

KAJIAN POTENSI SUNGAI SRINJING UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO (PLTMH) BRUMBUNG DI KABUPATEN KEDIRI

Agus Indarto¹, Pitojo Tri Juwono², Rispiningtati³

¹Mahasiswa Program Magister Teknik Pengairan Universitas Brawijaya Malang.

²³Dosen Jurusan Teknik Pengairan Universitas Brawijaya Malang.

Abstrak: PLTMH Brumbung terletak di hulu Sungai Srinjing. Potensi debit PLTMH Brumbung tergantung dari besarnya debit pola operasi bukaan pintu 1 Waduk Siman yang digunakan untuk mengaliri baku sawah sebesar 4.852 Ha.

Untuk memperoleh skala optimal dalam pembangunan PLTMH makadilakukan optimasi debit pembangkitan dan unit pembangkit agar mendapatkan PLTMH yang ekonomis.

Debit andalan hasil optimasi yang digunakan sebagai dasar dalam perencanaan PLTMH Brumbung adalah debit andalan 75 % (Q_{75}) yaitu sebesar 3,394 m³/dt dengan debit per unit pembangkit adalah sebesar 1,697 m³/dt dan kapasitas terpasang sebesar 50 kW. Dengan debit tersebut dan tinggi jatuh efektif yang berfluktuasi berkisar antara 4,944 m sampai dengan 5,140 m, maka didapatkan produksi energi tahunan sebesar 875.785,980 kWh untuk dua unit pembangkit dengan turbin Crossflow.

Kata kunci: Mikrohidro, optimasi debit, unit pembangkit

Abstract: MHP Brumbung is located at upstream of Srinjing River. Potential discharge MHP Brumbung depends on the discharge of the gate 1 operation of Siman dam which is used to irrigate 4852 Ha Siman crop area.

To obtain the optimal scale in the construction of the MHP to be optimized flow generation and generating units in order to obtain an economical MHP.

Dependable discharge optimization results are used as a basic for discharge planning of Brumbung MHP is discharge with 75% probability that is equal to 3.394 m³/dt with the discharge for one unit installed capacity is equal to 1.697 m³/dt and installed capacity of 50 kW, with fluctuating effective head ranged from 4.944 m to 5.140 m, the annual energy production obtained 875,785.980 kWh for two generating units with a turbines Crossflow.

Keywords: Micro hydropower, discharge optimization, installed capacity

Kebutuhan listrik dewasa ini akan terus meningkat seiring dengan membaiknya kondisi perekonomian, pertambahan jumlah penduduk, dan peningkatan pembangunan.

Pembangunan PLTMH Brumbung yang terletak di Desa Brumbung Kecamatan Kepung Kabupaten Kediri dilaksanakan pada tahun 1975 dan diresmikan pada tahun 1976. PLTMH Brumbung awal pembangunannya menggunakan generator Sincron dengan daya 40 kW. Karena adanya program listrik masuk desa pada tahun 1992, PLTMH Brumbung berhenti beroperasi. Sedangkan aset yang berupa peralatan pembangkit beserta jaringan telah dilelang. Dan aset berupa bangunan sipil mulai mengalami kerusakan.

Melihat potensi PLTMH Brumbung dan mengingat meningkatnya kebutuhan masyarakat akan kebutuhan listrik, maka usaha menghidupkan kembali

PLTMH Brumbung dapat dilakukan. Oleh karena itu, kegiatan studi kelayakan PLTMH Brumbung sangat diperlukan mengingat banyak faktor yang harus diperhatikan dalam pembangunan PLTMH untuk penyediaan listrik perdesaan agar pembangunan tersebut dapat memberikan manfaat secara optimal dan berkelanjutan. Selain itu hasil kegiatan ini dapat dijadikan dasar perencanaan dan penyusunan program bagi kebijakan ketenagalistrikan daerah-daerah di Kabupaten Kediri.

Rumusan Masalah

Berdasarkan batasan masalah di atas, maka permasalahan pada kajian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana optimasi debit dalam penentuan unit pembangkit?

2. Berapa tinggi jatuh efektif yang digunakan?
3. Bagaimana jenis turbin yang dipilih?
4. Berapa besar daya dan energi yang dihasilkan rumah pembangkit berdasarkan optimasi unit pembangkit?
5. Bagaimana kelayakan ekonominya?

Kajian Pustaka

1. Debit Andalan

Debit andalan didefinisikan sebagai debit yang tersedia guna keperluan tertentu misalnya untuk keperluan irigasi, PLTA, air baku dan lain-lain sepanjang tahun, dengan resiko kegagalan yang telah diperhitungkan (C.D. Soemarto, 1986:214). Dalam perencanaan suatu PLTMH, debit perencanaan menggunakan debit andalan (*dependable discharge*). Hal tersebut dimaksudkan guna menentukan debit yang diharapkan tersedia di sungai untuk memperkirakan besarnya kapasitas terpasang.

Lengkung durasi aliran (*flow duration curve*) adalah suatu grafik yang memperlihatkan debit sungai dan selama beberapa waktu tertentu dalam satu tahun. Lengkung durasi aliran digambarkan dari data-data debit, sekurang-kurangnya selama 10 tahun.

