

STUDI KELAYAKAN PEMBANGUNAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MINIHIDRO WADUK PONDOK

Orien Kalam Simanjuntak¹⁾, Ir. Agus Hari Wahyudi, M.Sc.²⁾, Ir. Adi Yusuf Muttaqien, MT.³⁾

¹⁾Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret Surakarta,

^{2), 3)}Pengajar Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret Surakarta.

Jln Ir. Sutami 36 A, Surakarta 57126

e-mail: ok.simanjuntak@gmail.com

Abstract

Hydroelectric Power Plant (HEPP) was many chosen because hydropower is a renewable energy. Pondok reservoir has a potential water resources that has not been optimized that is water discharge and the hydraulic pressure or the energy potential of water that can be used to generate electrical energy. The study aims is to determine how many electricity that can be produced, how much the investment for development cost, and the results of economic analysis of hydropower development of pondok reservoir.

This study included descriptive quantitative research methods. The method used is to calculate inflow into the reservoir by using Mock calculation method. The Mock is used to calculate the reservoir simulation and calculation of electricity production. The design construction of hydropower structures was conducted to determine the layout and structures dimensions to estimate the investment cost. The next stage is the economic analysis, this analysis compares the benefits of hydro power development with the investment cost.

The electrical power and electrical energy is calculated based on the discharge and head of water fall. The simulation of operating pattern on the dependable flow Q_{90} produce of 1500 kW of electrical power and 544.000 kWh of electrical energy. The simulation of operating pattern on dry year Q_{80} produce of 2300 kW of electrical power and 826.000 kWh of electrical energy. The simulation of operating pattern on normal year Q_{50} produce of 4900 kW of electrical power and 1.775.000 kWh of electrical energy. The simulation of operating pattern on wet year Q_{30} produce of 7200 kW of electrical power and 2.613.000 kWh. The investment costs of hydroelectric power development of Pondok reservoir is Rp 5.821.153.000,00. The economic analysis shows that minihidro power development at pondok dam is not feasible on dependable flow and dry year operation.

Keywords: Hydroelectric Power, Discharge, Head of Water Fall, Cost, Feasibility,

Abstrak

Pembangkit listrik dengan menggunakan tenaga air banyak dipilih karena tenaga air merupakan energi yang dapat diperbaharui. Bendungan Pondok mempunyai potensi sumber daya air yang belum dimanfaatkan secara penuh yaitu debit air dan tinggi tekan hidrolik atau tinggi terjun yang dapat dimanfaatkan untuk membangkitkan energi listrik. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui berapa produksi listrik yang dapat dihasilkan, dan besar biaya investasi untuk pembangunan, serta mengetahui hasil analisis ekonomi dari pembangunan PLTM (Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro) Waduk Pondok.

Penelitian ini termasuk metode penelitian deskriptif kuantitatif. Metode yang dilakukan adalah menghitung potensi air yang masuk ke waduk atau *inflow* dengan menggunakan metode Mock. Hasil perhitungan *inflow* digunakan dalam perhitungan simulasi pola operasi waduk dan perhitungan produksi listrik. Desain konstruksi bangunan PLTM dilakukan untuk mengetahui tata letak dan dimensi PLTM untuk perkiraan biaya investasi. Tahap selanjutnya adalah analisis ekonomi yaitu membandingkan besar manfaat yang didapat dari pembangunan PLTM dengan biaya untuk pembangunannya.

Berdasarkan hasil analisis debit dan tinggi jatuh dapat diperoleh besarnya daya dan energi listrik. Daya listrik yang dihasilkan pada simulasi pola operasi debit andalan Q_{90} adalah 1500 kW dan energi listrik adalah 544.000 kWh. Daya listrik yang dihasilkan pada simulasi pola operasi tahun kering Q_{80} adalah 2300 kW dan energi listrik 826.000 kWh. Daya listrik yang dihasilkan pada simulasi pola operasi tahun normal Q_{50} adalah 4900 kW dan energi listrik 1.775.000 kWh. Daya listrik yang dihasilkan pada simulasi pola operasi tahun basah Q_{30} adalah 7200 kW dan energi listrik 2.613.000 kWh. Besar biaya investasi untuk pembangunan unit PLTM Waduk Pondok adalah Rp 5.821.153.000,00. Analisis ekonomi yang dilakukan menunjukkan bahwa pembangunan PLTM Waduk Pondok tidak layak.

Kata kunci : Pembangkit Listrik Tenaga Air, Debit, Tinggi Jatuh, Biaya, Kelayakan

PENDAHULUAN

Pada dasarnya suatu pembangkit listrik tenaga hidro berfungsi untuk mengubah potensi tenaga air yang berupa aliran air (sungai) yang mempunyai debit dan tinggi jatuh (*head*) untuk menghasilkan energi listrik. Secara umum pembangkit listrik dari air terdiri dari pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH), pembangkit listrik tenaga minihidro (PLTM), dan pembangkit listrik tenaga air (PLTA). Perbedaan ketiganya adalah daya/kapasitas keluaran dari masing-masing pembangkit, atau jumlah listrik yang dihasilkan. PLTMH adalah pembangkit listrik yang menghasilkan daya kurang dari 200kW. Sementara itu, PLTM memiliki kapasitas dari 200kW hingga 5000kW. Dan PLTA adalah pembangkit dengan kapasitas diatas 5MW (Roslan, 2011).

Waduk Pondok terletak di Desa Gondang, Kecamatan Bringin, Kabupaten Ngawi, Propinsi Jawa Timur. Pada saat ini waduk Pondok dikelola oleh Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo. Pembangunan waduk Pondok dimulai pada tahun 1993 sampai 1995 dengan PT. Bina Karya sebagai konsultan desain sedangkan PT. Waskita Karya sebagai kontraktor. Waduk Pondok berfungsi sebagai penyedia air baku untuk irigasi yang meliputi 3.511 ha daerah irigasi dan juga pariwisata (Perum Jasa Tirta I & Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret, 2009).

