

POTENSI ENERGI TAHUNAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKRO HIDRO (PLTMH) BERDASARKAN SIMULASI WAKTU DI SUNGAI KEDUNG PASANG KABUPATEN PACITAN

Muhammad Abi Rafdi ¹⁾, Rintis Hadiani ²⁾, Solichin ²⁾

¹⁾ Mahasiswa Fakultas Teknik, Prodi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret

²⁾ Pengajar Fakultas Teknik, Prodi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret

Jl. Ir. Sutami 36A, Surakarta 57126; Telp. 0271-634524. Email: abi.rafdi.911@gmail.com

Abstrak

Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) adalah salah satu sumber energi alternatif yang ramah lingkungan serta relatif mudah untuk direalisasikan. Sejak tahun 1994, di Desa Nawangan, Kabupaten Pacitan terdapat PLTMH yang telah beroperasi, namun energi yang dihasilkan tidak mampu memenuhi kebutuhan pada saat musim kering terjadi, dan komponen PLTMH yang mengalami kerusakan telah menyebabkan penurunan tingkat efisiensi dan keandalan. Untuk mengatasi masalah tersebut akan dikaji ulang perhitungan potensi energi berdasarkan simulasi waktu operasional dan musim. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya potensi energi tahunan PLTMH berdasarkan debit andalan Q80, Q70, Q50 dan Q30, perbedaan potensi energi antara sebelum dan sesudah simulasi waktu serta memperoleh waktu operasi efektif PLTMH. Setelah merekapitulasi data hujan dan menguji konsistensi data hujan dengan metode analisis kurva linier massa ganda, evapotranspirasi dihitung menggunakan *software Cropwat*, debit sepanjang tahun dihitung dengan metode *F.J Mock*, kemudian debit andalan dihitung dengan metode *Basic Year*. Perhitungan potensi energi didapatkan dari pengolahan hasil *survey* kondisi eksisting PLTMH yaitu pengukuran bangunan eksisting serta tinggi jatuh (*head*) dan kemudian dihitung dengan rumus potensi energi secara fisika. Berdasarkan perhitungan, diperoleh nilai potensi energi tahunan PLTMH berdasarkan debit andalan Q80, Q70, Q50, dan Q30 berurutan sebesar 116342,516 kWh; 121531,367 kWh; 130339,711 kWh dan 128310,412 kWh. Setelah potensi energi dihitung menggunakan simulasi waktu operasional, diperoleh nilai potensi energi berurutan 92856,543 kWh; 98054,552 kWh; 115669,809 kWh dan 104217,597 kWh. Sedangkan potensi energi berdasarkan simulasi musim diperoleh 92128,858 kWh; 97770,770 kWh; 105573,01 kWh dan 103134,641 kWh. Untuk waktu operasional efektif PLTMH ditetapkan berdasarkan perhitungan energi dari debit andalan Q80 dengan simulasi waktu operasional yaitu PLTMH aktif pada 15 hari ke 1-13 (1 Januari – 15 Juli) kemudian dinonaktifkan pada 15 hari ke 14-22 (16 Juli-30 November) untuk keperluan *maintenance*, dan diaktifkan kembali pada 15 hari ke 23-24 (1-31 Desember).
Kata kunci : PLTMH, debit andalan, potensi energi, simulasi waktu, waktu operasional, *maintenance*

Abstract

Microhydro Powerplant (PLTMH) is one of many environment friendly energy source and it is easy to build. Since 1994, in Nawangan Village,, Pacitan regency there is a microhydro powerplant that was operating but the energy output was unable to meet the energy needs during dry season, and the powerplant damaged component has resulted in a decrease both in efficiency and reliability level. To overcome the problem, will be reviewed the calculation of energy potential based on simulation of operational time and season. This study aims to determine the amount of yearly energy potential of microhydro powerplant based on the dependable discharge of Q80, Q70, Q50, and Q30 and the energy potential difference between before and after the time-based simulation to obtain effective operating time of the microhydro powerplant. After the calculation of the rainfall data and testing the data consistency with double mass liner curve method, the evapotranspiration calculated using Cropwat software, then the yearly discharge were calculated using F.J Mock method. Calculation of energy potential obtained from the processing of survey results of the microhydro powerplant existing conditions, such as the existing building measurement and the falling height (head) and then calculated using physical energy potential formula. Based from the calculation, obtained the value of the microhydro powerplant energy potential based on the dependable discharge of Q80, Q70, Q50, and Q30 are 116342.516 kWh; 121531.367 kWh; 130339.711 kWh and 128310.412 kWh. After the energy potential calculated using a simulated operational time, obtained value of energy potential are 92856.543 kWh; 98054.552 kWh; 115669.809 kWh and 104217.597 kWh.. While the seasonal time-based simulation energy potential, obtained value of energy potential are 92128.858 kWh; 97770.770 kWh; 105573.01 kWh and 103134.641 kWh For the effective microhydro powerplant operational time is set based on the calculation of Q80 dependable discharge, where the microhydro powerplant is active from 1st of January to 15th of July, then went deactivated from 16th of July to 30th of November for maintenance and repair, and activated again on 1st to 31st December.