2. Pipa Pesat (*Penstock*)

Pipa pesat adalah suatu pipa tekan yang berfungsi untuk mengalirkan air dari embung atau dari bak penenang ataupun langsung dari head race tunnel ke turbin.

a. Diameter Pipa Pesat

Untuk mendapatkan diameter pipa pesat dapat menggunakan rumus sebagai berikut: (anonim dalam Juwono, 1992:58)

$$H_o < 50 \text{ m} ; D = 0,749 \times Q_p^{0,404} \quad (1)$$

b. Tebal Pipa Pesat

Perhitungan tebal pipa pesat menggunakan Ballow's Formulae (Varshney, 1997: 412) sebagai berikut:

$$H \frac{0,002 \text{ xt}}{D \ 0,002t} \quad (2)$$

dengan:

- H : tinggi tekan statis + tinggi tekan akibat pukulan air (m)
 : tegangan baja yang digunakan (ton/m²)
 D : diameter pipa pesat (m)
 T : tebal pipa pesat (m)

c. Kehilangan Tinggi Tekan

Persamaan umum kehilangan tinggi tekan adalah sebagai berikut: (Linsley, 1985:307)

$$hl = k \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

Dimana:

- hl = jumlah kehilangan tinggi (m)
 v = kecepatan aliran (m/dt)
 g = percepatan gravitasi (m/dt²)
 k = nilai koefisien kehilangan tinggi, meliputi: Koefisien kehilangan tinggi tekan akibat saringan (*Trashrack*), akibat pemasukan (*entrance losses*), akibat belokan, akibat mulut pipa, akibat Katup, akibat gesekan (*friction losses*).

d. Water Hammer

Untuk menentukan besarnya kenaikan tekanan air akibat *water hammer* (pukulan air) digunakan persamaan (Arismunandar dalam Juwono, 1992:32) sebagai berikut:

a. Untuk $T < \frac{2L}{g}$, menurut Joukovsky:

$$h = \frac{v}{g} \quad (4)$$

b. Untuk $T > \frac{2L}{g}$,

$$h = \frac{N \times H}{2} \frac{H}{2} \sqrt{N^2 - 4N} \quad (5)$$

dengan:

- T : waktu yang digunakan untuk menutup katup
 L : panjang terowongan tekan dan pipa pesat
 : kecepatan rambatan tekan, untuk air = 1440m/dt
 g : percepatan gravitasi (m/dt²)

$$N = \frac{L \ V_m}{g \ T \ H} \quad (6)$$

V_m : kecepatan aliran rata-rata (m/det)

3. Tail Water Level (TWL)

Tail Water Level (TWL) adalah elevasi muka air bawah. Debit air yang keluar dari turbin berfluktuasi mengakibatkan perubahan tinggi air dalam saluran.

4. Tinggi Jatuh Efektif (H_{eff})

Persamaan tinggi jatuh efektif adalah sebagai berikut:

$$H_{\text{eff}} = E_{\text{MAW}} - \text{TWL} - h_l \quad (7)$$

Dimana:

H_{eff} = Tinggi jatuh efektif (m)

E_{MAW} = Elevasi muka air waduk (m)

TWL = Tail Water Level/elevasi muka air di saluran bawah (m)

h_l = kehilangan tinggi tekan(m)

5. Daya

Daya merupakan energi tiap satuan waktu, besarnya daya yang dihasilkan dihitung dengan persamaan (Patty,1995:14) sebagai berikut:

$$P = 9,8 \times H_{\text{eff}} \times Q \times \eta \quad (8)$$

dengan:

P : Daya (kW)

H_{eff} : Tinggi jatuh efektif (m)

Q : Debit outflow (m³/dtk)

η : Efisiensi

6. Energi

Produksi energi tahunan dihitung berdasarkan tenaga andalan.

$$E = 9,8 \times H \times Q \times \eta \times 24 \times n \quad (9)$$

$$= P \times 24 \times n$$

dengan:

E : Energi tiap satu periode (kWH)

H : Tinggi jatuh efektif (m)

Q : Debit outflow (m³/dtk)

η : efisiensi

n : jumlah hari dalam satu periode.

7. Turbin

Berdasarkan prinsip kerja turbin adalah (Suryono, 6).

1. Runner turbin impuls berputar di udara karena mendapat pancaran air.
2. Runner turbin reaksi berputar didalam air oleh energi dalam bentuk tekanan dan kinetik.

Kecepatan Spesifik adalah besarnya putaran turbin yang geometris serupa sehingga pada $H = 1$ menghasilkan daya 1 kW (Patty, 1995:94).

$$ns = n \frac{P^{\frac{1}{3}}}{H^{\frac{5}{4}}} \quad (10)$$

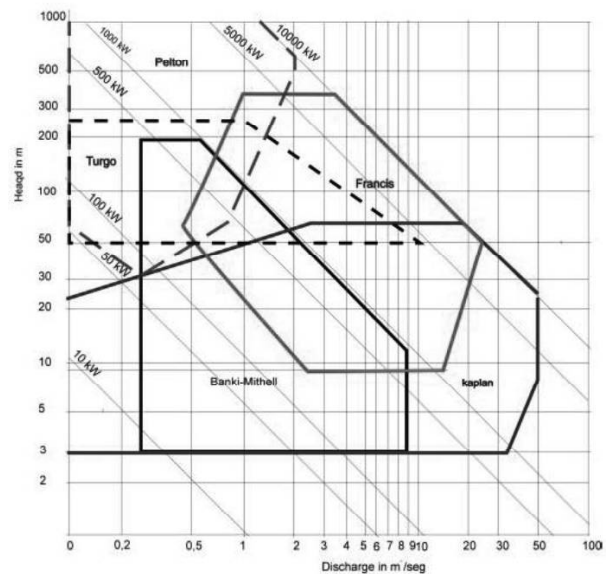
dengan:

ns : kecepatan spesifik

n : putaran turbin (rpm)

P : Daya yang keluar (kW)

H : Tinggi jatuh efektif (m)



Gambar 1. Diagram Aplikasi berbagai Jenis Turbin (Head Vs Debit)

8. Bangunan Pengambilan (Intake)

Untuk perencanaan pintu bilas digunakan rumus:

$$Q = \mu \cdot b \cdot h \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot z} \quad (13)$$

Di mana:

Q = debit rencana (m³/dtk)

b = lebar pintu (m)

h = tinggi bukaan pintu intake (m)

g = gaya gravitasi (9,8 m/dtk²)

z = beda tinggi muka air di hulu dan di hilir intake (m)

μ = koefisien konstruksi (0,85 – 0,90).