Outflow yang dikeluarkan Waduk Pondok untuk kebutuhan irigasi hanya dialirkan saja. Dengan tinggi tekan hidrolik atau tinggi terjun yang cukup tinggi dinilai *outflow* tersebut dapat dimanfaatkan untuk membangkitkan energi listrik. Untuk keperluan tersebut, maka perlu dilakukan studi potensi yang memungkinkan untuk direncanakan bangunan pembangkit tenaga listrik dengan menggunakan potensi tenaga air yang tersedia.

LANDASAN TEORI

Hal yang harus diperhatikan dalam pembuatan pola operasi waduk adalah periode pengaturan, jadwal pengisian dan pengosongan waduk, alokasi pemanfaatan air, dan pengendalian banjir. Perhitungan dinyatakan dengan rumus (Bambang Triatmodjo, 2008) :

$$I dt - O dt = ds - Losses \dots\dots\dots (1)$$

$$I dt = ds + O dt - Losses \dots\dots\dots (2)$$

$$ds = (V_2 - V_1) \dots\dots\dots (3)$$

dengan :

- I* = inflow rata – rata pada periode dt (m³/det),
- O* = *outflow* rata –rata pada periode dt (m³/det),
- dt* = periode (waktu) sebagai interval untuk diskritisasi hitungan (detik),
- ds* = perubahan tampungan selama periode dt yang sedang ditinjau (m³),
- Losses* = kehilangan air pada tampungan waduk (m³/det),
hujan harian dikurangi evaporasi dikalikan luas genangan waduk.

Kapasitas dari pembangkit listrik tenaga air secara umum dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Arismunandar, 2000) :

$$P = \eta_t \cdot \eta_g \cdot g \cdot Q_p \cdot H_n \dots\dots\dots (4)$$

$$E = \xi \cdot P \cdot 8760 \dots\dots\dots (5)$$

dengan :

- P* = kapasitas (kW),
- η_t = efisiensi turbin,
- η_g = efisiensi generator,
- Q_p* = debit perencanaan (m³/dt),
- H_n* = tinggi tekan hidrolik/tinggi terjun efektif (m),
- E* = jumlah energi pertahun (KWh),
- ξ = efisiensi pembangkit.

Analisis ekonomi dalam penelitian studi kelayakan PLTM Waduk Pondok menggunakan parameter - parameter sebagai berikut :

1. *Benefit Cost Ratio* (BCR) adalah perbandingan nilai ekuivalen semua manfaat (*benefit*) terhadap nilai ekuivalen semua biaya (*cost*) pada acuan waktu yang sama (Ferianto Raharjo, 2007). *Benefit cost ratio* dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$BCR = \frac{PW_{benefit}}{PW_{cost}} \text{ atau } \frac{FW_{benefit}}{FW_{cost}} \text{ atau } \frac{AW_{benefit}}{AW_{cost}} \dots\dots\dots (6)$$

dengan :

- $PW_{benefit}$ = *benefit* yang diperoleh pada waktu sekarang,
- PW_{cost} = *cost* yang dikeluarkan pada waktu sekarang,
- $FW_{benefit}$ = *benefit* yang diperoleh pada waktu yang akan datang,
- FW_{cost} = *cost* yang dikeluarkan pada waktu yang akan datang,

$AW_{benefit}$ = *benefit* yang diperoleh tiap tahun yang ditentukan,
 AW_{cost} = *cost* yang dikeluarkan tiap tahun yang ditentukan,

apabila :

$BCR \geq 1$ maka proyek *feasible* (layak dilaksanakan),
 $BCR < 1$ maka proyek tidak layak untuk dilaksanakan.

2. Net Present Value

Net Present Value (NPV) atau nilai bersih sekarang merupakan selisih antara *present value* kas bersih dikurangi *present value* investasi selama umur investasi. Dari penjelasan diatas dapat disimpulkan :

$$NPV = present\ value\ benefit - present\ value\ cost \dots \dots \dots (7)$$

dengan rumus diatas apabila :

NPV > 0 maka proyek layak dilaksanakan (investasi yang dilakukan menghasilkan *benefit*),

NPV < 0 maka proyek tidak layak untuk dilaksanakan,

NPV = 0 maka jika proyek dilaksanakan atau tidak dilaksanakan tidak berpengaruh pada keuangan perusahaan. Keputusan harus ditetapkan dengan menggunakan kriteria lain.

3. Internal Rate of Return

Internal Rate of Return (IRR) merupakan tingkat suku bunga yang menghasilkan NPV sama dengan nol. Penggunaan untuk mengetahui apakah investasi layak untuk dilaksanakan atau tidak, menggunakan acuan bahwa *internal rate of return* harus lebih tinggi dari *minimum attractive rate of return* (MARR). Perhitungan IRR dapat dilakukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$IRR = \sum_{t=1}^n \frac{(B_t - C_t)}{(1+r)^t} = 0 \dots \dots \dots (8)$$

dengan :

