berasal dari proses perubahan aliran air lalu nantinya akan berubah menjadi energi mekanis pada turbin, sehingga nantinya putaran turbin dikonversi menjadi energi listrik pada generator. (*Small Hydropower System*, 2001:2)

### Jenis PLTM

1. PLTM *run-off-river* yang pada umumnya tidak menggunakan reservoir untuk sumber airnya, tetapi membutuhkan bangunan-bangunan pendukung seperti bendung, sandtrap, dll untuk mengalirkan air ke turbin. Serta nantinya air akan dikembalikan ke hilir sungai.

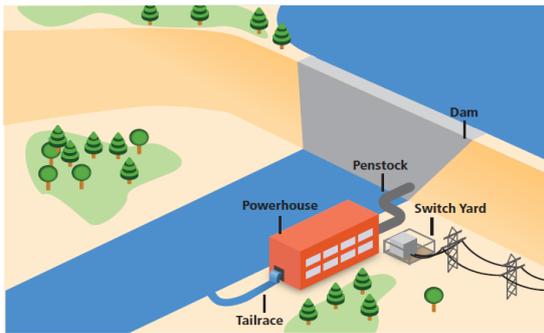


Gambar 1. Skema PLTM Run Off River

Sumber : Kumar & Schei (2011:451)

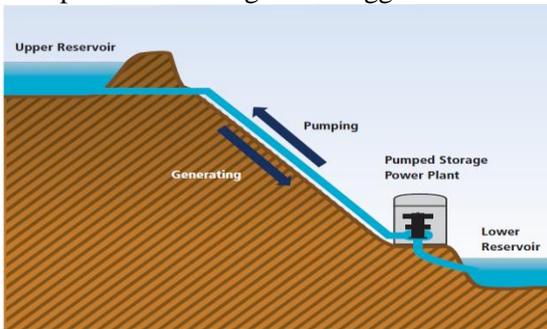
2. *Reservoir dan Dam Based*, merupakan pembangkit yang memiliki kolam tampung atau reservoir sebagai tempat penampungan, jenis PLTM ini juga sering disebut dengan *Storage Hydropower*. Selanjutnya air dari kolam tersebut dialirkan ke bagian saluran pembangkit

untuk kemudian digunakan memutar turbin.



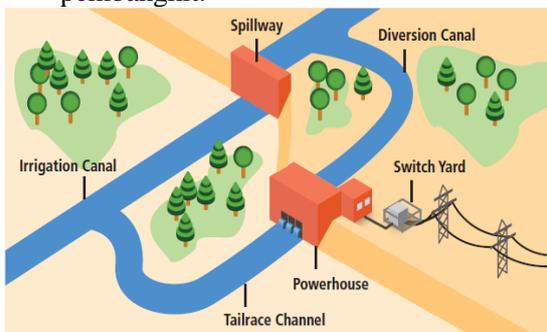
Gambar 2. Skema PLTM Reservoir  
Sumber : Kumar & Schei (2011:451)

3. *Pumped Storage* atau Pembangkit Listrik Tenaga Pompa adalah sebuah tipe khusus dari pembangkit listrik konvensional. Keistimewaannya dapat dipergunakan sebagai stasiun pompa yang memompa air dari saluran depan ke saluran samping pada saat cadangan air tinggi.



Gambar 3. Skema PLTM Pumped Storage  
Sumber : Kumar & Schei (2011:452)

4. *Diversion Canal* merupakan jenis pembangkit listrik yang dimana geologi dan hidrologi yang alirannya dapat langsung dimanfaatkan sebagai pembangkit.



Gambar 4. Skema PLTM Pumped Storage  
Sumber : Kumar & Schei (2011:452)

## Kajian Hidrologi PLTM Batu Balai

### a. Uji Homogenitas Data

Metode yang digunakan dalam pengujian homogenitas data hidrologi untuk PLTM Batu Balai ini yaitu menggunakan metode RAPS

(*Rescaled Adjusted Partial Sums*). Tujuan dari uji ini adalah untuk mengetahui tingkat homogen dari data yang telah diperoleh, karena tidak semua data – data yang sudah diperoleh tersebut memiliki tingkat ketelitian dan akurasi yang baik sehingga perlu pengujian lebih lanjut. Adapun persamaannya adalah :

$$S_0^* = 0 \quad (1)$$

$$S_k^* = \sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y}) \quad (2)$$

Dengan  $k = 1, 2, 3, \dots, n$

$$S_k^{**} = \frac{S_k^*}{D_y} \quad (3)$$

$$D_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y})^2}{n} \quad (4)$$

Nilai Statistik Q dan R

$$Q = \text{maks } |S_k^{**}| / 0 \leq k \leq n \quad (5)$$

$$R = \text{maks } S_k^{**} - \text{maks } S_k^{**} \quad (6)$$

Dengan :

Q = Atribut dari besarnya suatu nilai statistik, diperoleh dari perhitungan dengan menggunakan rumus seperti pada persamaan (5)

R = Atribut dari besarnya sebuah nilai statistik, diperoleh dari perhitungan dengan menggunakan rumus seperti pada persamaan (6)

$S_k^*$  = Data hujan ( X ) - data hujan rata-rata (  $\bar{X}$  )

$D_y^2$  = Nilai kuadrat  $S_k^*$  dibagi dengan jumlah data

$S_k^{**}$  = nilai  $S_k^*$  dibagi dengan  $D_y$

### b. Uji Abnormalitas Data

Uji yang dilakukan adalah Uji *Inlier-Outlier*, tujuannya dari perhitungan ini adalah dimana nantinya data yang menyimpang dari dua batas ambang, yaitu ambang bawah ( $X_L$ ) dan ambang atas ( $X_H$ ) akan dihilangkan.