9. Saluran Pengarah

Saluran pengarah direncanakan untuk mengalirkan air dari bendung menuju ke bak pengendap sedimen, sebesar debit andalan dengan perhitungan sebagai berikut:

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot s^{\frac{1}{2}} \cdot Q \cdot v \cdot A \quad (14)$$

Di mana:

Q = debit rencana (m³/dtk)

n = koefisien kekasaran manning

v = kecepatan aliran (m/dtk)

R = jari-jari hidraulik (m)

s = kemiringan dasar saluran

A = luas (m²)

10. Bak Pengendap

Bak pengendap merupakan bangunan yang berfungsi penangkap sedimen yang ukurannya lebih besar dari ukuran minimum yang dapat merusak turbin.

$$LB \frac{Q}{w} \tag{16}$$

di mana:

- H = kedalaman aliran saluran, m
- w = kecepatan endap partikel sedimen, m/dt
- L = panjang kantong lumpur, m
- Q = debit saluran, m³/dt
- B = lebar kantong lumpur, m

Dimensi bak pengendap sebaiknya juga sesuai dengan kaidah bahwa $L/B > 8$, untuk mencegah agar aliran tidak “meander” di dalam kantong.

11. Analisa Ekonomi

- a. Benefit (Komponen Manfaat)

Manfaat Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro didasarkan pada tenaga listrik yang dihasilkan tiap tahun dan hasil penjualan listrik kepada PLN.
- b. Cost (Komponen Biaya)

Pada analisis kelayakan ekonomi, biaya-biaya tersebut dikelompokkan menjadi dua, yaitu biaya modal dan biaya tahunan (Kodatie,1995:71)

12. Indikator Kelayakan Ekonomi

Indikator kelayakan ekonomi meliputi:

- 1. Metode Net Present Value

$$NPV = PV \text{ Benefit} - PV \text{ Cost} \tag{17}$$
- 2. Metode Benefit Cost Ratio

$$BCR = \frac{PV \text{ dari manfaat}}{PV \text{ dari biaya}} \tag{18}$$

3. Metode Internal Rate of Return

$$IRR = \frac{NPV'}{NPV' + NPV''} (I' + I'') \tag{19}$$

Metodologi Penelitian

1. Kondisi Daerah Studi

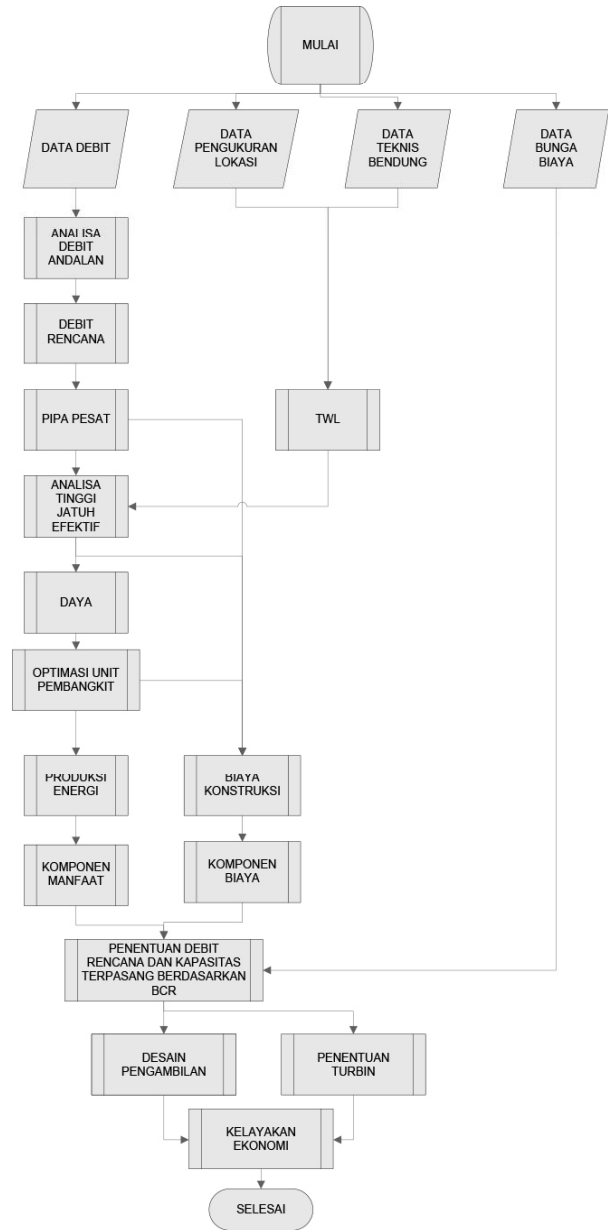
Desa Brumbung terletak di wilayah Kecamatan Kepung Kabupaten Kediri PLTMH Brumbung ter-



Gambar 2. Lokasi PLTMH Brumbung

letak pada koordinat: 07° 48' 30" LS dan 112° 17' 48" BT. Potensi debit PLTMH Brumbung tergantung dari besarnya debit pola operasi bukaan pintu 1 Waduk Siman yang digunakan untuk mengalir ke bahu sawah sebesar 4.852 Ha.

2. Alur Pengerjaan Studi



Gambar 3. Diagram alir penelitian

Hasil Analisa

1. Analisis Debit Andalan

Untuk memperoleh debit sesuai dengan keandalannya, maka harus dibuatkan kurva durasi aliran (*flow duration curve*). Gambar kurva durasi aliran ditunjukkan pada gambar4.