Keywords : Microhydro powerplant, dependable discharge, energy potential, time-based simulation, maintenance

PENDAHULUAN

Dewasa ini, keperluan akan energi untuk kelangsungan hidup sehari-hari sudah menjadi sebuah keharusan. Hal ini dikarenakan hampir semua peralatan dan kendaraan menggunakan energi untuk beroperasi, terutama energi listrik. Pada daerah Nawangan, Kabupaten Pacitan, sebagian wilayah belum mendapatkan energi listrik untuk bisa dinikmati masyarakat, telah dibangun Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) pada tahun 1994 lampau dan sempat beroperasi, namun *output* daya pada musim kemarau tidak dapat memenuhi kebutuhan masyarakat. Pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) ini akan dilakukan analisis potensi energi tahunan berdasarkan simulasi waktu. Energi tahunan yang dimaksud adalah total besarnya energi yang mampu dihasilkan oleh suatu unit pembangkit energi dalam kala waktu satu tahun, dimana di dalamnya terdapat beberapa variabel yang mempengaruhi seperti waktu dan kondisi operasional. Dengan tujuan untuk memperoleh hasil yang lebih mendetail, maka dilakukan simulasi waktu dengan debit andalan berdasar Q30, Q50, Q70, dan Q80. Analisis potensi energi ini sangat penting dilakukan untuk mendapatkan waktu operasi efektif (yang menghasilkan energi tertinggi) pada sistem PLTMH ini pada kurun waktu tertentu, sehingga dapat direncanakan waktu non-aktif untuk keperluan *maintenance* atau lainnya pada saat kurun waktu yang tidak efektif untuk beroperasi.

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

Data Survei Lapangan

Data lapangan didapat berdasarkan survei yang dilakukan pada tanggal 28 Februari 2013 di Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Nawangan pada pukul 10.00 – 15.00 WIB oleh Indra Bagus (2013).

Tabel 1. Dimensi dan Pengukuran Bendung

Pengukuran	Besar	Satuan
Tinggi Bendung	3	m
Lebar Bendung	4	m
Tinggi Jagaan Bendung Samping Kanan (y0-p)kanan	1	m
Tinggi Jagaan Bendung Samping Kiri (y0-p)kiri	2,5	m
Tinggi Sedimen 1	1,9	m
Tinggi Sedimen 2	1,78	m
Tinggi Sedimen 3	2,38	m
Koefisien Cr	0,9	m
Debit Sesaat (Q)	0,2712	m ³ /s

Tabel 1 menunjukkan hasil pengukuran dimensi bendung di PLTMH Nawangan.

Tabel 2. Dimensi dan Pengukuran Bak Penenang

Pengukuran	Besar	Satuan
Lebar	2,8	m
Panjang	13,7	m
Kedalaman	7,5	m
Volume	287,7	m ³

Tabel 2 menunjukkan hasil pengukuran dimensi bak penenang di PLTMH Nawangan.

Tabel 3. Dimensi dan Pengukuran Pipa Pesat

Pengukuran	Besar	Satuan
Panjang	48	m
Diameter	0,25	m
Material	Baja Galvalum	-
Banyak pipa	1	buah

Tabel 3 Menunjukkan hasil pengukuran pipa pesat (penstock) di PLTMH Nawangan.

Evapotranspirasi

Evapotranspirasi akan dihitung menggunakan metode Penmann Modifikasi dengan menggunakan perangkat lunak *Cropwat*.

Pengisian Data Hujan yang Hilang

Pengisian data hujan yang hilang akan dilakukan dengan metode *Reciprocal*, dimana metode ini dianggap lebih baik daripada metode *Normal Ratio* (Bambang Triatmodjo, 2006) untuk menghitung data hujan yang hilang karena memperhitungkan jarak antar stasiun (L_i), dengan menggunakan persamaan (1).

$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{L_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{L_i^2}} \dots\dots\dots (1)$$

dengan:

- P_x = data curah hujan pada stasiun X yang diperkirakan data hilang,
- P_i = data hujan disekitarnya pada periode yang sama,
- L_i = jarak antar stasiun.

Uji Konsistensi Data Hujan

Uji konsistensi hujan yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan metode kurva massa ganda (*Double Mass Curve*) dengan persamaan (2). Model regresi dikatakan sempurna apabila $R^2 = 1$.

$$R^2 = \frac{\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i / n}{\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 / n} \dots\dots\dots (2)$$

dengan :

- R^2 = koefisien deterministik,
- x_i = nilai kumulatif data hujan ke,
- y_i = nilai kumulatif rata-rata data hujan ke,
- n = jumlah data.

Curah Hujan Wilayah

Curah hujan wilayah pada penelitian ini dihitung menggunakan metode rata-rata aritmatik karena jarak antar stasiun hujan yang relatif dekat (<25km), menggunakan persamaan (3).

$$CH \text{ rerata} = \frac{\sum R_i}{n} \dots\dots\dots (3)$$

dengan:

- CH rerata = curah hujan rerata (mm),
- R_i = besarnya CH pada stasiun I (mm),
- n = jumlah stasiun hujan.

Metode *FJ Mock*

Metode Mock merupakan model neraca air yang dapat menghitung debit bulanan dari data curah hujan, evapotranspirasi, kelembaban tanah dan tampungan air tanah. Model neraca air Mock memberikan metode perhitungan yang relatif sederhana untuk berbagai macam komponen berdasarkan riset DAS di seluruh Indonesia (KP-01,2010).

Debit Andalan

Debit andalan adalah debit minimum sungai dengan kemungkinan debit terpenuhi dalam persentase tertentu, misalnya 90%, 80% atau nilai lainnya, sehingga dapat dipakai untuk kebutuhan tertentu (Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, 2009). Tingkat keandalan debit tersebut dapat terjadi, berdasarkan probabilitas kejadian mengikuti rumus *Weibull* pada persaaan (4) berikut.

$$P = \frac{i}{(n+1)} \times 100\% \dots\dots\dots (4)$$

dengan:

- i = Nomor urut debit,
- n = Jumlah data,
- P = Probabilitas terjadinya kumpulan nilai yang diharapkan selama periode pengamatan (%).