Adapun persamaannya adalah :

$$X_H = \text{Exp} . (X_{\text{rerata}} + Kn . S) \quad (7)$$

$$X_L = \text{Exp} . (X_{\text{rerata}} - Kn . S) \quad (8)$$

Dengan :

$X_H$  = Nilai ambang atas.

$X_L$  = Nilai ambang bawah.

$X_{\text{rerata}}$  = Nilai rata – rata.

S = Simpangan baku dari logaritma terhadap data.

$Kn$  = Besaran yang bergantung dengan jumlah sampel data.

### c. Analisa Curah Hujan Rancangan

Untuk analisa hujan rancangan distribusi yang digunakan adalah distribusi Log Pearson III dan Gumbel dengan kala ulang yang telah ditentukan.

#### d. Uji Kesesuaian Distribusi

Uji kesesuaian distribusi dilakukan dengan metode Smirnov – Kolmogorov dan Chi Square. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah distribusi Log Pearson III dan Gumbel yang digunakan telah memenuhi kesesuaian distribusi.

##### 1. Smirnov-Kolmogorov

$$\Delta_{\text{maks}} = |Pe(X_n) - Pt(X_n)| \quad (9)$$

Dengan :

$Pe(X_n)$  = Peluang empiris.

$Pt(X_n)$  = Peluang teoritis.

$\Delta_{\text{maks}}$  = Selisih maksimum antara peluang empiris dan peluang teoritis.

##### 2. Chi Square

Agar distribusi frekuensi yang dipilih diterima, maka harga  $X^2_{\text{hitung}} < X^2_{\text{kritis}}$ . Adapun persamaannya adalah sebagai berikut:

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i + E_i)^2}{E_i} \quad (10)$$

$$Dk = K - (P + 1) \quad (11)$$

Dengan :

$X^2$  = harga chi – square terhitung

$O_i$  = jumlah nilai pengamatan pada sub kelompok ke-i

$E_i$  = Jumlah nilai teoritis kelompok-1

$N$  = Jumlah data

$Dk$  = Derajat kebebasan

$K$  = Koefisien

$P$  = Nilai pada distribusi Gumbel,  $P = 1$

#### e. Intensitas Curah Hujan

##### 1. Koefisien Pengaliran

Tabel 1. Koefisien Pengaliran

Kriteria	Nilai C
Daerah pegunungan yang curam	0.75 - 0.90
Daerah pegunungan tersier	0.70 - 0.80
Daerah bergelombang dan hutan	0.50 - 0.75
Daerah dataran yang ditanami	0.45 - 0.60
Persawahan yang diairi	0.70 - 0.80
Sungai di daerah pegunungan	0.75 - 0.85
Sungai kecil di daerah daratan	0.45 - 0.75
Sungai yang besar dengan wilayah pengaliran yang lebih dari seperduanya terdiri dari daratan	0.50 - 0.75

##### 2. Distribusi Curah Hujan Mononobe

Metode pendistribusian curah hujan yang digunakan salah satunya dengan cara Mononobe dengan persamaan sebagai berikut:

$$Rt = \frac{R_{24}}{t} \left( \frac{t}{T} \right)^{2/3} \quad (12)$$

Dengan:

$IT$  = intensitas hujan T jam (mm/jam)

$R_{24}$  = Curah hujan harian (mm)

$T$  = Waktu hujan dari awal sampai jam ke t (jam)

$t$  = lama curah hujan (jam)

#### Analisa Debit Banjir Rancangan

Untuk menghitung debit banjir rancangan digunakan dua metode, yaitu Hidrograf Satuan Sintetis Nakayasu dan Hidrograf Satuan Sintetis Gama-I. Adapun persamaannya adalah sebagai berikut:

##### 1. HSS Nakayasu

$$Qp = \frac{CA \cdot Ro}{3,6(0,3Tp + T_{0,3})} \quad (13)$$

Dengan:

$Qp$  = debit puncak banjir (m<sup>3</sup>/dt)

$Tp$  = Tenggang waktu dari permulaan hujan sampai puncak banjir (jam)

$T_{0,3}$  = waktu yang diperlukan oleh penurunan debit, dari puncak sampai 30% dari debit puncak (jam)

$CA$  = Luas daerah pengaliran sampai outlet (km<sup>2</sup>).

##### 2. HSS GAMA I

$$Qp = 0.1836A^{0.5886}TR^{-0.4008}JN^{0.2381} \quad (14)$$

Dengan:

$TR$  = Waktu naik hidrograf (jam)

$A$  = Luas DAS sebelah hulu (km<sup>2</sup>)

$JN$  = Jumlah pertemuan sungai di DAS

$Qp$  = Debit puncak banjir (m<sup>3</sup>/dt)

#### Analisa Debit Andalan

Dalam perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro ini, dikarenakan minimnya data, maka perlu dihitung debit andalan menggunakan metode dari Dr. F.J. Mock, yang didahului dengan memperhitungkan besarnya Evapotranspirasi Potensial. Sedangkan untuk pemilihan debit andalan yang akan digunakan pada studi ini digunakan metode FDC (*Flow Duration Curve*).