2. Skala Optimal Pembangunan PLTMH

Dalam pembangunan suatu PLTMH, memiliki prioritas dalam pembangunannya. Prioritas tersebut bisa meliputi:

1. Ekonomi
2. Keuntungan sosial
3. Tujuan dari pelaku usaha.

Ketika prioritas ekonomi yang melatarbelakangi pembangunan suatu pembangunan PLTMH, maka pengambilan keputusan dalam perencanaannya harus memperhitungkan skala optimal dalam pembangunan. Untuk mencari skala optimal pembangunan PLTMH, komponen-komponen biaya pembangunan termasuk perawatannya dan energi listrik yang dihasilkan yang merupakan komponen manfaat. Hal tersebut bisa dilakukan dengan mencoba-coba debit bangkitan dan kapasitas terpasang yang ekonomis dengan indikasi kelayakan ekonomi meliputi BCR.

a. Optimasi Debit Pembangkitan

Dalam rencana mengoptimasi PLTMH dalam studi ini, maka dicoba-coba dengan empat debit rencana berdasarkan debit andalan menurut Suyono yang diperoleh grafik FDC, yaitu:

1. Q_{97} : 2,920 m³/dt (tersedia 97% sepanjang tahun/debit musim kering)
2. Q_{75} : 3,394 m³/dt (tersedia 75% sepanjang tahun/debit air rendah)
3. Q_{51} : 4,366 m³/dt (tersedia 51% sepanjang tahun/debit air normal)
4. Q_{26} : 6,084 m³/dt (tersedia 26% sepanjang tahun/debit air cukup)

Dalam studi ini direncanakan dengan dua unit pembangkit PLTMH. Besar masing-masing unit pembangkit direncanakan sama, maka besar debit rencana adalah:

1. Q_{97} per unit : 1,460 m³/dt
2. Q_{75} per unit : 1,697 m³/dt
3. Q_{51} per unit : 2,183 m³/dt
4. Q_{26} per unit : 3,042 m³/dt

b. Pipa Pesat (*Penstock*)

- Diameter Pipa Pesat (*Penstock*)

Karena head dalam studi ini rendah maka diameter pipa pesat (*penstock*) diperoleh dengan menggunakan persamaan (1). Adapun hasil perhitungan diameter pipa pesat untuk masing-masing debit rencana akan disajikan pada tabel 1.

- Pukulan Air (*Water Hammer*)

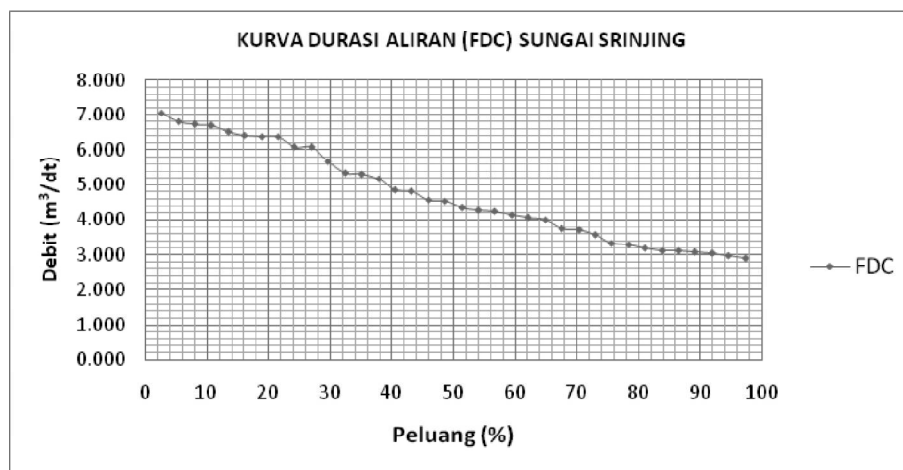
Untuk menghitung kenaikan air akibat pukulan air dibutuhkan data-data:

1. Debit pembangkitan maksimum
2. Panjang pipa pesat,
3. Diameter pipa pesat,
4. $H = EI \text{ MABP} - \text{TWL}$
5. Kecepatan rambat tekanan air, = 1440 m/dt
6. Waktu yang digunakan untuk menutup katup, ($T_{rencana}$)

Kenaikan air dicari dengan menggunakan persamaan $2L / < T_{rencana}$. Untuk perhitungan pukulan air (*water hammer*) dengan debit rencana yang lain akan disajikan pada tabel 1

- Tebal Pipa Pesat

Pipa pesat direncanakan terbuat dari B_j 37 sehingga memiliki tegangan (σ) sebesar 1600 ton/m². Tebal pipa juga memperhitungkan kenaikan tinggi tekanan akibat *water hammer*. Untuk keamanan akibat korosif, tebal pipa pesat ditambah 3 mm. Untuk perhitungan tebal pipa dengan debit rencana yang lain akan disajikan pada tabel 1.



Gambar 4. Kurva Durasi Aliran (*flow duration curve*) Sungai Srinjing

c. Analisa Tinggi Jatuh

- Kehilangan Tinggi Tekan

Persamaan umum kehilangan tinggi tekan (Weber, 1971:105) adalah:

$$h_l = k \frac{V^2}{2g}$$

Hasil perhitungan jumlah koefisien kehilangan tinggi tekan pada pipa pesat akan disajikan pada tabel 2.

Kehilangan tinggi tekan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan diatas. Dan hasil perhitungan akan disajikan pada tabel3.

- Tail Water Level (TWL)

TWL atau *Tail Water Level* merupakan elevasi muka air bawah.

Jika direncana: Penampang saluran berbentuk trapesium dengan $b = 1$ m, $h = 0.75$ m, $m = 1$, $n = 0,017$, $s = 0,01$, Elevasi dasar tail race +282,00

Perhitungan tinggi air digunakan rumus manning sebagai berikut dan hasil perhitungan disajikan pada tabel:

$$Q = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} A$$

$$5,882 = \frac{h \cdot h^{\frac{5}{3}}}{1 \cdot 2\sqrt{2}h^{\frac{2}{3}}}$$

- Tinggi Jatuh Efektif (H_{eff})

Parameter yang berpengaruh pada nilai tinggi jatuh efektif adalah Elevasi muka air bak penenang dan kehilangan tinggi tekan yang berfluktuasi tiap periode serta TWL (tail water level).

d. Optimasi Unit Pembangkit

Pada studi ini, dalam menentukan efisiensi turbin dipilih turbin Banki-Mitchell (turbin *crossflow*). Pemilihan ini berdasarkan gambar 1 dengan data head 5,5 m dan debit rencana dengan rentang besaran 1,460 – 3,042 m³/dt. Turbin ini memiliki efisiensi 0.75. Untuk efisiensi generator dipakai nilai sebesar 0,9.