Metode *Basic Year*

Analisis *Basic Year* adalah analisa perhitungan debit hujan menggunakan data rata-rata tahunan. Langkah perhitungan debit andalan menggunakan metode *Basic Year* sebagai berikut :

1. Mengitung data debit andalan dengan metode.
2. Data debit tahunan diurutkan dari kecil ke besar.
3. Menghitung data yang digunakan sebagai acuan perhitungan dengan persamaan (4).

Menghitung Hidrolis Pipa dan Perencanaan Kemampuan Tenaga Air

Kerugian tinggi-tekan terdiri atas kerugian tinggi-tekan *mayor* dan *minor*, atau *head losses mayor* dan *head losses minor*. *Head losses mayor* disebabkan karena kerugian gesek di dalam pipa-pipa, dan *head losses minor* disebabkan karena kerugian di dalam belokan-belokan, reduser, katup-katup, dan sebagainya (Sularso dan Tahara, 2006).

Head Losses Mayor

Untuk menghitung kerugian gesek antara dinding pipa dengan aliran fluida tanpa adanya perubahan luas penampang di dalam pipa dapat dipakai persamaan Darcy-Weisbach pada persamaan (5) berikut.

$$hf = f \cdot Lv^2 \cdot D2g \dots\dots\dots(5)$$

dengan:

- hf = head loss mayor (m),
- f = koefisien gesekan,
- L = panjang pipa (m),
- D = diameter dalam pipa (m),
- v = kecepatan aliran dalam pipa (m/s),
- g = percepatan gravitasi (m/s²).

Head Losses Minor

Secara umum *head losses minor* dinyatakan pada persamaan (6) sebagai berikut.

$$h = K \cdot v^2 \cdot 2g \dots\dots\dots(6)$$

dengan:

- h = head loss minor,
- K = koefisien resistansi *valve* atau *fitting* berdasarkan bentuk dan ukuran
- v = kecepatan rata-rata aliran dalam pipa (m/s),

Tinggi Netto Turbin

Tinggi netto turbin secara umum dapat dihitung menggunakan persamaan (7) berikut ini.

$$H_{netto} = H_{statis} - hf_{total} \dots\dots\dots(7)$$

dengan:

- H_{netto} = tinggi jatuh efektif (mm),
- H_{statis} = tinggi jatuh bruto (mm),
- Hf_{total} = tinggi jatuh dari tekanan air yang hilang (mm).

Diameter Penstock

Menurut standar perencanaan mikro hidro diameter *penstock* dapat dihitung dengan persamaan (8) dan (9). Kemudian dicari nilai yang terbesar.

$$D = 0,72 \times (Q_{andalan})^{0,5} \dots\dots\dots(8)$$

dengan :

- D = Diameter *Penstock* (m),
- $Q_{andalan}$ = Debit andalan (m³/dt).

$$d = 2,69 \times \left(\frac{n^2 \times Q^2 \times L}{H} \right)^{0,1875} \dots\dots\dots(9)$$

dengan:

- d = diameter penstock (m)
- n = koefisien manning
- Q = debit maksimal melewati penstock (m³/dt)
- L = panjang pipa penstock (m)
- H = tinggi jatuh (m)

Tinggi Jatuh (head)

Tinggi jatuh yang digunakan merupakan tinggi jatuh efektif yang didapat dari tinggi jatuh bruto dikurangi tinggi jatuh dari tekanan air yang hilang Dapat dirumuskan sesuai persamaan (10) sebagai berikut.

$$H_{eff} = H_{bruto} - H_{losses} \dots\dots\dots(10)$$

dengan:

- H_{eff} = tinggi jatuh efektif (mm),
- H_{bruto} = tinggi jatuh bruto (mm),
- H_{losses} = tinggi jatuh dari tekanan air yang hilang (mm).

Daya yang Dapat Dihilangkan

Daya yang dihasilkan dapat menjadi estimasi awal yang dihitung dari tinggi jatuh efektif, debit andalan dan massa jenis air dan efisiensi alat. Untuk efisiensi alat tergantung dari jenis turbin yang digunakan, sehingga untuk turbin yang berbeda akan memberikan hasil daya yang berbeda, seperti persamaan (11).

$$P = \eta_t \times g \times Q_{\text{andalan}} \times H_{\text{eff}} \dots\dots\dots(11)$$

dengan:

- η_t = efisiensi turbin,
- P = daya yang dihasilkan (kW),
- g = percepatan gravitasi (m/dt²),
- Q_{andalan} = debit andalan (m³/dt),
- H_{eff} = tinggi jatuh efektif (m).

Perhitungan Potensi Energi Listrik

Energi listrik diperoleh dengan mengalikan hasil perhitungan daya listrik dengan waktu operasi PLTMH dalam periode 15 harian (360 jam), yaitu pada persamaan (12) berikut:

$$E = P \times T \dots\dots\dots(12)$$

dengan:

- P = daya yang dihasilkan (kW),
- T = waktu operasional PLTMH (jam).