#### Analisa Hidrolika dan Dimensi Bangunan

##### a. Bendung (*Weir*)

Di Indonesia dalam menentukan mercu bendung biasanya terdapat dua tipe yang umum dan sering digunakan yaitu bendung bertipe bulat dan bendung bertipe OGEE. Adapun persamaan debit yang melewati mercu bendung adalah sebagai berikut:

$$Q = Cd \times Be \times He^{1.5} \quad (15)$$

$$Cd = 2,2 - 0,0416 \times \left( \frac{He}{P} \right)^{0,99} \quad (16)$$

$$V = \left( \frac{Q}{Be \times (P + Hd)} \right) \quad (17)$$

$$H_1 = \frac{v^2}{2g} + Hd \quad (18)$$

Dengan :

- Q = Debit (m<sup>3</sup>/dt)
- Cd = Koefisien debit limpahan
- He = Tinggi energi diatas mercu (m)
- P = Tinggi mercu (m)
- V = Kecepatan aliran (m/dt)
- Be = Lebar efektif bendung (m)
- Hd = Tinggi muka air (m)

Bangunan peredam energi merupakan struktur dari bangunan di hilir tubuh bendung yang terdiri dari beberapa tipe dan bentuk. Adapun jenis dari kolam olak adalah sebagai berikut:

1. USBR Tipe I
2. USBR Tipe II
3. USBR Tipe III
4. USBR Tipe IV
5. Peredam Energi Bak tenggelam

#### b. Bangunan Pengambilan (*Intake*)

Bangunan pengambilan berfungsi untuk mengelakkan air dari sungai dengan kuantitas yang diinginkan. Bangunan pengambilan sebaiknya dibangun sedekat mungkin dengan pembilas dan as bendung.

Adapun jumlah debit air yang mengalir dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$Q = K \times \mu \times a \times b \sqrt{2g \times h} \quad (19)$$

Dengan :

- Q = Debit (m<sup>3</sup>/dt)
- K = Faktor aliran tenggelam
- $\mu$  = Koefisien debit
- a = Tinggi bukaan pintu (m)
- b = Lebar pintu (m)
- g = Percepatan gravitasi (m/dt<sup>2</sup>)
- h = Kedalaman air didepan pintu (m)

#### c. Saluran Transisi

Saluran transisi ini berfungsi untuk menyalurkan air yang telah memasuki intake untuk dialirkan ke bangunan selanjutnya. Elevasi muka air pada saluran ini dijaga supaya tidak mengurangi elevasi pada saluran berikutnya terlalu banyak.

#### d. Kantong Lumpur (*Sandtrap*)

Kantong lumpur (*Sandtrap*) memiliki fungsi untuk memhalangi laju sedimen menuju *waterway* dan turbin, dan mengendapkan serta membuang sedimen kembali ke sungai dengan sistem penggelontoran sedimen satau pengurasan. Pada PLTM ini juga *sandtrap* berfungsi sebagai kolam pengatur aliran untuk mengurangi perubahan muka air pada saluran

pengalih. Adapun persamaan-persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$A = \frac{Q_{desain}}{\omega} \quad (20)$$

Dengan :

- A = Luas kantong lumpur (m<sup>2</sup>)
- $Q_d$  = Debit desain *sandtrap* (m<sup>3</sup>/dt)
- $\omega$  = Kecepatan endap sedimen (m/dt)

Karena kantong lumpur ini merangkap sebagai *headpond*, maka perlu dipertimbangkan tinggi muka air minimum sebelum memasuki *waterway* dan besar volume debit jika terjadi *sudden shut off*. Ada beberapa persamaan yang digunakan yaitu:

- Persamaan JICA  
 $h \geq D^2 + (0,5D)$  (21)

- Persamaan Gordon  
 $h > 0,5434 \cdot v \cdot \sqrt{D}$  (22)

- Persamaan Knauss  
 $h > D \left(1 + \frac{2,3v}{\sqrt{gD}}\right)$  (23)

- Persamaan Rohan  
 $h > 1,474 \cdot v^{0,48} \cdot D^{0,76}$  (24)

- Persamaan Praktis  
 $h > 2D$  (25)

Dengan :

- h = Tinggi air dari dasar *waterway* (m)
- v = Kecepatan *waterway* (m/dt)
- D = Diameter rencana (m)

adapun volume sudden shut off adalah sebagai berikut:

- Volume *shut off* (V)  
 $V = 3 \text{ menit} \times Q$  (26)

#### e. Saluran Hantar (*Waterway*)

Saluran pembawa (*waterway*) berfungsi sebagai saluran pembawa debit dari kantong lumpur menuju *surge tank*, persamaan-persamaan yang digunakan untuk menghitung aliran di saluran pembawa adalah sebagai berikut :

$$Q = V \times A \quad (27)$$

$$V = \frac{1}{n} \times R^{2/3} \times S^{1/2} \quad (28)$$

Dengan :

- Q = Debit (m<sup>3</sup>/dt)
- V = Kecepatan rata – rata (m/dt)
- R = Jari – jari hidrolis (m)
- S = Kemiringan dasar saluran
- n = Koefisien kekasaran

Diameter dan tebal minimum *waterway* ditentukan berdasarkan persamaan yang juga dilakukan untuk penstock karena keduanya menggunakan pipa bertekanan.

#### f. **Surge Tank**

persamaan – persamaan yang digunakan untuk menghitung bagian-bagian pada *surge tank* adalah sebagai berikut :

- Penampang *surge tank* ( $A_{ch}$ )
$$A_{ch} = 1,25 \times \frac{V_{ad}}{2g} \times \frac{L_{ad} \times A_{ad}}{(H_d - h_{ww}) \times (h_{ww})} \quad (29)$$

- Internal diameter *surge tank* ( $D_{ch}$ )
$$D_{ch} = \sqrt{\frac{4A_{ch}}{\pi}} \quad (30)$$

#### g. **Pipa Pesat (Penstock)**

Perhitungan diameter dan tebal pipa *penstock* adalah berdasarkan persamaan berikut :

- Warnick's formula (1984)
$$D = \left( \frac{0,72 \times P^{0,43}}{H_r^{0,63}} \right) \quad (31)$$

- Bier (1945)
$$D = 0,176 \times \left( \frac{P}{H_r} \right)^{0,466} \quad (32)$$

- Sarkaria's formula (1979)
$$D = 0,176 \times \frac{P^{0,35}}{H_r^{0,65}} \quad (33)$$