Optimasi unit pembangkit dilakukan dengan mencoba-coba kapasitas terpasang berdasarkan besaran daya teoritis yang dihasilkan. Perhitungan daya teoritis untuk debit Q_{97} didapatkan daya teoritis 48,5405 - 48,6351 kW, maka dilakukan coba-coba untuk kapasitas terpasang 40 kW dan 50 kW. Perhitungan daya teoritis untuk debit Q_{75} didapatkan daya teoritis 49,5541 - 55,555 kW, maka dilakukan coba-coba untuk kapasitas terpasang 50 kW dan 60 kW. Perhitungan daya teoritis untuk debit Q_{51} didapatkan daya teoritis 51,0616 - 69,8793 kW, maka dilakukan coba-coba untuk kapasitas terpasang 50 kW, 60 kW dan 70 kW. Perhitungan daya teoritis untuk debit Q_{26} didapatkan daya teoritis 52.1890 – 93.3708 kW, maka dilakukan coba-coba untuk kapasitas terpasang 50 kW, 60 kW, 70 kW, 80 kW, 90 kW dan 95 kW.

e. Produksi Energi Tahunan

Perhitungan banyaknya energi yang dihasilkan pembangkit dalam satu tahun menggunakan rumus:

$$E = P \times 24 \times n$$

Untuk hasil perhitungan produksi energi tahunan untuk alternatif debit andalan dan kapasitas terpasang akan disajikan pada tabel 4.

Tabel 1. Perhitungan Diameter, Water Hammer dan Tebal pipa pesat (*penstock*).

No	Debit	Q per unit	L	D	Perhitungan Water Hammer					Perhitungan tebal pipa			
					H	A	V	N	h	Hmax	t	t tot	
1	Q97	1.46	8	0.93	5.582	0.679	2.15	0.00143	0.118	5.700	1600	3.312	6.312
2	Q75	1.697	8	0.98	5.546	0.754	2.251	0.00049	0.124	5.670	1600	3.471	6.471
3	Q51	2.183	8	1.09	5.479	0.933	2.34	0.00054	0.129	5.608	1600	3.819	6.819
4	Q26	3.042	8	1.24	5.377	1.208	2.518	0.00065	0.139	5.516	1600	4.273	7.273

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 2. Nilai total koefisien kehilangan tinggi tekan pada pipa pesat

No	Q Rencana (m ³ /dt)	Q per unit (m ³ /dt)	D (m)	K1 (saringan)	K2 (pemasukan)	K3 (Mulut pipa)	K4 (Katup)	K5 (Belokan)	K6 (Gesekan)	K total	
1	Q ₉₇	2.920	1.460	0.93	0.484	0.563	0.500	0.200	0.440	0.155	2.342
2	Q ₇₅	3.394	1.697	0.98	0.484	0.563	0.500	0.200	0.440	0.147	2.334
3	Q ₅₁	4.366	2.183	1.09	0.484	0.563	0.500	0.200	0.440	0.125	2.312
4	Q ₂₆	6.084	3.042	1.24	0.484	0.563	0.500	0.200	0.440	0.106	2.293

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 3. Hasil perhitungan kehilangan tinggi tekan, TWL dan Tinggi jatuh efektif

No	Debit	Q manfaat (m ³ /dt)	Kehilangan tinggi tekan hl	TWL (m)	Tinggi Jatuh efektif (m)
1	Q ₉₇	1,460	0.548 ~ 0.551	282.417 ~ 282.418	5.031 ~ 5.035
2	Q ₇₅	1,697	0.443 ~ 0.602	282.417 ~ 282.454	4.944 ~ 5.140
3	Q ₅₁	2,183	0.287 ~ 0.645	282.417 ~ 282.521	4.834 ~ 5.296
4	Q ₂₆	3,042	0.170 ~ 0.742	282.417 ~ 282.623	4.635 ~ 5.413

Sumber: Hasil perhitungan

- f. Penentuan Debit Rencana dan Kapasitas Terpasang PLTMH berdasarkan BCR
- Komponen Manfaat
 - Dalam memperhitungkan komponen manfaat didasarkan pada penjualan listrik ke PLN.
 - Usia Guna : 20 tahun
 - Tingkat Suku Bunga (i) : 12%
 - Perhitungan ditampilkan pada tabel 4.
 - Komponen Biaya
 - Komponen biaya dihitung berdasarkan harga pipa pesat dan unit pembangkit.
 - BCR dari Optimasi Debit dan Optimasi Kapasitas Terpasang
 - BCR (*benefit cost ratio*) merupakan salah indikator kelayakan ekonomi yaitu dengan membandingkan komponen manfaat dengan kompo-

Tabel 4. Hasil Perhitungan total produksi energi dan nilai sekarang manfaat (PV manfaat)

No	Q andalan	Daya Terpasang per unit	Total Produksi Energi per Tahun (2 unit)	Harga Per KWH	TOTAL MANFAAT (rp)	Faktor Konversi (P/A,12,20)	TOTAL PV MANFAAT(Rp)
1	Q ₉₇	40.000	700,800.000	525.00	367,920,000.00	7.469	2,747,994,000.00
2	Q ₉₇	50.000	852,040.910	525.00	447,321,477.75	7.469	3,341,044,000.00
3	Q ₇₅	50.000	875,785.980	525.00	459,787,639.50	7.469	3,434,154,000.00
4	Q ₇₅	60.000	958,355.040	525.00	503,136,396.00	7.469	3,757,926,000.00
5	Q ₅₁	50.000	876,000.000	525.00	459,900,000.00	7.469	3,434,993,000.00
6	Q ₅₁	60.000	1,024,791.910	525.00	538,015,752.75	7.469	4,018,440,000.00
7	Q ₅₁	70.000	1,111,431.350	525.00	583,501,458.75	7.469	4,358,172,000.00
8	Q ₂₆	50.000	876,000.000	525.00	459,900,000.00	7.469	3,434,993,000.00
9	Q ₂₆	60.000	1,030,921.860	525.00	541,233,976.50	7.469	4,042,477,000.00
10	Q ₂₆	70.000	1,126,956.040	525.00	591,651,921.00	7.469	4,419,048,000.00
11	Q ₂₆	80.000	1,214,092.470	525.00	637,398,546.75	7.469	4,760,730,000.00
12	Q ₂₆	90.000	1,299,336.960	525.00	682,151,904.00	7.469	5,094,993,000.00
13	Q ₂₆	95.000	1,315,678.760	525.00	690,731,349.00	7.469	5,159,072,000.00

