

STUDI KELAYAKAN PENGEMBANGAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MINIHIDRO DI DESA SUKAMAJU KABUPATEN GARUT JAWA BARAT

FEASIBILITY STUDY OF MINIHYDRO POWER PLANT DEVELOPMENT IN SUKAMAJU VILLAGE GARUT REGENCY WEST JAVA

Ridwan Arief Subekti

Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik - LIPI
Komplek LIPI, Jl. Cisitua No.21, Bandung, Indonesia
E-Mail: ridwanarief_rais@yahoo.com

Diterima: 10 September 2015; Direvisi: September 2015; Disetujui: 19 November 2015

ABSTRAK

Kabupaten Garut merupakan salah satu wilayah yang banyak memiliki potensi energi listrik tenaga air karena kontur geografisnya berupa daerah pegunungan dengan aliran sungai yang deras. Salah satu sungai yang memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai pembangkit listrik adalah Sungai Cikawung. Untuk menggali lebih jauh potensi yang ada khususnya terkait pembangkitan tenaga listrik, diperlukan suatu studi kelayakan. Studi ini dilakukan untuk mengetahui tingkat kelayakan rencana pembangunan pembangkit listrik tenaga minihidro di Desa Sukamaju Kabupaten Garut Provinsi Jawa Barat dilihat dari segi teknis dan ekonomis. Metodologi yang digunakan mencakup kegiatan survei lapangan, analisis hidrologi, perhitungan daya dan energi, perencanaan bangunan sipil, perencanaan peralatan mekanikal elektrikal, dan analisis ekonomi. Dari hasil studi didapat bahwa lokasi rencana pengembangan minihidro memiliki potensi debit 2,0 m³/det, head 200 m dan 330 m, dengan potensi daya listrik 4.719 kW. Bendung didesain berdasarkan debit banjir dengan periode 100 tahun, sedangkan bangunan pengambilan, saluran pembawa, dan bangunan pelimpah didesain dengan kapasitas 20% lebih besar dari debit rencana turbin. Turbin yang akan digunakan adalah turbin Pelton berjumlah 2 unit berdaya 1.159 kW dan 3.560 kW. Analisis finansial memberikan gambaran bahwa rencana pengembangan minihidro ini layak untuk ditindaklanjuti karena memiliki nilai NPV Rp65.118.441.870,- dan IRR 26,07%.

Kata kunci: Energi terbarukan, pembangkit listrik tenaga minihidro, Sungai Cikawung, Desa Sukamaju

ABSTRACT

Garut District is one area that has many potential resources as regard to the development of hydropower station due to its topographical situation and high river flow. One of the potential rivers to be developed as power plant is Cikawung River. To explore further the existing potential, especially related to power generation, feasibility study is needed. This study is performed to evaluate the feasibility of mini-hydro power plant construction in Sukamaju Village, Garut Regency, West Java in terms of technical and economical. The deployed research method are field survey, hydrological analysis, power and energy computation, civil structures planning, mechanical-electrical equipment design, and economic analysis. From the results of the study, it is found that the selected location has the potential discharge of 2.0 m³/s, head of 200 m and 330 m, with a potential of 4,719 kW of electrical power. Weir is designed based on flood discharge with a period of 100 years, while the intake, channels, and spillway are designed with a capacity 20% greater than the turbine discharge plan. Two units Pelton turbines will be used to generate 1,159kW and 3,560 kW electric power. Financial analysis shows that this mini-hydro development plan is feasible to be realized because it has NPVs IDR 65,118,441,870,- and IRR 26.07%.

Keywords: Renewable energy, mini-hydro power plant, Cikawung River, Sukamaju Village

PENDAHULUAN

Perusahaan Listrik Negara (PLN) sebagai operator yang ditunjuk oleh pemerintah untuk menangani bidang kelistrikan di Indonesia masih belum dapat memenuhi kebutuhan energi listrik masyarakat secara keseluruhan. Kondisi geografis Indonesia yang merupakan negara

kepulauan, tersebar dan tidak meratanya pusat beban listrik, serta rendahnya tingkat permintaan listrik di beberapa wilayah merupakan faktor-faktor penghambat penyediaan energi listrik dalam skala nasional. Di sisi lain, makin berkurangnya ketersediaan sumber energi fosil, serta meningkatnya kesadaran untuk melestarikan lingkungan, akan mendorong

peningkatan penggunaan sumber energi alternatif.

Salah satu sumber energi listrik alternatif adalah dengan memanfaatkan energi terbarukan, seperti tenaga matahari, angin, air, biomas, dan lainnya. Pemanfaatan sumber energi terbarukan sebagai pembangkit listrik mempunyai beberapa kelebihan diantaranya relatif mudah didapat, dapat diperoleh dengan gratis, biaya operasional rendah, ramah lingkungan, proses produksinya tidak menyebabkan kenaikan temperatur bumi, dan tidak dipengaruhi oleh kenaikan harga bahan bakar. Saat ini pembangunan pembangkit listrik yang memanfaatkan sumber energi terbarukan khususnya energi air, sudah banyak dilaksanakan di Indonesia (LIPI, 2004).