- Moffat's formula (1990)
$$D = \left( \frac{0,52 \times P^{0,43}}{H_r^{0,60}} \right) \quad (34)$$

- USBR (1986)
$$D = \left( \frac{1,517 \times Q^{0,5}}{H_r^{0,25}} \right) \quad (35)$$

- Flashbusch (1987)
$$D = \left( \frac{1,12 \times Q^{0,5}}{H_r^{0,12}} \right) \quad (36)$$

Dengan :

P = Daya yang dihasilkan (kW)

H<sub>r</sub> = Tinggi jatuh efektif (m)

Q = Debit rencana (m<sup>3</sup>/dt)

Adapun perhitungan ketebalan pipa *penstock* adalah sebagai berikut:

- Persamaan USBR (1984)
$$D = \frac{D+500}{400} \quad (37)$$

- Persamaan Pacific G. & E.Co.
$$t = \frac{D}{288} \quad (38)$$

- Persamaan ASME
$$t = 2,5D + 1,2 \quad (39)$$

Dengan :

t = Tebal pipa pesat (m)

D = Diameter pipa pesat (m)

#### h. **Saluran Pembuang Akhir (Tailrace)**

Pada *tailrace* digunakan saluran persegi untuk penampangnya digunakan persamaan

yang umum pada saluran persegi, sama seperti saluran transisi.

#### i. **Kehilangan Tinggi Aliran (Head Loss)**

Kehilangan tinggi tekan aliran merupakan turunnya besar energi akibat gesekan, kontraksi, perubahan diameter dan belokan yang terjadi selama proses pengaliran dari *intake* menuju *tailrace*.

#### **Tinggi Jatuh Efektif (Effective Head)**

tinggi jatuh efektif dapat diperoleh dari selisih antara tinggi jatuh kotor (H<sub>gross</sub>) dengan total kehilangan tinggi ( $\Sigma H_L$ ).

$$H_{eff} = H_{gross} - (\Sigma H_L) \quad (40)$$

Dengan :

H<sub>eff</sub> = Tinggi jatuh efektif (m)

H<sub>gross</sub> = Tinggi jatuh kotor (m)

$\Sigma H_L$  = Total kehilangan tinggi (m)

#### **Turbin dan Generator**

##### a. **Kecepatan Putar Turbin**

persamaan empiris untuk mengetahui nilai kecepatan spesifik turbin (N<sub>QE'</sub>) dan kecepatan putar pada turbin francis adalah sebagai berikut (ESHA, 2004:169) :

$$N_{QE}' = \frac{1,924}{H^{0,512}} \quad (41)$$

$$n = N_{QE}' \times \frac{(g \times H_{eff})^{0,75}}{Q^{0,5}} \quad (42)$$

Dengan :

N<sub>QE'</sub> = Kecepatan spesifik turbin

n = Kecepatan putar turbin (t/s)

g = Percepatan gravitasi (m/dt<sup>2</sup>)

H<sub>eff</sub> = Tinggi jatuh efektif (m)

Q = Debit pada turbin (m<sup>3</sup>/dt)

##### b. **Kecepatan Putar Turbin**

Untuk menghitung kecepatan sinkron generator digunakan persamaan berikut:

$$p = \frac{120 \times f}{N'} \quad (43)$$

Dengan :

p = Jumlah kutub (*pole*)

f = Frekuensi pada generator (Hz)

N' = Kecepatan putar turbin

#### **Daya dan Energi**

##### a. **Daya**

daya atau tenaga yang dibangkitkan oleh suatu Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$P = 9,81 \times Q \times \eta_t \times \eta_g \times H_{eff} \quad (44)$$

Dengan :

$P$  = Daya (kW)  
 $\eta_t$  = Efisiensi turbin  
 $\eta_g$  = Efisiensi generator  
 $Q$  = Debit pembangkit ( $m^3/dt$ )  
 $H_{eff}$  = Tinggi jatuh efektif (m)

#### b. Energi

Persamaannya adalah sebagai berikut :

$$E = P \times 24 \times n \quad (45)$$

Dengan :

$P$  = Daya (kW)

$n$  = Jumlah hari

#### Analisa Kelayakan Ekonomi

Analisa ekonomi dilakukan untuk mengetahui layak atau tidaknya suatu proyek dari aspek ekonomi. Adapun indikator yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. BCR (*Benefit Cost Ratio*) yang dimana nilainya harus  $> 1$  untuk dikatakan layak.

$$BCR = \frac{PV \text{ dari manfaat}}{PV \text{ dari biaya}} \quad (46)$$

Dengan :

$PV$  = *Present Value*

$BCR$  = *Benefit Cost Ratio*

2. NPV (*Net Present Value*) yang dimana nilainya harus  $> 0$  (positif) untuk dikatakan layak.

$$NPV = PV \text{ Benefit} - PV \text{ Cost} \quad (47)$$

Dengan :

$PV$  = *Present Value*

$NPV$  = *Net Present Value*

3. IRR (*Internal Rate of Return*) yang merupakan nilai suku bunga untuk mencapai nilai  $B/C = 1$
4. *Payback Periode* yang merupakan jangka waktu pengembalian semua biaya yang telah dikeluarkan.

$$PP = \frac{I}{Ab} \quad (48)$$

Dengan :

$I$  = Besarnya biaya investasi

$A_b$  = *Benefit* yang diperoleh setiap tahun

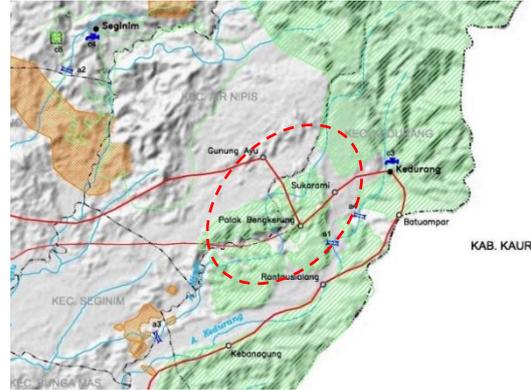
$PP$  = *Payback Periode*

## METODOLOGI

### Deskripsi Daerah Studi

Lokasi studi perencanaan PLTM Batu Balai berada pada aliran sungai Bengkenang yang terletak di Desa Sukarami, Kecamatan Air Nipis, Kabupaten Bengkulu Selatan, Provinsi Bengkulu. Secara geografis Kabupaten Bengkulu Selatan terletak pada  $4^{\circ}10' - 4^{\circ}32'$  LS dan  $102^{\circ}48' - 103^{\circ}16'$  BT. Serta sungai Bengkenang mengalir pada Sub DAS Batu Balai dengan luas DAS yaitu

sebesar  $103,41 \text{ Km}^2$ .