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 5. Perhitungan Komponen Biaya

No	Q andalan	Q m ³ /dt	P kW	Kurs US \$	PIPA PESAT			N (unit)	Harga Pipa Pesat		Harga M/E 2 Unit Pembangkit (Rp)	TOTAL BIAYA
					LPT	n	DP		CPS (US \$)	CPS (Rp)		
1	Q ₉₇	1.460	40	9266	8	0.012	0.93	2	11,347.28	105,144,000.00	630,940,600.00	736,084,600.00
2	Q ₉₇	1.460	50	9266	8	0.012	0.93	2	11,347.28	105,144,000.00	746,722,600.00	851,866,600.00
3	Q ₇₅	1.697	50	9266	8	0.012	0.98	2	12,377.85	114,693,000.00	746,722,600.00	861,415,600.00
4	Q ₇₅	1.697	60	9266	8	0.012	0.98	2	12,377.85	114,693,000.00	876,302,300.00	990,995,300.00
5	Q ₅₁	2.183	50	9266	8	0.012	1.09	2	14,768.55	136,845,000.00	746,722,600.00	883,567,600.00
6	Q ₅₁	2.183	60	9266	8	0.012	1.09	2	14,768.55	136,845,000.00	876,302,300.00	1,013,147,300.00
7	Q ₅₁	2.183	70	9266	8	0.012	1.09	2	14,768.55	136,845,000.00	992,084,300.00	1,128,929,300.00
8	Q ₂₆	3.042	50	9266	8	0.012	1.24	2	18,293.21	169,505,000.00	746,722,600.00	916,227,600.00
9	Q ₂₆	3.042	60	9266	8	0.012	1.24	2	18,293.21	169,505,000.00	876,302,300.00	1,045,807,300.00
10	Q ₂₆	3.042	70	9266	8	0.012	1.24	2	18,293.21	169,505,000.00	992,084,300.00	1,161,589,300.00
11	Q ₂₆	3.042	80	9266	8	0.012	1.24	2	18,293.21	169,505,000.00	1,107,866,300.00	1,277,371,300.00
12	Q ₂₆	3.042	90	9266	8	0.012	1.24	2	18,293.21	169,505,000.00	1,223,646,000.00	1,393,151,000.00
13	Q ₂₆	3.042	95	9266	8	0.012	1.24	2	18,293.21	169,505,000.00	1,281,537,000.00	1,451,042,000.00

Sumber: Hasil perhitungan

nen biaya. Adapun perhitungan BCR untuk adalah sebagai berikut:

$$\text{BCR} = \text{PV manfaat} / \text{PV Biaya}$$

Dengan melihat hasil perhitungan BCR maka dapat diputuskan debit desain menggunakan debit rencana 2 (Q_{75}) yaitu 3,394 m³/dt dengan debit per unit pembangkitan sebesar 1,697 m³/dt serta kapasitas terpasang per unit sebesar 50 kW.

3. Perencanaan Bangunan Pembangkit dan Sipil a Turbin

Berdasarkan debit maksimum yang mengalir adalah 1,697 m³/dt dan tinggi jatuh efektif maksimum yang terjadi adalah 4,944 m, jenis turbin yang sesuai adalah turbin *crossflow* atau turbin Banki.

1) Diameter Runner Bagian Luar

Berdasarkan Persamaan perhitungan diameter runner bagian luar adalah:

- Tinggi jatuh efektif pada saat Q_{\max} , $H = 4,944$ m
- Direncanakan kecepatan putaran turbin, $N = 150$ rpm,

$$D = 38,93 \frac{H^{0,5}}{N} = 0,577 \text{ m} \approx 0,6 \text{ m}$$

2) Diameter Runner Bagian Dalam

Apabila direncanakan perbandingan diameter runner bagian dalam dan (D_1) dan diameter runner bagian luar (D) adalah 2:3, maka

$$D_1 = \frac{2}{3}D = 0,38 \text{ m} \approx 0,4 \text{ m}$$

3) Tinggi lorong nozzle (s)

$$s = \frac{D_1 \sin}{360} = 0,123 \text{ m}$$

4) Lebar Nozzle atau runner (W)

$$W = \frac{Q}{s.c.\sqrt{2.g.H_{\text{eff}}}} = 1,46 \text{ m}$$

5) Jarak antar Sudu Turbin

Apabila direncanakan jumlah sudu turbin 24 bilah, maka berdasarkan Persamaan maka jarak antar sudu adalah sebagai berikut,

$$\text{Dr} = \frac{D_1 - D}{2} = 0,35 \text{ m}$$

$$t = \frac{\text{Dr}x}{n} = 0,046 \text{ m}$$

6) Kecepatan Spesifik

- Daya maksimum yang terjadi pada turbin, $P = 50$ kW
- Tinggi jatuh efektif ketika P_{\max} , $H_{\text{eff}} = 4,944$ m, dengan Persamaan (2.34) maka kecepatan spesifik turbin adalah

$$N_s = N \frac{P^{\frac{1}{5}}}{H^{\frac{3}{4}}} = 143,87 \text{ rpm} \approx 144 \text{ rpm}$$

Jadi kecepatan spesifik turbin adalah 144 rpm.