Simulasi Waktu

Simulasi waktu yang digunakan sebagai dasar perhitungan di sini terdapat dua jenis, yaitu:

1. Simulasi waktu berdasarkan waktu operasional PLTMH dimana akan ditentukan dengan mampu tidaknya PLTMH memenuhi kebutuhan daya dari masyarakat Desa Nawangan. Di saat PLTMH tidak mampu memenuhi kebutuhan daya, maka PLTMH akan dinonaktifkan untuk keperluan *maintenance*.
2. Simulasi waktu berdasarkan interval musim. Dasar penentuan musim di sini ditentukan berdasarkan curah hujan pada interval 3 bulan. Dimana curah hujan tertinggi selama periode 3 bulan akan ditentukan sebagai musim hujan, kemudian dilanjutkan dengan interval musim berikutnya. Diperoleh empat keadaan yaitu:
 - a. Musim hujan,
 - b. Peralihan musim hujan-kemarau,
 - c. Musim kemarau, dan
 - d. Peralihan musim kemarau-hujan.

METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian ini dilakukan di site PLTMH Sungai Kedung Pasang Desa Nawangan, Kabupaten Pacitan, Jawa Tengah. Sungai ini terletak di wilayah DAS Grindulu yang memiliki luas 24,6 km². Data-data yang diperlukan antara lain data hujan harian tahun 2006-2015 dari tiga stasiun yang dipilih, peta DAS Grindulu skala 1:25000. Analisis data dilakukan dengan bantuan *Microsoft Excel*, *AutoCAD* dan *Google Earth*.

Penelitian yang pertama dilakukan adalah mengolah data survey dan data hujan, kemudian uji konsistensi data hujan yang diperoleh. Setelah itu dilakukan pengolahan data evapotranspirasi lalu dilanjutkan dengan perhitungan metode F.J Mock. Kemudian dilakukan perhitungan debit andalan metode *Basic Year* untuk nantinya dilakukan perhitungan potensi energi. Lalu dilakukan penentuan interval kedua simulasi waktu, dan menghitung potensi energi berdasarkan simulasi waktu. Kemudian menentukan waktu operasional efektif PLTMH.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Peta Stasiun Hujan dan DAS Grindulu

Stasiun hujan yang digunakan sebagai dasar analisis adalah stasiun hujan Nawangan, Bandar, dan Arjosari.

Stasiun hujan Nawangan koordinat 8° 2'7.20"S dan 111°10'39.26"E

Stasiun hujan Bandar koordinat 8° 1'52.60"S dan 111°13'29.30"E

Stasiun hujan Arjosari koordinat 8° 4'35.80"S dan 111° 9'54.31"E

Jarak antar stasiun sebagai berikut:

Tabel 4 Jarak Antar Stasiun Hujan Berpengaruh (km)

Stasiun	Nawangan	Bandar	Arjosari
Nawangan		5,22	4,78
Bandar	5,22		8,28
Arjosari	4,78	8,28	

Tabel 4 menunjukkan jarak stasiun hujan yang berpengaruh, dengan jarak terjauh adalah 8,28 km. Sedangkan DAS Grindulu adalah Sub-DAS dari DAS utama Grindulu-Lorog. Luas DAS yang diperoleh dari perhitungan menggunakan perangkat lunak *AutoCAD* adalah 24,608 km².

Evapotranspirasi

Data evapotranspirasi yang digunakan adalah hasil pengolahan dari data klimatologi Kabupaten Magetan yang diperoleh dari Dinas Navigasi Udara dan Badan Meteorologi TNI-AU. Dikerjakan menggunakan *software Cropwat 8.0*

Data Hujan

Data hujan harian yang digunakan diperoleh dari stasiun hujan Nawangan, Bandar, dan Arjosari dari tahun 2006 hingga tahun 2015. Dari data hujan harian dari stasiun kemudian direkapitulasi dalam bentuk data hujan 15 harian, yang akan digunakan untuk perhitungan hujan wilayah dengan metode rata-rata aritmatik.

Pengisian Data Hujan yang Hilang

Data hujan yang hilang diisi dengan menggunakan metode *reciprocal*. Pada penelitian ini diperoleh kehilangan data hujan pada bulan Desember 2009 dan Januari 2010 dari stasiun hujan Bandar.

Uji Konsistensi Data Hujan

Uji konsistensi data hujan pada penelitian ini digunakan metode analisis kurva massa ganda.

Perhitungan Grafik Hubungan Curah Hujan dan Hari Hujan

Setelah mengetahui curah hujan wilayah, maka dilakukan perhitungan untuk grafik hubungan curah hujan dan hari hujan. Jumlah hari hujan direkapitulasi menjadi periode tiap 15 hari.

Perhitungan Transformasi Hujan – Debit dengan Metode *F.J Mock*

Pada perhitungan ini sebelumnya telah diketahui data parameter yang akan digunakan dalam proses perhitungan sesuai dengan KP-01 sebagai berikut.

Tabel 5. Data Parameter DAS Grindulu

No	Parameter	Nilai
1	Catchment Area (Luas DAS) (km ²)	24,60852
2	SMC (mm)	200
3	k	0,8
4	I	0,2

Sumber: BBWS Bengawan Solo

Perhitungan metode Mock dilakukan terhadap data hujan 15 harian selanjutnya dengan tahapan yang sama, perhitungan dilanjutkan hingga tahun 2015. Kemudian menghitung korelasi antara *Water Surplus* dan *Run Off* untuk kontrol hasil perhitungan.