Gambar 5. Lokasi Pekerjaan PLTM

### Data yang Diperlukan

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

1. Data curah hujan
2. Data klimatologi
3. Data topografi

### 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 dilakukan dalam pengujian data adalah Metode RAPS (*Rescaled Adjusted Partial Sum*), untuk mengetahui tingkat homogenitas data yang digunakan dalam perencanaan PLTM, karena data yang digunakan tidak seluruhnya pada tingkat akurasi dan ketelitian yang baik.
  - b. Melakukan Uji Abnormalitas Data  
Metode yang digunakan dalam pengujian keabnormalitasan data adalah *inlier – Outlier*, yang dimana tujuan dari pengujian ini adalah untuk memastikan apakah bisa atau tidaknya data yang sudah didapat untuk digunakan dalam perencanaan PLTM.
  - c. Analisa Frekuensi menggunakan Log Pearson III dan Gumbel
  - d. Menguji kesesuaian distribusi menggunakan metode *Smirnov-Kolmogorov* dan *Chi Square*.
  - e. Menghitung hujan jam-jaman.
  - f. Menghitung debit banjir rancangan menggunakan HSS Nakayasu dan

HSS GAMA I.

- g. Menghitung debit andalan menggunakan F.J. Mock dan FDC (*Flow Duration Curve*).
- 2. Merencanakan dimensi bangunan yang meliputi bendung (*weir*), bangunan pengambilan (*intake*), saluran transisi, kantong lumpur (*sandtrap*), *surge tank*, dan saluran pembuang akhir (*tailrace*).
- 3. Merencanakan diameter saluran pembawa (*waterway*) dan pipa pesat (*penstock*).
- 4. Menghitung kehilangan tinggi.
- 5. Menentukan tinggi jatuh efektif.
- 6. Menentukan jenis turbin yang digunakan.
- 7. Menghitung optimasi energi, *capacity factor*.
- 8. Menghitung Analisa Kelayakan Ekonomi

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

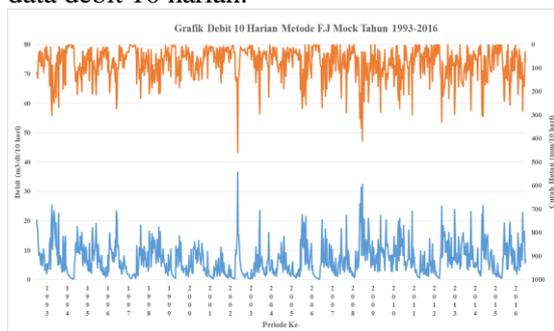
**Debit Banjir Rancangan**

Berdasarkan analisa yang dilakukan, banjir yang digunakan menggunakan metode HSS Nakayasu karena paling sesuai dengan ketinggian muka air banjir rencana di lokasi studi. Adapun hasil perhitungan debit banjir rancangan metode HSS Nakayasu Adalah sebagai berikut:

- $Q_{2th} = 194,647 \text{ m}^3/\text{dt}$
- $Q_{5th} = 247,433 \text{ m}^3/\text{dt}$
- $Q_{10th} = 276,144 \text{ m}^3/\text{dt}$
- $Q_{50th} = 326,318 \text{ m}^3/\text{dt}$
- $Q_{100th} = 343,504 \text{ m}^3/\text{dt}$

**Debit Andalan**

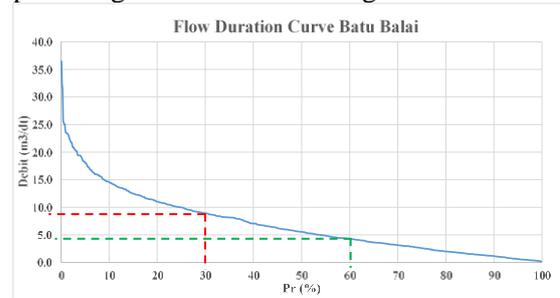
Berdasarkan analisa yang dilakukan menggunakan metode F.J. Mock untuk membangkitkan data hujan menjadi data debit didapatkan grafik perbandingan hujan dengan data debit 10 harian.



Gambar 6. Grafik Debit Rerata 10 Harian

Pada studi ini dihitung besar dari debit andalan dengan tingkat keandalan antara 30%-60% (*Colorado Small Hydropower*, 2015:22) untuk kebutuhan PLTM Batu Balai. Serta hasil

perhitungan FDC adalah sebagai berikut:



Gambar 7. Kurva Durasi Aliran

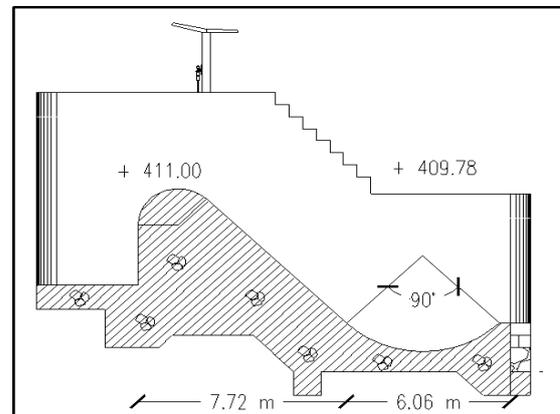
Berdasarkan pertimbangan *capacity factor* dan *energy cost*, maka debit desain yang digunakan yaitu debit dengan keandalan  $Q_{45\%}$  dengan debit sebesar  $6,234 \text{ m}^3/\text{dt}$ .