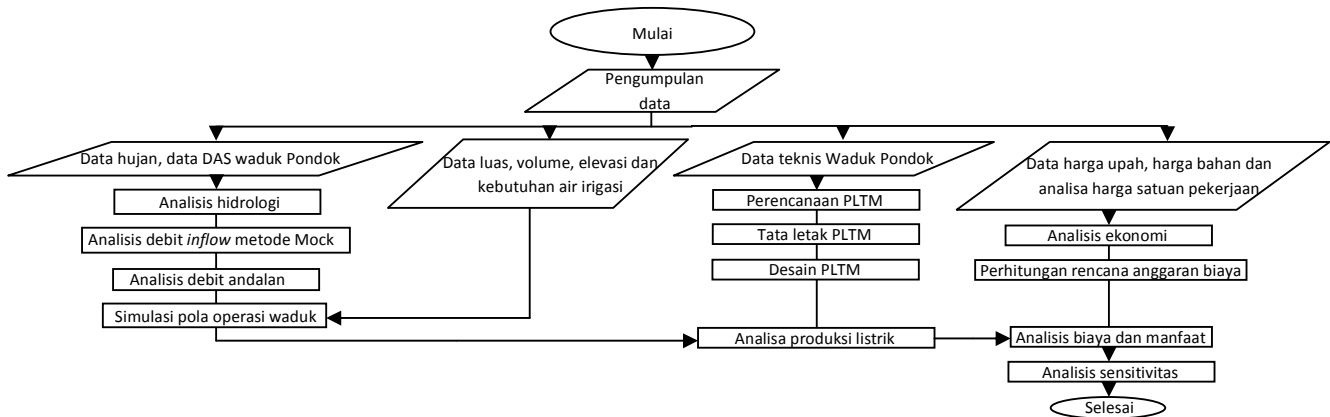
B_t = *benefit* pada tiap tahun,
 C_t = *cost* pada tiap tahun,
 t = waktu arus kas,
 n = jumlah tahun,
 r = *Internal Rate of Return* (IRR).

apabila :

IRR > suku bunga yang ditetapkan maka proyek layak untuk dilaksanakan,
 IRR < suku bunga yang ditetapkan, proyek tidak layak untuk dilaksanakan.

METODE PENELITIAN

Penelitian yang dilakukan adalah menganalisis kelayakan pembangunan PLTM Waduk Pondok dari aspek teknis dan ekonomi. Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan analisis, yaitu sebagai berikut: (1) Metode yang dilakukan adalah menghitung potensi air yang masuk ke waduk atau inflow dengan menggunakan metode Mock. (2) Hasil perhitungan inflow digunakan dalam perhitungan simulasi pola operasi waduk dan perhitungan produksi listrik. (3) Desain konstruksi bangunan PLTM dilakukan untuk mengetahui tata letak dan dimensi PLTM untuk perkiraan biaya investasi. (4) Tahap selanjutnya adalah analisis ekonomi yaitu membandingkan besar manfaat yang didapat dari pembangunan PLTM dengan biaya untuk pembangunannya. Tahapan analisis tersebut dapat dilihat melalui Gambar 1. dibawah ini.



Gambar 1. Prosedur Pelaksanaan Penelitian

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Data hujan dan evaporasi yang diperoleh dihitung dengan menggunakan metode Mock sehingga dapat diperoleh nilai debit *inflow* andalan pada Waduk Pondok. Dari hasil perhitungan debit dengan metode Mock kemudian dicari debit andalannya. Debit andalan yang dicari adalah debit andalan dengan probabilitas 90%, 80% (tahun kering), 50 % (tahun normal) dan 30 % (tahun basah).

Langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan simulasi pola operasi. Simulasi pola operasi waduk dikerjakan dengan *trial outflow* dengan menyeimbangkan antara kebutuhan dengan debit yang tersedia agar diperoleh nilai keseimbangan yang optimal. Pola operasi dalam studi ini dibuat berdasarkan kondisi eksisting waduk dengan elevasi puncak muka air +106,5 m. Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 1. Sampai Tabel 4. berikut.

Tabel 1. Simulasi Pola Operasi Waduk Pada Debit Desain Q_{90}

Bulan	Durasi (hari)	Inflow (m ³ /s)	Kebutuhan irigasi (m ³ /s)	Hujan - evaporasi rata-rata	Elevasi 1 (m)	Luas waduk rata-rata (km ²)	Volume 1 (juta m ³)	Outflow (trial) (m ³ /s)	Volume 2 (juta m ³)	Elevasi 2 (m)	Faktor pemenuhan irigasi (%)
Apr I	15	0,738	2,235	1,346	106,50	4,0746	31,17	0,5	31,17	106,50	22
Apr II	15	0,663	2,917	-0,747	106,50	4,0746	31,17	0,5	31,17	106,50	17
Mei I	15	0,535	5,231	-2,405	106,50	4,0746	31,17	0,5	31,17	106,50	10
Mei II	16	0,329	5,126	-3,783	106,50	4,0746	31,17	0,5	30,93	106,46	10
Jun I	15	0,271	4,951	-3,234	106,46	4,0622	30,93	0,5	30,64	106,40	10
Jun II	15	0,208	4,143	-4,070	106,40	4,0466	30,64	0,5	30,26	106,33	12
Jul I	15	0,150	3,476	-3,830	106,33	4,0262	30,26	0,5	29,80	106,25	14
Jul II	16	0,098	1,341	-4,082	106,25	4,0013	29,80	0,5	29,25	106,14	37
Agust I	15	0,077	0,000	-4,686	106,14	3,9697	29,25	0,2	29,09	106,11	100
Agust II	16	0,052	0,348	-5,182	106,11	3,9604	29,09	0,5	28,47	105,99	100
Sep I	15	0,040	1,176	-4,891	106,5	4,0746	28,47	0,4	28,91	106,08	34
Sep II	15	0,028	2,703	-4,526	106,08	3,9496	28,91	0,5	28,30	105,95	18
Okt I	15	0,020	1,791	-4,592	105,95	3,9120	28,30	0,3	27,93	105,88	17
Okt II	16	0,013	0,527	-2,872	105,88	3,8887	27,93	0,3	27,54	105,79	57
Nop I	15	0,060	0,000	-0,451	105,79	3,8623	27,54	0,1	27,48	105,78	100
Nop II	15	0,128	0,000	0,449	105,78	3,8587	27,48	0,1	27,52	105,79	100
Des I	15	0,562	2,494	1,065	105,79	3,8611	27,52	0,3	27,86	105,86	12
Des II	16	0,452	2,893	-0,630	105,86	3,8838	27,86	0,3	28,07	105,91	10
Jan I	15	0,471	3,897	0,896	105,91	3,8975	28,07	0,3	28,29	105,95	8
Jan II	16	0,952	2,598	2,143	105,95	3,9117	28,29	0,3	29,19	106,13	12
Feb I	15	0,721	3,090	1,025	106,13	3,9664	29,19	0,3	29,74	106,24	10
Feb II	13	0,549	3,125	-0,383	106,24	3,9976	29,74	0,3	30,02	106,29	10
Mar I	15	0,602	2,036	0,272	106,29	4,0131	30,02	0,3	30,41	106,36	15
Mar II	16	0,702	0,000	1,185	106,36	4,0344	30,41	0,1	31,17	106,50	100

Debit *trial outflow* terbesar berdasarkan tabel simulasi pola operasi waduk pada debit desain Q_{90} diatas adalah 0,5 m³/s dan debit *trial outflow* terkecil yaitu 0,1 m³/s.