Tabel 6. Kontrol Perhitungan Metode Mock

Tahun	Korelasi WS-RO	Keterangan	Tahun	Korelasi WS-RO	Keterangan
2006	0.998	Ok	2011	0.998	Ok
2007	0.996	Ok	2012	0.997	Ok
2008	0.998	Ok	2013	0.998	Ok
2009	0.994	Ok	2014	0.997	Ok
2010	0.996	Ok	2015	0.999	Ok

Tabel 6 menunjukkan hasil perhitungan nilai korelasi antara *Water Surplus* dan *Run Off*, diperoleh nilai korelasi mendekati 1, maka perhitungan metode *F.J Mock* dinyatakan benar.

Analisis Debit Andalan Metode *Basic Year*

Debit andalan yang digunakan yaitu debit andalan dengan probabilitas 80% (Q80), 70% (Q70), 50% (Q50) dan 30% (Q30). Setelah mengurutkan debit dari kecil ke besar kemudian menentukan tahun debit andalan yang akan digunakan sebagai dasar perencanaan dengan rumus probabilitas *Weibull*.

1. Untuk Q80 = $\frac{10}{\frac{100\%}{(100\%-80\%)}} + 1$
= 3 (Tahun 2006)
2. Untuk Q70 = $\frac{10}{\frac{100\%}{(100\%-70\%)}} + 1$
= 4 (Tahun 2014)
3. Untuk Q50 = $\frac{10}{\frac{100\%}{(100\%-50\%)}} + 1$
= 6 (Tahun 2007)
4. Untuk Q30 = $\frac{10}{\frac{100\%}{(100\%-30\%)}} + 1$
= 8 (Tahun 2017)

Selanjutnya, dengan menggunakan setiap tahun dari debit probabilitas tersebut akan dilakukan perhitungan potensi daya dan energi dari PLTMH Nawangan.

Perhitungan Komponen Bangunan PLTMH Eksisting Penstock (Pipa Pekat)

Pada pipa pekat akan dilakukan perhitungan debit maksimal yang dapat melewati pipa pekat. Dengan mengetahui data pengukuran pipa pekat, debit maksimal yang melalui pipa pekat ini dihitung dengan 2 rumus yaitu pada persamaan (8) dan (9), yaitu:

1. Rumus 1

$$Q_{maks} = \left(\frac{D}{0,72}\right)^2$$

$$Q_{maks} = \left(\frac{0,25}{0,72}\right)^2$$

$$Q_{maks} = 0,121 \text{ m}^3/\text{dt}$$

2. Rumus 2

$$D = 2,69 \times \left(\frac{n^2 \times Q^2 \times L}{H}\right)^{0,1875}$$

$$0,25 = 2,69 \times \left(\frac{0,009^2 \times Q^2 \times 48}{18,361}\right)^{0,1875}$$

$$Q_{maks} = 0,121 \text{ m}^3/\text{dt}$$

Diperoleh hasil perhitungan debit maksimal melalui pipa pekat yang sama, maka dinyatakan sebagai berikut.

Jika $Q_{andalan} > Q_{maks \text{ pipa}}$ maka yang dipakai adalah $Q_{maks \text{ pipa}}$,

Jika $Q_{andalan} \leq Q_{maks \text{ pipa}}$ maka yang dipakai $Q_{andalan}$.

Perhitungan Tinggi Jatuh Efektif (H_{eff})

Tinggi jatuh yang digunakan adalah tinggi jatuh efektif (H_{eff}) yang diperoleh dari tinggi jatuh bruto (H_{bruto}) dikurangi tinggi jatuh dari tekanan air yang hilang. Perhitungan tinggi jatuh efektif adalah sebagai berikut.

1. Luas lingkaran pipa (A) = $\frac{1}{4} \times 3,14 \times d^2 = \frac{1}{4} \times 3,14 \times 0,25^2 = 0,0491 \text{ m}^2$

2. Kecepatan Aliran (v) = $\frac{Q_{80}}{A} = \frac{0,121}{0,0491} = 2,4551 \frac{\text{m}}{\text{dt}}$

3. Percepatan gravitasi (g) = $9,81 \text{ m}^2/\text{dt}$, Koefisien *Darcy-Weisbach* (f) = 0,003, Koefisien bentuk ujung pipa (k) = 0,5

4. Kehilangan energi primer (*major losses*), perhitungan dengan persamaan (5).

$$hf_1 = f \times \frac{Lv^2}{D \times 2g} = 0,003 \times \frac{48 \times 2,4551^2}{0,25 \times 2 \times 9,81} = 0,177 \text{ m}$$

5. Kehilangan energi pada awal pipa, perhitungan dengan persamaan (6).

$$hf_2 = k \times \frac{v^2}{2g} = k \times \frac{2,4551^2}{2g} = 0,1536 \text{ m}$$

6. Tinggi jatuh (H_{eff})

$$H_{eff} = H_{bruto} - (hf_1 + hf_2) = 18,361 \text{ m} - (0,17696 + 0,1536) = 18,03 \text{ m}$$

Untuk bangunan bendung dan bak penenang eksisting, tidak dilakukan perhitungan lebih lanjut karena hanya sebatas pengukuran volume dan tata letak bangunan.