**Analisa Hidrolika dan Dimensi Bangunan**

**a. Bendung (*Weir*)**

Bendung yang digunakan yaitu bendung tetap yang menggunakan mercu bulat. Adapun dimensinya adalah sebagai berikut:

- Debit desain  $Q_{100th} = 343,50 \text{ m}^3/\text{dt}$
- Lebar bendung = 30,00 m
- Tinggi bendung = 4,00 m
- Tinggi dinding bendung = 8,00 m
- Elevasi lantai bendung = + 407,00 m
- Bangunan peredam energi yang digunakan yaitu tipe bak tenggelam karena pada lokasi studi sungai terdiri dari material batuan bongkah/boulder sehingga meminimalisir terjadinya kerusakan.
- Jari-jari kolam olak = 4,00 m

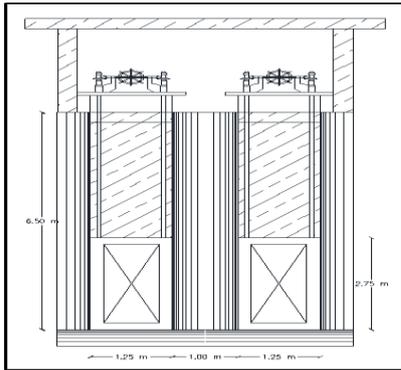


Gambar 8. Bendung dan Kolam Olak

**b. Bangunan Pengambilan (*Intake*)**

Dasar intake yang di rencanakan lebih tinggi 1,5 m dari lantai bendung (+408,50 m).

- Debit desain ( $1,2 \times Q_p$ ) =  $7,481 \text{ m}^3/\text{dt}$
- Lebar Intake = 3,50 m
- Jumlah pintu = 2 buah @ 1,25 m
- Tinggi pintu = 2,75 m
- Tinggi bukaan = 2,20 m

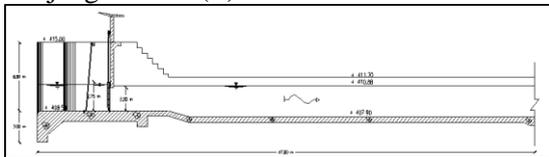


Gambar 9. Pintu Intake

**c. Saluran Transisi**

Saluran transisi ini pada PLTM Batu Balai menggunakan saluran persegi dengan dimensi sebagai berikut:

- Debit desain ( $1,2 \times Q_p$ ) = 7,481 m<sup>3</sup>/dt
- Lebar saluran = 3,50 m (intake)
- Tinggi muka air = 1,282 m (*trial error*)
- Koefisien manning (n) = 0,017 (batu pasang)
- Slope saluran = 0,0012
- Panjang saluran (L) = 47 m



Gambar 10. Saluran Transisi

**d. Kantong Lumpur (Sandtrap)**

Kantong lumpur (*Sandtrap*) direncanakan trapesium pada tampungan material, dan persegi pada bagian atas dengan detail:

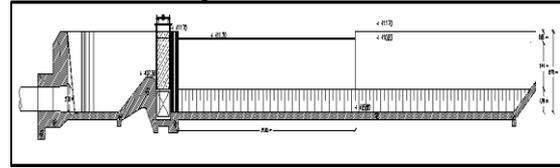
- Debit desain ( $1,2 \times Q_p$ ) = 7,481 m<sup>3</sup>/dt
- Volume sedimen 7 hari = 452,459 m<sup>3</sup>
- Lebar atas = 5,00 m
- Kedalaman air = 3,74 m
- Lebar bawah = 3,50 m
- Kecepatan bilas = 1,2 m/dt
- Tinggi pembilasan = 1,76 m
- Slope pembilasan = 0,000416
- Tinggi jagaan = 0,50 m
- Total tinggi = 6,00 m
- Panjang *sandtrap* = 51,50 m
- Cek Nilai L/B > 8 = 51,50 / 5 = 10,30

Perencanaan *Sandtrap* pada PLTM Batu Balai ini berfungsi juga untuk menenangkan air sementara sebelum memasuki *waterway*. Berdasarkan persamaan tinggi minimum didapat tinggi minimum 5,00 m dari dasar *waterway*.

$$\begin{aligned} \text{Tinggi total sandtrap} &= H_{\text{safety}} + H_{\text{ma}} + f \\ &= 0,5 + 5,0 + 0,5 \\ &= 6,00 \end{aligned}$$

$$\text{Volume sudden shut off} = 1122,170 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume sandtrap} = 1416,250 \text{ m}^3$$



Gambar 11. Potongan memanjang *sandtrap*

**e. Saluran Hantar (Waterway)**

Perhitungan diameter *waterway*:

Tabel 2. Tabel Analisa Diameter *Waterway*

Persamaan	D (m)	V (m/dt)
JICA	1,798	2,457
ESHA 1	3,156	0,797
ESHA 2	1,782	2,500
Direncanakan	1,80	2,54

Untuk jenis pipa *waterway* digunakan pipa berjenis GRP (*Glass Fiber Reinforced Plastic*) oleh karena itu tebal pipa berdasarkan spesifikasi yang diberikan oleh produsen pipa.