Tabel 2. Simulasi Pola Operasi Waduk Pada Tahun Kering Q_{80}

Bulan	ke	Durasi (hari)	Inflow (m ³ /s)	Kebutuhan (m ³ /s)	Hujan - evaporasi rata-rata	Elevasi 1 (m)	Luas waduk rata-rata (km ²)	Volume 1 (juta m ³)	Outflow (trial) (m ³ /s)	Volume 2 (juta m ³)	Elevasi 2 (m)	Faktor pemenuhan irigasi (%)
Apr	1	15	1,28	2,23	1,345896	106,50	4,0746	31,17	0,8	31,17	106,50	36
	2	15	0,88	2,92	-0,747	106,50	4,0746	31,17	0,8	31,17	106,50	27
Mei	1	15	0,62	5,23	-2,40484	106,50	4,0746	31,17	1	30,68	106,41	19
	2	16	0,39	5,13	-3,78273	106,41	4,0487	30,68	1	29,83	106,26	20
Jun	1	15	0,31	4,95	-3,23354	106,26	4,0028	29,83	1	28,94	106,08	20
	2	15	0,23	4,14	-4,07032	106,08	3,9513	28,94	1	27,94	105,88	24
Jul	1	15	0,17	3,48	-3,83045	105,88	3,8888	27,94	0,5	27,51	105,79	14
	2	16	0,11	1,34	-4,08242	105,79	3,8606	27,51	0,5	26,98	105,67	37
Ags	1	15	0,09	0,00	-4,68634	105,67	3,8232	26,98	0,2	26,83	105,63	100
	2	16	0,06	0,35	-5,18205	105,63	3,8124	26,83	0,3	26,49	105,55	86
Sept	1	15	0,04	1,18	-4,89112	106,5	4,0746	26,49	0,5	27,50	105,78	43
	2	15	0,03	2,70	-4,5257	105,78	3,8596	27,50	0,5	26,89	105,65	18
Okt	1	15	0,02	1,79	-4,59185	105,65	3,8168	26,89	0,5	26,27	105,50	28
	2	16	0,03	0,53	-2,87245	105,50	3,7705	26,27	0,5	25,62	105,33	95
Nov	1	15	0,24	0,00	-0,45147	105,33	3,7187	25,62	0,2	25,68	105,35	100
	2	15	0,51	0,00	0,448837	105,35	3,7235	25,68	0,2	26,08	105,45	100
Des	1	15	0,90	2,49	1,064728	105,45	3,7555	26,08	0,5	26,59	105,58	20
	2	16	0,64	2,89	-0,63028	105,58	3,7948	26,59	0,5	26,78	105,62	17
Jan	1	15	0,82	3,90	0,896217	105,62	3,8090	26,78	0,5	27,20	105,72	13
	2	16	1,17	2,60	2,143236	105,72	3,8391	27,20	0,5	28,13	105,92	19
Feb	1	15	1,06	3,09	1,024928	105,92	3,9015	28,13	0,5	28,86	106,07	16
	2	13	0,89	3,12	-0,38285	106,07	3,9468	28,86	0,5	29,30	106,16	16
Mar	1	15	0,95	2,04	0,272486	106,16	3,9729	29,30	0,5	29,89	106,27	25
	2	16	1,16	0,00	1,185215	106,27	4,0060	29,89	0,2	31,17	106,50	100

Debit *trial outflow* terbesar berdasarkan tabel simulasi pola operasi waduk pada tahun kering Q_{80} diatas adalah $1 \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit *trial outflow* terkecil yaitu $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabel 3. Simulasi Pola Operasi Waduk Pada Tahun Normal Q_{50}