Perhitungan Potensi Energi

Perhitungan Daya

Daya listrik yang dihasilkan dapat dihitung berdasarkan persamaan (11). Nilai η_t berkisar antara 0,8 – 0,95. Karena turbin eksisting merupakan turbin lama dan telah dipakai maka nilai η_t ditentukan sebesar = 0,8:

$$P = \eta_t \times g \times Q_{andalan} \times H_{eff}$$

$$P = 0,8 \times 9,81 \times 0,121 \times 18,03$$

$$P = 17,12 \text{ kW}$$

Perhitungan Potensi Energi Listrik

Energi listrik diperoleh dengan mengalikan hasil perhitungan daya listrik dengan waktu operasi PLTMH dalam periode 15 harian (360 jam), yaitu sebagai berikut:

$$E = P \times T$$

$$E = 17,12 \times 360$$

$$E = 6163,045 \text{ kWh}$$

Perhitungan Beban Energi Listrik

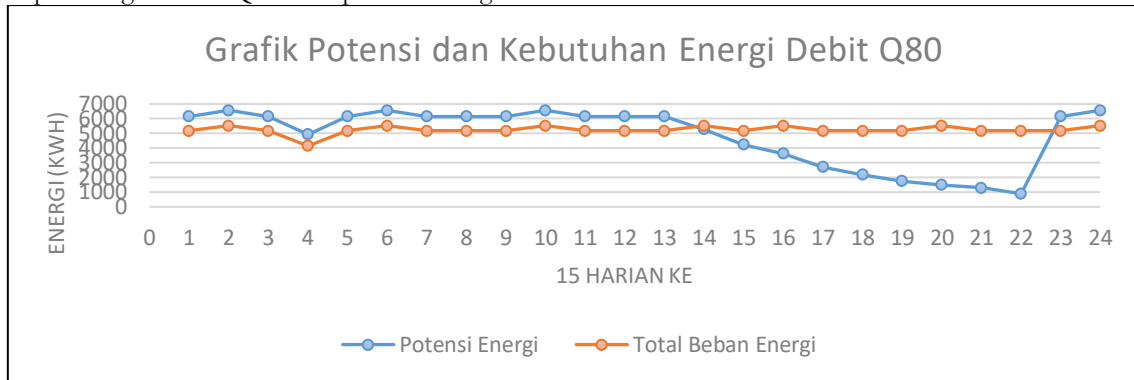
Beban energi listrik diperoleh dengan mengalikan beban daya listrik dengan jumlah KK dan waktu operasional PLTMH.

$$E_{beban} = P \times T \times n$$

$$E_{beban} = 240 \times 360 \times 60$$

$$E_{beban} = 5184 \text{ kWh}$$

Hasil perhitungan untuk Q80 ditampilkan dalam grafik berikut.



Gambar 1. Grafik Potensi dan Kebutuhan Energi Debit Q80

Pada Gambar 1 ditunjukkan mulai pada 15 harian ke-14 hingga 15 harian ke-22 PLTMH tidak mampu memenuhi kebutuhan energi, sehingga selanjutnya akan dinonaktifkan untuk kegiatan maintenance. Kemudian akan dihitung potensi energi sebelum dan sesudah PLTMH dinonaktifkan.

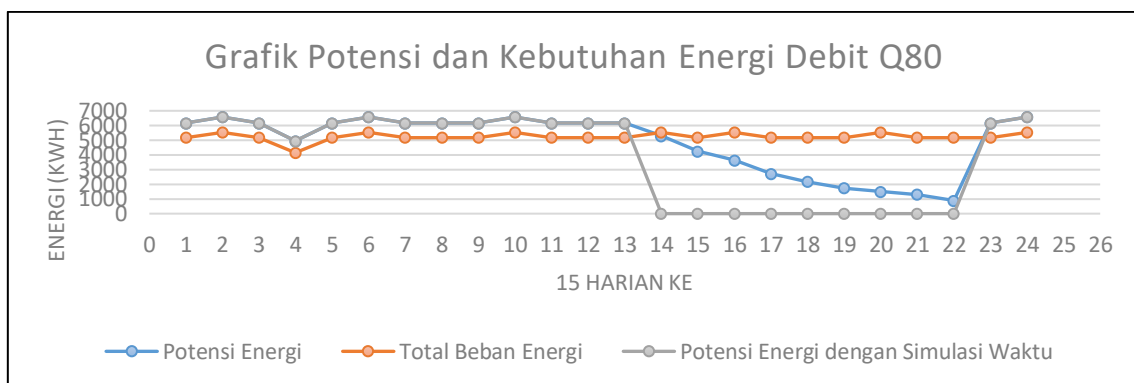
Potensi Energi Tahunan Berdasar Simulasi Waktu Operasional

Dari **Gambar 2** telah diperoleh waktu operasional PLTMH dengan debit Q80 sebagaimana tertera di atas. Untuk rekapitulasi waktu operasional selengkapnya dapat dilihat pada **Tabel 7** di bawah ini.

Tabel 7 Rekapitulasi Waktu Operasional PLTMH

No	Debit Andalan	Waktu Aktif	Waktu Nonaktif	Jumlah Hari Aktif
1	Q80	15 hari ke 1-13 (Jan-Juli)	15 harian ke 14-22 (Agustus-November)	227 hari
		15 hari ke 23-24 (Desember)		
2	Q70	15 hari ke 1-13 (Jan-Juli)	15 harian ke 14-21 (Agustus-November)	242 hari
		15 hari ke 22-24 (Nov-Des)		
3	Q50	15 hari ke 1-14 (Jan-Juli)	15 harian ke 15-19 (Agustus-Oktober)	288 hari
		15 hari ke 20-24 (Okt-Des)		
4	Q30	15 hari ke 1-13 (Januari-Juli)	15 harian ke 14-20 (Agustus-Oktober)	257 hari
		15 hari ke 21-24 (Nov-Des)		

Selanjutnya, pada saat waktu non-aktif tersebut, maka potensi energi dianggap 0, sehingga terjadi perubahan potensi energi total tahunan. Ditampilkan dalam grafik berikut.