Tabel 3. Tabel perhitungan Tebal Pipa GRP

Nominal Diameter	Pipe Outer Diameter	Coupling Internal Diameter	Coupling Width
DN (mm)	OD (mm)	Di (mm)	L (mm)
1100	1127,3	1129,8	260
1500	1535,6	1538,1	275
1600	1637,6	1640,1	275
1800	1841,7	1844,2	275
2000	2045,8	2048,8	275

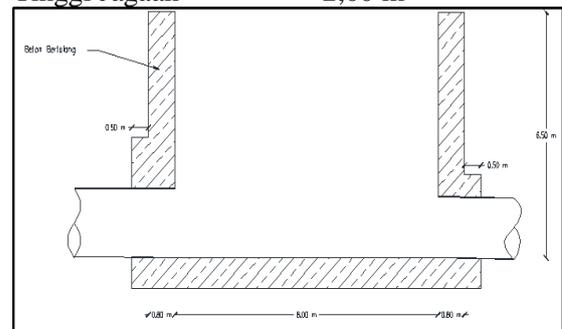
$$\begin{aligned} \text{Ketebalan waterway} &= (OD - DN) / 2 \\ &= 20,85 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{Panjang waterway} = 604,449 \text{ m}$$

**f. Surge Tank**

Diameter *surge tank* PLTM Batu Balai adalah sebagai berikut:

- Penampang *surge tank* = 12,467 m<sup>2</sup>
- Diameter internal = 7,94 m ≈ 8,00 m
- Tinggi *surge tank* = 6,44 m ≈ 6,50 m
- Tinggi Jagaan = 2,00 m



Gambar 12. Potongan *Surge Tank*

**g. Pipa Pesat (Penstock)**

Total panjang *penstock* yaitu 621,805 m serta perhitungan diameter dan tebal pipa *penstock* berdasarkan persamaan berikut :

Tabel 4. Tabel Analisa Diameter *Penstock*

Persamaan	D (m)	V (m/dt)
Warnick	1,905	2,189
Bier	1,141	6,102
Sarkaria	1,742	2,616
Moffat	1,540	3,349
USBR	1,480	3,625
Falschbusch	1,626	3,006
<b>Rerata</b>	<b>1,572</b>	
<b>Direncanakan</b>	<b>1,60</b>	<b>3,10</b>

Adapun diameter percabangan yaitu :

$$\begin{aligned} \text{Debit pembangkitan} &= 0,5 \times Q_p \\ &= 3,117 \text{ m}^3/\text{dt} \\ \text{Kecepatan pipa} &= 3,102 \text{ m/dt} \\ \text{Luas penampang} &= \frac{Q_p}{V} \\ &= 1,005 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Diameter *penstock* percabangan

$$\begin{aligned} \varnothing &= \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \\ &= 1,131 \text{ m} \approx 1,10 \text{ m} \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama dengan Tabel 3 dapat dihitung tebal pipa *penstock*:

$$\begin{aligned} \text{tebal } penstock \text{ utama} &= (OD - DN) / 2 \\ &= 18,80 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{tebal } penstock \text{ cabang} &= (OD - DN) / 2 \\ &= 13,65 \text{ mm} \end{aligned}$$

#### h. Saluran Pembuang Akhir (*Tailrace*)

Air yang telah keluar melalui draft tube turbin maka akan dibuang melalui saluran *tailrace* kembali ke sungai Bengkenang.

$$\begin{aligned} \text{Debit desain (1} \times Q_p) &= 6,234 \text{ m}^3/\text{dt} \\ \text{Lebar saluran} &= 6,00 \text{ m} \\ \text{Tinggi muka air} &= 1,00 \text{ m} \\ \text{Panjang saluran} &= 218,00 \text{ m} \\ \text{Slope} &= 0,0005 \end{aligned}$$

#### i. Kehilangan Tinggi Aliran (*Head Loss*)

Kehilangan tinggi tekan aliran pada PLTM Batu Balai yaitu 3,9489 m dengan rincian sebagai berikut:

Tabel 5. *Head Loss*

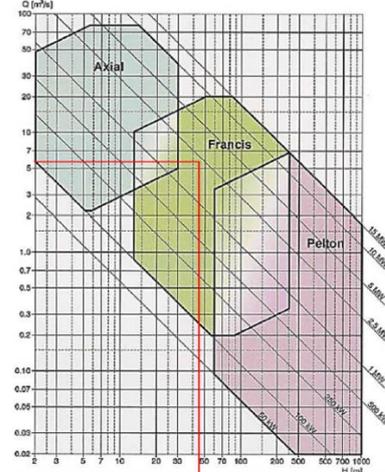
No.	Lokasi <i>Headloss</i>	Nilai <i>Headloss</i>	Satuan
1	<i>Trashrack intake</i>	0,0054	m
2	Pintu <i>intake</i>	0,0585	m
3	Gesekan saluran transisi	0,0542	m
4	Belokan saluran transisi	0,0035	m
5	Kantong lumpur	0,0491	m
6	<i>Headpond</i>	0,0019	m
7	<i>Trashrack headpond</i>	0,0017	m
8	Inlet <i>waterway</i>	0,1531	m
9	Perubahan diameter <i>waterway</i>	0,0485	m
10	Gesekan pipa <i>waterway</i>	0,853	m
11	Belokan <i>waterway</i>	0,0107	m
12	Inlet <i>penstock</i>	0,2453	m
13	Gesekan pipa <i>penstock</i>	1,6447	m
14	Belokan 1 <i>penstock</i>	0,0049	m
15	Belokan 2 <i>penstock</i>	0,0098	m
16	Belokan 3 <i>penstock</i>	0,0294	m
17	Perubahan diameter <i>penstock</i>	0,1128	m
18	Percabangan <i>penstock</i>	0,3139	m
19	Valve akhir <i>penstock</i>	0,2943	m
20	<i>Tailrace</i>	0,1048	m
<b>Total <i>Headloss</i> ΣH<sub>L</sub></b>		<b>3,9489</b>	<b>m</b>