Bulan	ke	Durasi (hari)	Inflow (m^3/s)	Kebutuhan (m^3/s)	Hujan - evaporasi rata-rata	Elevasi 1 (m)	Luas waduk rata-rata (km^2)	Volume 1 (juta m^3)	Outflow (trial) (m^3/s)	Volume 2 (juta m^3)	Elevasi 2 (m)	Faktor pemenuhan irigasi (%)
Apr	1	15	2,43	2,23	1,345896	106,50	4,0746	31,17	1,5	31,17	106,50	67
	2	15	1,50	2,92	-0,747	106,50	4,0746	31,17	1,5	31,17	106,50	51
Mei	1	15	1,24	5,23	-2,40484	106,50	4,0744	31,17	2	30,19	106,32	38
	2	16	0,55	5,13	-3,78273	106,32	4,0224	30,19	2	28,18	105,93	39
Jun	1	15	0,71	4,95	-3,23354	105,93	3,9046	28,18	2	26,51	105,56	40
	2	15	0,41	4,14	-4,07032	105,56	3,7885	26,51	2	24,44	105,01	48
Jul	1	15	0,39	3,48	-3,83045	105,01	3,6156	24,44	1	23,65	104,78	29
	2	16	0,17	1,34	-4,08242	104,78	3,5394	23,65	1	22,50	104,41	75
Ags	1	15	0,14	0,00	-4,68634	104,41	3,4205	22,50	0,5	22,03	104,25	100
	2	16	0,10	0,35	-5,18205	104,25	3,3687	22,03	1	20,80	103,82	100
Sept	1	15	0,09	1,18	-4,89112	106,5	4,0746	20,80	1	22,64	104,46	85
	2	15	0,06	2,70	-4,5257	104,46	3,4357	22,64	2	20,13	103,57	74
Okt	1	15	0,07	1,79	-4,59185	103,57	3,1437	20,13	1	18,93	103,11	56
	2	16	0,68	0,53	-2,87245	103,11	2,9918	18,93	1	18,49	102,94	100
Nov	1	15	1,30	0,00	-0,45147	102,94	2,9356	18,49	0,5	19,53	103,34	100
	2	15	1,72	0,00	0,448837	103,34	3,0682	19,53	0,5	21,11	103,93	100
Des	1	15	2,13	2,49	1,064728	103,93	3,2627	21,11	1	22,57	104,44	40
	2	16	1,42	2,89	-0,63028	104,44	3,4282	22,57	1	23,16	104,62	35
Jan	1	15	1,99	3,90	0,896217	104,62	3,4897	23,16	2	23,15	104,62	51
	2	16	2,23	2,60	2,143236	104,62	3,4888	23,15	1	24,85	105,13	38
Feb	1	15	2,30	3,09	1,024928	105,13	3,6526	24,85	1,1	26,41	105,53	36
	2	13	2,12	3,12	-0,38285	105,53	3,7810	26,41	1,5	27,11	105,70	48
Mar	1	15	2,14	2,04	0,272486	105,70	3,8323	27,11	1	28,58	106,01	49
	2	16	2,39	0,00	1,185215	106,01	3,9299	28,58	0,5	31,17	106,50	100

Debit *trial outflow* terbesar berdasarkan tabel simulasi pola operasi waduk pada tahun normal Q_{50} diatas adalah $2 \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit *trial outflow* terkecil yaitu $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabel 4. Simulasi Pola Operasi Waduk Pada Tahun Basah Q_{30}

Bulan	ke	Durasi (hari)	Inflow (m^3/s)	Kebutuhan (m^3/s)	Hujan - evaporasi rata-rata	Elevasi 1 (m)	Luas waduk rata-rata (km^2)	Volume 1 (juta m^3)	Outflow (trial) (m^3/s)	Volume 2 (juta m^3)	Elevasi 2 (m)	Faktor pemenuhan irigasi (%)
Apr	1	15	3,42	2,23	1,345896	106,50	4,0746	31,17	2	31,17	106,50	89
	2	15	2,36	2,92	-0,747	106,50	4,0746	31,17	2	31,17	106,50	69
Mei	1	15	1,96	5,23	-2,40484	106,50	4,0746	31,17	3,2	29,57	106,21	61
	2	16	1,27	5,13	-3,78273	106,21	3,9880	29,57	3	27,18	105,71	59
Jun	1	15	0,98	4,95	-3,23354	105,71	3,8373	27,18	3	24,56	105,04	61
	2	15	0,56	4,14	-4,07032	105,04	3,6263	24,56	3	21,40	104,03	72
Jul	1	15	0,54	3,48	-3,83045	104,03	3,2961	21,40	2	19,51	103,34	58
	2	16	0,26	1,34	-4,08242	103,34	3,0660	19,51	1	18,49	102,94	75
Ags	1	15	0,20	0,00	-4,68634	102,94	2,9351	18,49	1	17,45	102,52	100
	2	16	0,14	0,35	-5,18205	102,52	2,7998	17,45	1	16,25	102,04	100
Sept	1	15	0,12	1,18	-4,89112	106,5	4,0746	16,25	1	19,39	103,29	85
	2	15	0,11	2,70	-4,5257	103,29	3,0509	19,39	2,2	16,69	102,22	81
Okt	1	15	0,54	1,79	-4,59185	102,22	2,7001	16,69	1	16,09	101,97	56
	2	16	1,33	0,53	-2,87245	101,97	2,6225	16,09	1	16,55	102,16	100
Nov	1	15	2,33	0,00	-0,45147	102,16	2,6820	16,55	1	18,27	102,85	100
	2	15	2,84	0,00	0,448837	102,85	2,9066	18,27	1	20,65	103,76	100
Des	1	15	3,39	2,49	1,064728	103,76	3,2069	20,65	2	22,45	104,40	80
	2	16	2,15	2,89	-0,63028	104,40	3,4150	22,45	2,5	21,97	104,23	86
Jan	1	15	2,59	3,90	0,896217	104,23	3,3617	21,97	2,5	22,09	104,27	64
	2	16	3,32	2,60	2,143236	104,27	3,3748	22,09	2	23,92	104,86	77
Feb	1	15	2,95	3,09	1,024928	104,86	3,5657	23,92	2	25,15	105,21	65
	2	13	3,78	3,12	-0,38285	105,21	3,6789	25,15	2	27,15	105,71	64
Mar	1	15	2,80	2,04	0,272486	105,71	3,8354	27,15	2	28,18	105,93	98
	2	16	3,23	0,00	1,185215	105,93	3,9046	28,18	1	31,17	106,50	100

Debit *trial outflow* terbesar berdasarkan tabel simulasi pola operasi waduk pada tahun basah Q_{30} diatas adalah $3,2 \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit *trial outflow* terkecil yaitu $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Langkah selanjutnya adalah melakukan perencanaan desain PLTM. Perencanaan dilakukan secara sederhana untuk memperkirakan dimensi hidrolis sampai dengan biaya konstruksi. Perancangan ini berdasarkan posisi topografi dan geologi serta melihat situasi dari bangunan struktur yang sudah ada.

Setelah melakukan perhitungan simulasi operasi dan perencanaan desain PLTM, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis produksi listrik. Analisis produksi listrik meliputi perhitungan daya listrik (kW), perhitungan energi listrik (kWh)

dengan menggunakan berbagai kondisi debit yaitu debit andalan Q_{90} , tahun kering Q_{80} , tahun normal Q_{50} , dan tahun basah Q_{30} . Hasil perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 5. sampai Tabel 8. berikut.