Gambar 2. Grafik Potensi dan Kebutuhan Energi Debit Q80 dengan Simulasi Waktu Operasional

Pada Gambar 2 ditunjukkan PLTMH telah dinonaktifkan pada saat tidak mampu memenuhi kebutuhan energi. Selanjutnya dilakukan perhitungan potensi energi dengan keadaan PLTMH dinonaktifkan. Disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Perbedaan Potensi Energi Tahunan Sebelum dan Sesudah Simulasi Waktu Operasional

Debit Andalan	Sebelum Simulasi (kWh)	Sesudah Simulasi (kWh)	Selisih (kWh)
Q80	116342.516	92856.543	23485.973
Q70	121531.367	98054.552	23476.814
Q50	130339.711	115669.809	14669.902
Q30	128310.412	104217.597	24092.814

Tabel 8 menunjukkan hasil perhitungan potensi energi PLTMH sebelum dan setelah dilakukan simulasi waktu operasional, dengan selisih potensinya pada masing-masing debit perencanaan yang digunakan.

Potensi Energi Tahunan Berdasarkan Simulasi Waktu Musim

Interval musim yang ditentukan berdasarkan curah hujan pada tahun dasar perencanaan. Diperoleh hasil berikut:

1. Bulan Januari-Maret sebagai musim hujan (interval 1)
2. Bulan April-Juni sebagai peralihan musim hujan-kemarau (interval 2)
3. Bulan Juli-September sebagai musim kemarau (interval 3)
4. Bulan Oktober-Desember sebagai peralihan musim kemarau-hujan (interval 4)

Hasil perhitungan potensi energi berdasarkan interval musim disajikan dalam **Tabel 9** berikut.

Tabel 9. Potensi Energi Tahunan berdasarkan Simulasi Waktu Musim

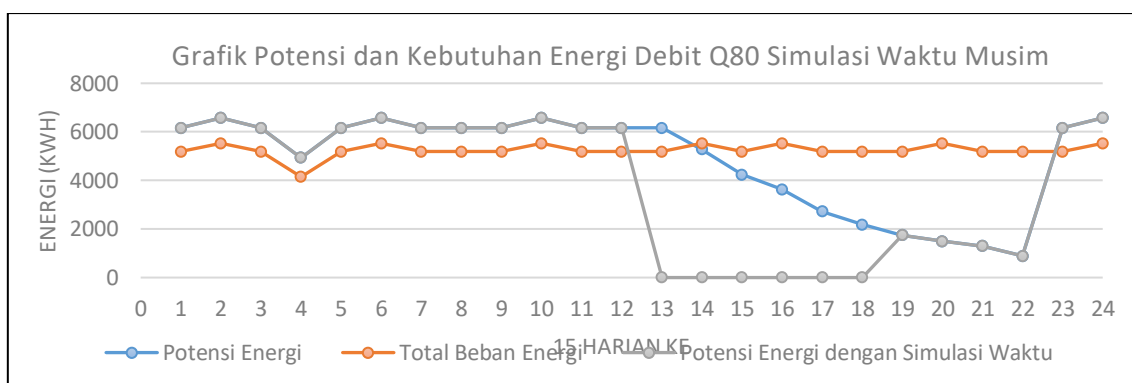
Probabilitas Debit	Besarnya Potensi Energi (kWh)			
	Hujan	Hujan-Kemarau	Kemarau	Kemarau-Hujan
Q80	36567	37389.139	0	18172.3202
Q70	36567	37389.139	0	24779.2667
Q50	36567	37389.139	0	32581.5069
Q30	36567	37389.139	0	30143.1377

Tabel 9 menunjukkan hasil perhitungan potensi energi PLTMH pada tiap musim. Pada musim kemarau PLTMH dinonaktifkan sehingga nilai potensi energi adalah 0. Hasil perbandingan potensi energi sebelum dan sesudah simulasi waktu musim disajikan pada **Tabel 10**.

Tabel 10. Perbandingan Potensi Energi Sebelum dan Sesudah Simulasi Waktu Musim

Debit Andalan	Sebelum Simulasi (kWh)	Sesudah Simulasi (kWh)	Selisih (kWh)
Q80	92128.86	116342.52	24213.65
Q70	97770.77	121531.37	23760.59
Q50	105573.01	130339.71	24766.70
Q30	103134.64	128310.41	25175.77

Tabel 10 menunjukkan hasil perhitungan potensi energi PLTMH sebelum dan setelah dilakukan simulasi waktu musim, dengan selisih potensinya pada masing-masing debit perencanaan yang digunakan. Untuk grafik potensi dan kebutuhan energi berdasarkan simulasi waktu musim untuk Q80 disajikan dalam **Gambar 3** berikut ini.



Gambar 3. Grafik Potensi dan Kebutuhan Energi Debit Q80 dengan Simulasi Waktu Musim

Pada Gambar 3 ditunjukkan potensi dan kebutuhan energi debit Q80 simulasi waktu musim pada 15 harian ke-13 PLTMH sudah mulai di nonaktifkan, padahal berdasarkan hasil perhitungan potensi energi PLTMH masih mampu memenuhi kebutuhan listrik masyarakat Desa Nawangan. Sedangkan pada 15 harian ke-19 hingga 22, PLTMH tidak mampu memenuhi kebutuhan listrik masyarakat, namun PLTMH diaktifkan karena menurut hasil penentuan interval musim kemarau telah selesai. Hal ini akan berdampak kepada sistem mekanikal dan elektrikal PLTMH, dimana seharusnya apabila PLTMH sudah tidak mampu memenuhi kebutuhan listrik masyarakat, harus segera dinonaktifkan untuk kebutuhan *maintenance*.