Tabel 6. Perhitungan BCR

No	Q andalan	Q per unit (m ³ /dt)	P (kW)	TOTAL PVMANFAAT(Rp)	TOTAL PV BIAAYA (Rp)	BCR
1	Q_{97}	1.460	40.000	2,747,994,000.00	824,415,000.00	3.33
2	Q_{97}	1.460	50.000	3,341,044,000.00	954,091,000.00	3.50
3	Q_{75}	1.697	50.000	3,434,154,000.00	964,785,000.00	3.56
4	Q_{75}	1.697	60.000	3,757,926,000.00	1,109,915,000.00	3.39
5	Q_{51}	2.183	50.000	3,434,993,000.00	989,596,000.00	3.47
6	Q_{51}	2.183	60.000	4,018,440,000.00	1,134,725,000.00	3.54
7	Q_{51}	2.183	70.000	4,358,172,000.00	1,264,401,000.00	3.45
8	Q_{26}	3.042	50.000	3,434,993,000.00	1,026,175,000.00	3.35
9	Q_{26}	3.042	60.000	4,042,477,000.00	1,171,304,000.00	3.45
10	Q_{26}	3.042	70.000	4,419,048,000.00	1,300,980,000.00	3.40
11	Q_{26}	3.042	80.000	4,760,730,000.00	1,430,656,000.00	3.33
12	Q_{26}	3.042	90.000	5,094,993,000.00	1,560,329,000.00	3.27
13	Q_{26}	3.042	95.000	5,159,072,000.00	1,625,167,000.00	3.17

Sumber: Hasil perhitungan

7) Kavitasi

- Direncanakan kecepatan putaran turbin adalah, $N = 150$ rpm
- Kecepatan spesifik turbin adalah, $N_s = 144$ rpm

Turbin akan aman terhadap kavitasi apabila $>$ crit, nilai crit berdasarkan persamaan

$$crit = 1,1 \cdot 0,28 \cdot \frac{1}{660} \cdot \frac{ns}{100}^3$$

$$0,308$$

Sedangkan nilai pada Bulan Januari periode I adalah

$$\frac{H_a \quad H_w \quad H_s}{H}$$

- Tekanan atmosfer apabila TWL pada elevasi 282,454, $H_a = 9,656$ m
- Tekanan uap pada suhu 20^0 adalah, $H_w = 0,24$ m
- Elevasi runner adalah +283,00
- Tinggi jatuh efektif Bulan Januari periode I, $H_{eff} = 4,944$ m

$$H_s = \text{Elevasi runner} - \text{Elevasi TWL} \\ = 283,00 - 282,454 \\ = 0,546 \text{ m}$$

$$\frac{9,656 \quad 0,240 \quad 0,546}{4,944}$$

$$1,794 \text{ m}$$

Nilai untuk semua bulan dan periode adalah 1,794 – 1,719. Jadi disimpulkan kondisi turbin aman terhadap kavitasi.

b. Bangunan Pengambilan

Kapasitas pengambilan harus sekurang-kurangnya 120% dari kebutuhan pengambilan guna menambah fleksibilitas dan agar dapat memenuhi kebutuhan yang lebih tinggi selama umur proyek. (Anonim/KP-02, 1986:113)

Perhitungan debit pengambilan adalah sebagai berikut:

$$Q_{desain \text{ total}} = 3,394 \text{ m}^3/\text{dt} \text{ (untuk 2 intake)} \\ Q_{desain} = 1,697 \text{ m}^3/\text{dt} \\ Q_{intake} = 1,20 \times 1,697 = 2,036 \text{ m}^3/\text{dt}$$

Dimana:

- Q = debit intake = $2,036 \text{ m}^3/\text{dt}$
= koefisien debit ; 0,80.
- b = lebar bersih bukaan, direncanakan sebesar 1,5m.
- a = tinggi bersih bukaan pintu, m.

g = percepatan gravitasi, $9,80 \text{ m}/\text{dt}^2$.

z = kehilangan tinggi energi pada bukaan, sebesar 0,1m.

maka

$$Q = \mu \cdot b \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot z} \\ 2,036 = 0,80 \cdot 1,50 \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot 9,80 \cdot 0,10} \\ a = 1,211 \cdot 1,2 \text{ m}$$

jadi dimensi pintu air 1,5 m x 1,2 m.

c. Saluran Pengarah

Hasil perhitungan dengan rumus manning didapatkan dimensi saluran sebagai berikut:

$$n = 0,015 \\ b = 1,5 \text{ m} \\ h = 1,2 \text{ m} \\ A = 1,8 \text{ m}^2 \\ P = 3,9 \\ R = 0,46154 \\ S = 0,00056 \\ Q = 1,697 \text{ m}^3/\text{dt}$$

d. Bak Pengendap

Bak pengendap ini juga berfungsi sebagai bak penenang (*head tank*) Dasar bagian saluran diperdalam atau diperlebar untuk menampung endapan sedimen.

Perhitungan dimensi bak pengendap adalah sebagai berikut:

$$Q_{desain} = 1,697 \text{ m}^3/\text{dt} \\ \text{Diameter butir} = 0,2 \text{ mm}$$

Berdasarkan grafik diameter dan kecepatan endap untuk air tenang, dengan $d = 0,2$ mm didapatkan $w = 30 \text{ mm}/\text{dt}$

$$LB = \frac{Qn}{w} \\ LB = 56,567$$

Dimensi pengendap sebaiknya disesuaikan dengan kaidah $L/B > 8$, untuk mencegah agar tidak “meander” di dalam kantong. Karena $L = 8B$

Dimasukkan dalam persamaan $LB = 56,567$

$$\text{Maka, } B = 56,567/8 \\ B = 2,651 \text{ m, diambil } 2,5 \text{ m} \\ L/B > 8 \\ L > 20 \text{ m}$$

Melihat kondisi lapangan masih memungkinkan untuk memperlebar tampungandan untuk mempertahankan kaidah $L/B > 8$ maka kantong harus dibagi kearah memanjang dengan dinding pemisah (*devider wall*). Maka kantong lumpur direncana dengan lebar

bersih (B) = 5 m dan panjang 20 m. Untuk kedalaman ujung kantong lumpur 1 m untuk jaringan kecil (sampai 10 m³/dt) dan 2,50 m untuk saluran yang sangat besar (100 m³/dt).