Tabel 5. Produksi listrik berdasarkan simulasi operasi pada tahun basah Q_{90}

Bulan	Qp (m ³ /s)	H _{ef} (m)	P (kW)	E(kWH)
Jan I	0,30	24,08	51,02	18.368,76
Jan II	0,30	24,26	51,41	19.740,42
Feb I	0,30	24,36	51,63	18.586,20
Feb II	0,30	24,42	51,74	16.142,62
Mar I	0,30	24,49	51,89	18.681,08
Mar II	0,10	24,63	17,39	6.679,43
Apr I	0,50	24,63	86,97	31.309,81
Apr II	0,50	24,63	86,97	31.309,81
Mei I	0,50	24,63	86,97	31.309,81
Mei II	0,50	24,58	86,82	33.339,56
Jun I	0,50	24,53	86,63	31.187,65
Jun II	0,50	24,46	86,39	31.099,81
Jul I	0,50	24,38	86,09	30.992,72
Jul II	0,50	24,27	85,72	32.915,43
Agust I	0,20	24,24	34,24	12.327,55
Agust II	0,50	24,12	85,17	32.705,44
Sep I	0,40	24,20	68,39	24.618,76
Sep II	0,50	24,08	85,04	30.616,08
Okt I	0,30	24,00	50,87	18.311,45
Okt II	0,30	23,92	50,68	19.462,37
Nop I	0,10	23,91	16,89	6.079,05
Nop II	0,10	23,92	16,89	6.081,05
Des I	0,30	23,99	50,83	18.299,41
Des II	0,30	24,03	50,93	19.555,65
Jumlah			1500,00	540.000,00

Dari tabel hasil perhitungan produksi listrik berdasarkan simulasi operasi debit andalan Q_{90} diatas diperoleh energi listrik maksimum terjadi pada bulan Mei II sebesar 33.339,56 kWh. Daya listrik maksimum terjadi pada bulan Mei I sebesar 86,97 kW.

Tabel 6. Produksi listrik berdasarkan simulasi operasi pada tahun kering Q_{80}

Bulan	Qp (m ³ /s)	H _{ef} (m)	P (kW)	E(kWH)
Jan I	0,50	23,84	84,21	30.314,81
Jan II	0,50	24,05	84,92	32.610,48
Feb I	0,50	24,20	85,45	30.761,61
Feb II	0,50	24,28	85,76	26.755,67
Mar I	0,50	24,39	86,15	31.012,96
Mar II	0,20	24,63	34,79	13.358,85
Apr I	0,80	24,63	139,15	50.095,70
Apr II	0,80	24,63	139,15	50.095,70
Mei I	1,00	24,54	173,32	62.393,42
Mei II	1,00	24,38	172,22	66.131,31
Jun I	1,00	24,21	171,00	61.561,12
Jun II	1,00	24,01	169,55	61.039,48
Jul I	0,50	23,91	84,45	30.402,99
Jul II	0,50	23,79	84,03	32.266,36
Agust I	0,20	23,76	33,56	12.082,33
Agust II	0,30	23,68	50,17	19.266,81
Sep I	0,50	23,91	84,44	30.399,09
Sep II	0,50	23,77	83,95	30.223,66
Okt I	0,50	23,62	83,43	30.035,87
Okt II	0,50	23,46	82,85	31.815,76
Nop I	0,20	23,48	33,16	11.938,53
Nop II	0,20	23,58	33,31	11.990,04
Des I	0,50	23,70	83,71	30.134,27
Des II	0,50	23,75	83,87	32.204,49
Jumlah			2300,00	819.000,00

Dari tabel hasil perhitungan produksi listrik berdasarkan simulasi operasi pada tahun kering Q_{80} diatas diperoleh energi listrik maksimum terjadi pada bulan Mei II sebesar 66.131,31 kWh. Daya listrik maskimum terjadi pada bulan Mei I sebesar 173,32 kW.

Tabel 7. Produksi listrik berdasarkan simulasi operasi pada tahun normal Q₅₀

Bulan	Qp (m ³ /s)	H _{ef} (m)	P (kW)	E(kWH)
Jan I	2,00	22,75	321,34	115.682,11
Jan II	1,00	23,25	164,24	63.069,57
Feb I	1,10	23,66	183,81	66.171,69
Feb II	1,50	23,82	252,39	78.746,10
Mar I	1,00	24,14	170,51	61.381,94
Mar II	0,50	24,63	86,97	33.397,13
Apr I	1,50	24,63	260,92	93.929,43
Apr II	1,50	24,63	260,91	93.926,40
Mei I	2,00	24,45	345,37	124.333,55
Mei II	2,00	24,06	339,83	130.496,47
Jun I	2,00	23,68	334,54	120.434,47
Jun II	2,00	23,14	326,86	117.669,79
Jul I	1,00	22,90	161,77	58.236,36
Jul II	1,00	22,54	159,20	61.131,16
Agust I	0,50	22,38	79,04	28.454,99
Agust II	1,00	21,95	155,00	59.521,54
Sep I	1,00	22,59	159,52	57.428,31
Sep II	2,00	21,70	306,53	110.351,87
Okt I	1,00	21,24	150,01	54.004,19
Okt II	1,00	21,07	148,80	57.140,28
Nop I	0,50	21,47	75,83	27.297,25
Nop II	0,50	22,06	77,91	28.045,95
Des I	1,00	22,56	159,36	57.370,39
Des II	1,00	22,75	160,69	61.705,02
Jumlah			4900,00	1.760.000,00

Dari tabel hasil perhitungan produksi listrik berdasarkan simulasi operasi pada tahun normal Q₅₀ diatas diperoleh energi listrik maksimum terjadi pada bulan Mei II sebesar 130.496,47 kWh. Daya listrik maskimum terjadi pada bulan Mei I sebesar 345,37 kW.