Penentuan Waktu Operasional PLTMH

Ditetapkan bahwa waktu operasional PLTMH yang dipakai adalah waktu operasional berdasarkan perhitungan potensi energi dengan debit andalan Q80, yaitu:

1. Masa aktif pertama PLTMH mulai tanggal 1 Januari (15 harian ke 1) hingga tanggal 15 Juli (15 harian ke 13),
2. Kemudian PLTMH dinonaktifkan tanggal 16 Juli (15 harian ke 14) hingga 30 November (15 harian ke 22),
3. PLTMH diaktifkan kembali tanggal 1 Desember (15 harian ke 23) hingga tanggal 31 Desember (15 harian ke 24).
4. PLTMH memiliki total masa aktif PLTMH 227 hari dengan potensi energi sebesar 92856,543 kWh dalam satu tahun.

KESIMPULAN

Berikut adalah kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini, antara lain:

1. Besar debit andalan sungai berdasarkan probabilitas adalah sebagai berikut:
 - a. $Q_{80} = 0,852 \text{ m}^3/\text{dt}$
 - b. $Q_{70} = 0,864 \text{ m}^3/\text{dt}$
 - c. $Q_{50} = 1,085 \text{ m}^3/\text{dt}$
 - d. $Q_{30} = 1,118 \text{ m}^3/\text{dt}$
2. Besar potensi energi yang mampu dihasilkan oleh PLTMH berdasarkan debit andalan diatas adalah sebagai berikut:
 - a. Potensi Energi Q80 = 116342,516 kWh
 - b. Potensi Energi Q70 = 121531,367 kWh
 - c. Potensi Energi Q50 = 130339,711 kWh
 - d. Potensi Energi Q30 = 128310,412 kWh
3. Besar potensi energi yang dihasilkan PLTMH berdasarkan simulasi waktu adalah sebagai berikut:

Tabel 8. Perbedaan Potensi Energi Tahunan Sebelum dan Sesudah Simulasi Waktu Operasional

Debit Andalan	Sebelum Simulasi (kWh)	Sesudah Simulasi (kWh)	Selisih (kWh)
Q80	116342.516	92856.543	23485.973
Q70	121531.367	98054.552	23476.814
Q50	130339.711	115669.809	14669.902
Q30	128310.412	104217.597	24092.814

Tabel 10. Perbandingan Potensi Energi Sebelum dan Sesudah Simulasi Waktu Musim

Debit Andalan	Sebelum Simulasi (kWh)	Sesudah Simulasi (kWh)	Selisih (kWh)
Q80	92128.86	116342.52	24213.65
Q70	97770.77	121531.37	23760.59
Q50	105573.01	130339.71	24766.70
Q30	103134.64	128310.41	25175.77

4. Digunakan waktu operasional berdasarkan perhitungan debit andalan Q80 (KP-01). Yaitu:
 - a. Masa aktif pertama PLTMH mulai tanggal 1 Januari (15 harian ke 1) hingga tanggal 15 Juli (15 harian ke 13),
 - b. Kemudian PLTMH dinonaktifkan mulai tanggal 16 Juli (15 harian ke 14) hingga 30 November (15 harian ke 22) untuk kebutuhan *maintenance* dan reparasi,
 - c. PLTMH diaktifkan kembali tanggal 1 Desember (15 harian ke 23) hingga tanggal 31 Desember (15 harian ke 24), kemudian berlanjut ke tahun berikutnya.
 - d. PLTMH memiliki total masa aktif PLTMH 227 hari dengan potensi energi sebesar 92856,543 kWh dalam satu tahun.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anonim. 2009. *Buku 2B Pedoman Kelayakan Sipil*. Jakarta: Direktorat Jendral Listrik dan Pemanfaatan Energi Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral.
- [2] Anonim. 2010. *Standar Perencanaan Irigasi Kriteria Perencanaan Bagian Saluran Irigasi KP-01*. Jakarta: Direktorat Jendral Sumber Daya Air Departemen Pekerjaan Umum.
- [3] Anonim. 2016. *Data Hujan Stasiun Hujan Nawangan, Stasiun Hujan Bandar, Stasiun Hujan Arjosari 2006-2015*. Surakarta: BBWS Bengawan Solo.
- [4] Anonim. 2016. *Peta DAS Sungai Bengawan Solo*. Surakarta: BBWS Bengawan Solo.
- [5] Anonim. 2016. *Data Klimatologi Kabupaten Magetan Tahun 2005-2016*. Magetan: Dinas Navigasi Udara dan Badan Meteorologi TNI-AU.
- [6] Bambang Triatmodjo. 2009. *Hidrologi Terapan*. Beta Offset, Yogyakarta.
- [7] Bambang Triatmodjo. 1996. *Hidrolika I*. Beta Offset, Yogyakarta.
- [8] Indra Bagus. 2013. *Revitalisasi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Nawangan Pacitan*. Jurnal. Tugas Akhir. Bambang Triatmodjo. 2006. *Hidrologi Terapan*. Beta Offset, Yogyakarta.
- [9] Lutfi Chandra. 2014. *Peningkatan Daya Listrik Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Desa Tokavi Kabupaten Pacitan*. Jurnal. Tugas Akhir.
- [10] Sularso dan Tahara. 2006. *Pompa dan Kompresor*. Jakarta: PT Pradnya Paramitha.