4. Analisa Kelayakan Ekonomi

- Cost (Biaya)

Hidromekanikal (pipa pesat dan unit pembangkit)	= Rp. 964,785,000.00
Biaya sipil (intake, saluran pengarah, bak pengendap, power house, tail race, dan pintu air)	= Rp. 725.737.000,00
Biaya langsung	= Rp. 1.690.522.000,00
Biaya contingencies	= Rp. 84.526.100,00
Biaya engineering	= Rp. 84.526.100,00
Biaya modal	= Rp. 1.859.574.200,00
Biaya OP	= Rp. 18.595.742,00

- Benefit (manfaat)

Komponen manfaat pada studi ini sebesar:
 Nilai Manfaat = Rp. 459.787.639,50

a. PV (Present Value/ Nilai Sekarang)

Tahun dasar yang digunakan adalah tahun seleainya pengerjaan proyek, yaitu tahun 2013. Pelaksanaan proyek diperkirakan selama satu tahun, dimulai tahun 2012 sedangkan manfaat yang dihasilkan dari adanya proyek ini (mikrohidro) selama 20 tahun. Dan apabila tingkat suku bunga yang berlaku saat ini 12%.

- Biaya modal
PV biaya modal = Rp. 2.082.723.104,-
- Biaya O&P
PV biaya O&P = Rp. 138.891.597,00
- Manfaat
PV manfaat = Rp. 3.434.153.879,00

b. BCR

Adapun perhitungan B/C adalah sebagai berikut:

$$B/C = 1,55 > 1 \quad \text{Layak}$$

c. NPV

Besarnya *Net Present Value* berdasarkan nilai biaya dan manfaat diatas adalah sebagai berikut
 NPV = Rp 1.212.539.178,00

d. IRR

Internal Rate of Return (Tingkat Pengembalian Internal) didefinisikan sebagai tingkat suku bunga yang membuat manfaat dan biaya mempunyai nilai yang sama ($B - C = 0$) atau tingkat suku bunga yang membuat $B/C = 1$ (Kodoatie, 1995:112). Nilai IRR pembangunan PLTMH Brumbung sebesar 19,404%.

KESIMPULAN

Maka hasil dari studi ini dapat disimpulkan:

1. Debit andalan yang digunakan sebagai dasar dalam perencanaan PLTMH Brumbung adalah debit andalan 75 % (Q_{75}) yaitu sebesar 3,394 m³/dt. Dengan debit per unit pembangkit adalah sebesar 1,697 m³/dt.
2. Tinggi jatuh efektif yang terjadi berfluktuasi berkisar antara 4,944 m sampai dengan 5,140 m.
3. Berdasarkan tinggi jatuh efektif 4,944 m dan debit pembangkitan maksimum 1,697 m³/dt, maka dipilih turbin jenis Banki/ turbin Crossflow.
4. Kapasitas terpasang yang optimal sebesar 50 kW per unit pembangkit dengan produksi energi tahunan adalah sebesar 875.785,980 kWh untuk dua unit pembangkit.
5. Parameter yang digunakan dalam analisa kelayakan ekonomi BCR, NPV dan IRR, dan berdasarkan analisa ekonomi yang telah dilakukan diperoleh BCR sebesar 1,55; NPV sebesar Rp 1.212.539.178,00; dan IRR sebesar 19,404 %.

SARAN

1. Perlu adanya monitoring dan perawatan terhadap infrastruktur sipil PLTMH Brumbung sehingga usia ekonomis bangunan dapat diperpanjang.
2. Dengan potensi Sungai Srinjing yang sangat baik untuk pengembangan PLTMH dapat memberikan peluang untuk perusahaan daerah untuk mengembangkannya sehingga dapat meningkatkan pendapatan asli daerah.
3. Pemanfaatan PLTMH juga bisa digunakan untuk menunjang kegiatan industri rumah tangga dan kegiatan di sektor pertanian yang ada di sekitar desa Brumbung kecamatan Siman.

DAFTAR PUSTAKA

- Chow, Ven te. 1997. *Hidrolika Saluran Terbuka*. Jakarta: Erlangga.
- Dandekar, MM., dan Sharma, KN. 1991. *Pembangkit Listrik Tenaga Air*. Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia.
- Juwono, P.T. 1992. *Kajian Kemungkinan dibangunnya Pusat Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) pada Waduk Banjarejo Jawa Tengah*. Skripsi tidak diterbitkan. Malang: Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Kodatie, R.J. 1995. *Analisa Ekonomi Teknik*. Yogyakarta: Andi Offset.
- Kumar, K.L. 1976. *Engineering Fluid Mechanics*. New Delhi: Eurasia Publishing House.

- L. Grant, E. 1996. *Dasar-Dasar Ekonomi Teknik jilid 2*. Jakarta: Rineka Cipta.
- Linsey, R.K., dan Franzini, J.B. 1985. *Teknik Sumber Daya Air Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Linsey, R.K. dan Franzini, J.B. 1986. *Teknik Sumber Daya Air Jilid 2*. Jakarta: Erlangga.
- Patty, OF. 1995. *Tenaga Air*. Jakarta: Erlangga.
- Suryono. *Pengembangan Listrik tenaga Mini Hidro*. Malang: Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Varshney, R.S. 1977. *Hydro-Power Structure*. India: N.C Jain at the Roorkee Press.
- Webber, 1978. *Fluid Mechanics for Civil Engineers*. London: Halsted Press.