Tabel 8. Produksi listrik berdasarkan simulasi operasi pada tahun basah Q₃₀

Bulan	Qp (m ³ /s)	H _{ef} (m)	P (kW)	E(kWH)
Jan I	2,50	22,40	395,53	142.392,56
Jan II	2,00	22,98	324,68	124.677,26
Feb I	2,00	23,34	329,65	118.673,10
Feb II	2,00	23,83	336,66	105.038,45
Mar I	2,00	24,06	339,84	122.341,41
Mar II	1,00	24,63	173,94	66.794,26
Apr I	2,00	24,63	347,89	125.239,25
Apr II	2,00	24,63	347,89	125.239,25
Mei I	3,20	24,33	549,97	197.990,27
Mei II	3,00	23,84	505,12	193.966,43
Jun I	3,00	23,17	491,00	176.758,91
Jun II	3,00	22,16	469,58	169.047,52
Jul I	2,00	21,46	303,21	109.154,81
Jul II	1,00	21,07	148,79	57.136,36
Agust I	1,00	20,65	145,86	52.511,19
Agust II	1,00	20,17	142,43	54.693,93
Sep I	1,00	21,42	151,28	54.460,85
Sep II	2,20	20,34	316,11	113.798,44
Okt I	1,00	20,10	141,97	51.109,28
Okt II	1,00	20,29	143,29	55.021,58
Nop I	1,00	20,98	148,18	53.344,42
Nop II	1,00	21,89	154,62	55.662,28
Des I	2,00	22,52	318,16	114.536,29
Des II	2,50	22,36	394,83	151.614,50
Jumlah			7200,00	2.592.000,00

Dari tabel hasil perhitungan produksi listrik berdasarkan simulasi operasi pada tahun basah Q₃₀ diatas diperoleh energi listrik maksimum terjadi pada bulan Mei I sebesar 197.990,27 kWh. Daya listrik maskimum terjadi pada bulan Mei I sebesar 549,97 kW.

Analisis ekonomi teknik rencana pembangunan unit PLTMWaduk Pondok menggunakan parameter *net present value* (NPV), *benefit cost ratio* (BCR), *internal rate of return* (IRR). Asumsi yang digunakan dalam melakukan analisis ekonomi teknik yaitu :

1. Umur ekonomis PLTM Waduk Pondok 30 tahun
2. Tingkat suku bunga ditetapkan 10 %
3. Lama konstruksi selama setahun
4. Biaya operasional dan pemeliharaan pada tahun ke-10 dan 20 akan naik menjadi 500% (mengingat dana yang diperlukan pada tahun tersebut digunakan untuk perbaikan bangunan dan jaringan)

Analisis sensitivitas bertujuan untuk mengkaji manfaat dan biaya ekonomi yang mungkin terjadi.

Tabel 8. Analisis sensitivitas bila beroperasi dengan simulasi pola operasi debit andalan Q_{90}

No.	Analisa Sensitivitas	Present Value		Kriteria Ekonomi		
		Biaya	Keuntungan	IRR	BCR	NPV
1	Keadaan 1 (normal)	Rp8.689.599.784,95	Rp5.417.598.042,45	3%	0,623	-Rp3.272.001.742,50
2	Keadaan 2 (biaya naik 20 %, manfaat normal)	Rp10.427.535.959,02	Rp5.959.360.670,57	1%	0,572	-Rp4.468.175.288,45
3	Keadaan 3 (biaya normal, manfaat turun 10%)	Rp8.689.613.299,18	Rp5.363.424.603,51	2%	0,617	-Rp3.326.188.695,67
4	Keadaan 4 (biaya naik 20%, manfaat turun 10%)	Rp10.040.120.899,18	Rp5.363.424.603,51	2%	0,534	-Rp4.676.696.295,67
5	Keadaan 5 (biaya proyek normal, manfaat naik 10%)	Rp8.689.613.299,18	Rp6.555.296.737,62	5%	0,754	-Rp2.134.316.561,56

Tabel 9. Analisis sensitivitas bila beroperasi dengan simulasi pola operasi debit tahun kering Q_{80}

No.	Analisa Sensitivitas	Present Value		Kriteria Ekonomi		
		Biaya	Keuntungan	IRR	BCR	NPV
1	Keadaan 1 (normal)	Rp8.331.678.150,02	Rp9.038.366.276,09	10%	1,085	Rp706.688.126,07
2	Keadaan 2 (biaya naik 20 %, manfaat)	Rp9.998.013.780,03	Rp9.038.366.276,09	7%	0,904	-Rp959.647.503,93
3	Keadaan 3 (biaya normal, manfaat)	Rp8.331.678.150,02	Rp8.134.529.648,48	8%	0,976	-Rp197.148.501,54
4	Keadaan 4 (biaya naik 20%, manfaat)	Rp9.682.185.750,02	Rp8.134.529.648,48	8%	0,840	-Rp1.547.656.101,54
5	Keadaan 5 (biaya proyek normal,	Rp8.331.678.150,02	Rp9.942.202.903,70	11%	1,193	Rp1.610.524.753,68

Tabel 10. Analisis sensitivitas bila beroperasi dengan simulasi pola operasi debit tahun normal Q_{50}

No.	Analisa Sensitivitas	Present Value		Kriteria Ekonomi		
		Biaya	Keuntungan	IRR	BCR	NPV
1	Keadaan 1 (normal)	Rp8.101.894.087,16	Rp16.898.564.464,50	25%	2,086	Rp8.796.670.377,34
2	Keadaan 2 (biaya naik 20 %,)	Rp9.722.272.904,59	Rp16.898.564.464,50	21%	1,738	Rp7.176.291.559,91
3	Keadaan 3 (biaya normal, manfaat)	Rp8.101.894.087,16	Rp15.208.708.018,05	22%	1,877	Rp7.106.813.930,89
4	Keadaan 4 (biaya naik 20%,)	Rp9.452.401.687,16	Rp15.208.708.018,05	22%	1,609	Rp5.756.306.330,89
5	Keadaan 5 (biaya proyek normal,	Rp8.101.894.087,16	Rp18.588.420.910,95	28%	2,294	Rp10.486.526.823,79