#### Tinggi Jatuh Efektif (*Effective Head*)

$$\begin{aligned} H_{eff} &= H_{gross} - (\Sigma H_L) \\ H_{eff} &= 46,8257 - 3,9489 \\ &= 42,877 \text{ m} \end{aligned}$$

#### Turbin dan Generator

Pemilihan jenis turbin dengan grafik :



Gambar 13. Penentuan Jenis Turbin Kecepatan Turbin dan Generator dapat dihitung sebagai berikut:

Frekuensi generator = 50 Hz

Kecepatan sinkron generator

$$p = 6,00$$

Kecepatan putar terkoreksi

$$\begin{aligned} N' &= \frac{120 \times f}{p} \\ &= 1000 \text{ rpm} \end{aligned}$$

Kecepatan spesifik

$$\begin{aligned} N_{QE'} &= \frac{N'}{60} \times \frac{Q^{0,5}}{(g \times H)^{0,75}} \\ &= 0,317 \end{aligned}$$

#### Daya dan Energi

Untuk daya pada PLTM Batu Balai menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} P &= 9,81 \times \eta_t \times \eta_g \times Q_p \times H_{eff} \\ &= 9,81 \times 0,92 \times 0,93 \times 6,234 \times 42,877 \\ &= 2246,54 \text{ kW} \\ &= 2,20 \text{ MW} \end{aligned}$$

Artinya karena menggunakan 2 buah turbin maka besar daya listrik sebesar (2 × 1,1 MW), adapun energi yang diproduksi merupakan energi tahunan dengan nilai 12,18 GWh dengan nilai faktor kapasitas sebesar 63,19%

#### Analisa Kelayakan Ekonomi

Usia guna bangunan diestimasi selama 20 tahun, dimana biaya pada proyek ini 30% berasal dari biaya investasi dan 70% sisanya

menggunakan pinjaman. Perhitungan indikator ekonomi menggunakan persamaan 46 – 48 dengan hasil sebagai berikut:

Biaya Modal	= Rp 27.892.389.783,16
Pinjaman	= Rp 65.082.242.827,38
O&P	= Rp 829.911.347,93 tahunan
Benefit (i : 6,5%)	= Rp 204.743.351.693,96
B/C	= 1,599
NPV	= Rp 76.725.259.450,03
IRR	= 11,53%
Payback	= 5.69 tahun
	= 5 tahun 8 bulan 12 hari

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa yang telah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Debit rancangan yang digunakan yaitu debit dengan kala ulang 100 tahun ( $Q_{100th}$ ) yaitu sebesar 343,504 m<sup>3</sup>/dt. Dan debit andalan yang digunakan pada perencanaan PLTM Batu alai sebesar 6,234 m<sup>3</sup>/dt dengan keandalan 45% ( $Q_{40}$ ).
2. Pada perencanaan PLTM Batu Balai bangunan pendukung yang diperhitungkan yaitu bendung, *intake*, saluran transisi, *sandtrap*, *surge tank*, *tailrace*. Diameter pada *waterway* yaitu sebesar 1,80 m dengan tebal 20,85 mm sedangkan pada *penstock* utama sebesar 1,60 m dengan tebal 18,00 mm ; serta *penstock* percabangan sebesar 1,10 m dengan tebal 13,65 mm.
3. Turbin yang digunakan adalah turbin Francis Horizontal dengan daya yang dihasilkan sebesar (2 × 1,1 MW). Berdasarkan optimasi didapat energi tahunan sebesar 12,18 GWh dengan faktor kapasitas sebesar 63,19%.
4. Parameter yang digunakan pada analisa ekonomi yaitu BCR, NPV, IRR, dan *Payback Periode* secara teoritis keempatnya memenuhi syarat.

### Saran

Agar perencanaan PLTM Batu Balai atau PLTM lainnya dapat optimal dan lebih efisien, sebaiknya memperhatikan hal-hal dibawah:

1. Karena debit yang digunakan hanya berasal dari data hujan yang dibangkitkan, maka perlu adanya pengamatan debit pada lokasi studi. Untuk menambah akurasi data debit.
2. Pembangunan PLTM ini tentu melibatkan kegiatan ekonomi yang sangat kompleks dan meluas, sehingga diharapkan potensi tersebut dapat dimanfaatkan seluas-luasnya oleh masyarakat sekitar. Terutama pada masyarakat sekitar lokasi studi PLTM Batu Balai.
3. Diharapkan PLTM Batu Balai ini mempertimbangkan nilai pembangunan yang berkelanjutan (*sustainable development*), dengan upaya melibatkan semua elemen disekitar lokasi dalam menjaga DAS Batu Balai supaya sistem PLTM terus berjalan dengan baik bahkan melebihi usia guna yang direncanakan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Department Of Energy. (2001). *Small Hydropower Systems*. United States : National Renewable Energy Laboratory
- Japan International Corporation Agency. (t.th). *Manual Pembangunan PLTMH*. (t.t) : (t.p)
- Limantara, L.M. (2010). *Hidrologi Praktis*. Bandung : Lubuk Agung
- Penche, Celso. (2004). *Guidebook on How to Develop a Small Hydro Site* . Belgia : ESHA (European Small Hydropower Association)
- Kumar, A.& Schei, T. (2011). *Hydropower, In IPCC Special Report on Renewable Energy Resources and Climate Change Mitigation*. United Kingdom : Cambridge University Press
- Superlit Pipeline Industries. (Tanpa Tahun). *Glass Fiber Reinforced Polyester (GRP) Pipelines Technical Information*. Turki : Superlit Pipelines Industries
- The Colorado Energy Office. (2015). *The Small Hydropower Handbook*. Colorado : Colorado Energy Office