Tabel 11. Analisis sensitivitas bila beroperasi dengan simulasi pola operasi debit tahun basah Q_{30}

No.	Analisa Sensitivitas	Present Value		Kriteria Ekonomi		
		Biaya	Keuntungan	IRR	BCR	NPV
1	Keadaan 1 (normal)	Rp8.101.894.087,16	Rp16.898.564.464,50	25%	2,086	Rp8.796.670.377,34
2	Keadaan 2 (biaya naik 20 %,)	Rp9.722.272.904,59	Rp16.898.564.464,50	21%	1,738	Rp7.176.291.559,91
3	Keadaan 3 (biaya normal, manfaat)	Rp8.101.894.087,16	Rp15.208.708.018,05	22%	1,877	Rp7.106.813.930,89
4	Keadaan 4 (biaya naik 20%,)	Rp9.452.401.687,16	Rp15.208.708.018,05	22%	1,609	Rp5.756.306.330,89
5	Keadaan 5 (biaya proyek normal,	Rp8.101.894.087,16	Rp18.588.420.910,95	28%	2,294	Rp10.486.526.823,79

KESIMPULAN

1. Daya listrik yang dihasilkan pada simulasi pola operasi debit andalan Q_{90} adalah sebesar 1500 kW untuk daya listrik dan energi listrik 540.000 kWh. Daya listrik yang dihasilkan pada simulasi pola operasi debit tahun kering Q_{80} adalah sebesar 2300 kW dan energi listrik 819.000 kWh. Daya listrik yang dihasilkan pada simulasi pola operasi debit tahun normal Q_{50} adalah sebesar 4900 kW dan energi listrik 1.760.000 kWh. Daya listrik yang dihasilkan pada simulasi pola operasi debit tahun basah Q_{30} adalah sebesar 7200 kW dan energi listrik 2.592.000 kWh.

2. Besar biaya investasi untuk pembangunan unit PLTM Waduk Pondok adalah Rp 5.821.153.000,00.
3. Analisis ekonomi teknik rencana pembangunan PLTM Waduk Pondok pada keadaan normal menunjukkan tidak layak untuk dilaksanakan berdasarkan nilai Benefit Cost Ratio (BCR) pada operasi debit andalan Q_{90} sebesar $= 0,623$, IRR sebesar 3%, dan nilai NPV $-Rp 3.272.001.742,50$.

DAFTAR PUSTAKA

- Andika Putra Gulfanny. 2014. *Optimalisasi Tinggi Bendung Pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro di Desa Dukuh Kecamatan Banyudono Kabupaten Boyolali* (Skripsi). Surakarta : Universitas Sebelas Maret.
- Artono Arismunandar dan S. Kuwahara. 2000. *Teknik Tegangan Tenaga Listrik, Jilid I*. Jakarta: PT. Pradyaparamita.
- Bambang Triatmodjo. 2008. *Hidrologi Terapan*. Beta Offset: Yogyakarta.
- Budiono, Slamet Wahyudi dan Djoko Sutikno. 2011. Pra Studi Kelayakan Potensi PLTM/PLTA Di Area PT PJB Unit Pembangkit Brantas (Jurnal).
- Deandra Astried. 2013. *Simulasi Pola Operasi Pembangkit Listrik Tenaga Air di Waduk Kedungombo* (Skripsi). Surakarta : Universitas Sebelas Maret.
- Direktorat Jendral Energi Listrik dan Pemanfaatan Energi. 2009. *Pedoman Studi Kelayakan Hidrologi*.
- Ferianto Raharjo. 2007. *Ekonomi Teknik ; Analisis Pengambilan Keputusan*. Andi Offset.
- F.J. Mock. 1973. *Land Capability Apraisal Indonesia Water Availability Apraisal*. Bogor.
- Nanang Sulistianto. 2011. *Studi Kelayakan Pembangunan PLTA Pada Waduk Pacal* (Skripsi). Surakarta : Universitas Sebelas Maret.
- O.F. Patty. 1994. *Tebaga Air*. Jakarta : Erlangga.
- Perum Jasa Tirta I & Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret. 2009. *Laporan Penelitian Studi Identifikasi Potensi PLTA pada Bangunan-Bangunan Pengairan di Wilayah Bengawan Solo*.
- Ray. K. Linsley dan Yoseph B. Franzini. 1985. *Teknik Sumber Daya Air Jilid I*(Alih bahasa Ir. Djoko Sasongko, M.Sc). Jakarta: Erlangga.
- Roslan. K. 2011. *Mini Hydro Power Development*. European Journal of Scientific Research.
- Rudi Azuan. 2009. *Penigkatan Kinerja Operasi Waduk Dengan Cara Rotasi Pemberian Air Pada Daerah Irigasi Way Jepara, Lampung* (Thesis). Surakarta. Universitas Sebelas Maret.
- R.S. Varshney. 1977. *Hydro-Power Structure*. India : N.C Jain at the Roorkee Press.
- Sarwono Hardjomuljadi dan Sriyono D. Siswoyo. 2008. *Development Of Mini / Micro Hydro Power Plant For Rural Electricity In Indonesia*(Jurnal).
- Suwigyo dan Diding Suhardi. 2012. *Diskusi Perencanaan dan Pembangunan Pembangkit Tenaga Mikro Hidro (PLMH)*. Malang.
- Wa Ode Zulkaida. 2006. *Analisa Energi PLTA Dari Bendung Wawatobi Kabupaten Konawe Propinsi Sulawesi Tenggara* (Skripsi). Kendari : Universitas Haluleo Kendari.