Beberapa kajian tentang pengembangan potensi pembangkit listrik tenaga air skala kecil di Indonesia pernah dilakukan seperti di wilayah Yogyakarta, Bali, Sulawesi, dan Sumatra Barat (Anugrah, dkk, 2015), (Anugrah dan Setiawan, 2004), (Suarda, 2009), (Subekti dan Sudibyo, 2011). Dari kajian tersebut dapat disimpulkan bahwa Indonesia memiliki banyak potensi pembangkit listrik tenaga air skala kecil yang masih belum dikembangkan secara maksimal. Kajian perbandingan teknologi pembangkit listrik tenaga air skala kecil yang dapat diterapkan pada sungai aliran datar atau yang lebih dikenal dengan istilah *very low head turbine* juga pernah dilakukan oleh Subekti dan Irasari (2014). Pada kajian tersebut dijabarkan mengenai perbandingan pembangkit listrik dengan menggunakan sistem penstok dan sistem non-penstok ditinjau dari segi teknologi dan tekno ekonominya.

Kajian lainnya juga pernah dilakukan oleh Purwanto (2011) yang membahas tentang analisis finansial dan ekonomi terhadap beberapa tipe pembangkit listrik tenaga air skala kecil seperti tipe tradisional, semi modern, dan modern. Pembangkit listrik tipe tradisional secara finansial tidak layak namun keberadaan sangat membantu masyarakat sedangkan tipe semi modern dan modern secara finansial memberikan hasil yang menguntungkan. Pembangkit listrik tipe modern terinterkoneksi dengan jaringan PLN sehingga tidak memberikan dampak langsung kepada masyarakat sekitar kecuali kepada operator dan pengelolanya.

Pengembangan pembangkit listrik tenaga air skala kecil, selain sebagai penyedia energi listrik bagi masyarakat yang belum teraliri listrik, juga dapat memacu kegiatan perkonomian masyarakat pedesaan. Keberadaan pembangkit tersebut memberikan dampak positif terhadap berbagai kegiatan masyarakat sehingga layak

untuk dikembangkan (Susatyo dan Subekti, 2010).

Kabupaten Garut merupakan salah satu wilayah yang banyak memiliki potensi energi air, baik yang skala kecil (PLTMH) maupun skala menengah (PLTM). Potensi yang besar tersebut dipengaruhi oleh kontur geografis Kabupaten Garut yang berupa daerah pegunungan dengan aliran sungai yang deras. Salah satu wilayah yang memiliki potensi PLTM berada di Desa Sukamaju Kecamatan Talegong. Di desa tersebut mengalir sungai yang memiliki debit dan *head* yang ideal sehingga dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik. Penentuan debit sungai yang tepat akan berdampak pada rancangan PLTM yang baik karena debit sungai yang berfluktuasi akibat perubahan iklim secara langsung akan mengakibatkan terjadinya perubahan kapasitas produksi listrik (Anugrah dan Setiawan, 2014).

Untuk menunjang program pembangunan pembangkit listrik energi terbarukan khususnya tenaga air yang dicanangkan oleh pemerintah, kiranya perlu dilakukan pemetaan dan pematangan lokasi yang potensial melalui studi kelayakan agar dapat dikembangkan sebagai PLTM khususnya di wilayah Kabupaten Garut, Jawa Barat. Tujuan dari studi ini adalah untuk mengetahui tingkat kelayakan rencana pengembangan pembangkit listrik yang akan ditinjau dari sisi teknis dan ekonomis. Studi kelayakan merupakan suatu acuan yang sangat penting sebelum suatu proyek dijalankan.

Rencana pengembangan PLTM ini akan memanfaatkan potensi energi listrik tenaga air yang ada dalam rangka memenuhi kebutuhan energi yang murah dan terbarukan untuk wilayah Kabupaten Garut khususnya Desa Sukamaju dan sekitarnya. Dengan adanya PLTM ini diharapkan akan mampu mempercepat pengembangan ekonomi daerah dalam rangka mendukung pengembangan ekonomi nasional.

KAJIAN PUSTAKA

Pembangkit listrik tenaga minihidro atau PLTM adalah suatu pembangkit listrik tenaga air skala menengah dengan kapasitas daya 1 MW sampai 10 MW (IMIDAP, 2010). Prinsip kerja PLTM adalah dengan memanfaatkan potensi energi air yang dijatuhkan dari ketinggian tertentu untuk menggerakkan turbin air dan generator sehingga menghasilkan listrik.

PLTM umumnya dibangun berjenis *run off river* dimana *head* diperoleh tidak dengan membangun bendungan yang besar, melainkan dengan mengalihkan aliran air sungai ke sisi sungai dan menjatuhkannya lagi ke aliran sungai

dibawahnya dimana beda tinggi atau *head* yang diperlukan sudah diperoleh. Dengan menggunakan pipa pesat, air dialirkan ke rumah pembangkit yang berada di pinggir sungai untuk memutar roda turbin dan akan kembali lagi ke sungai melalui *tail race* atau saluran pembuangan. Energi mekanik putaran poros turbin akan diubah menjadi energi listrik oleh generator.

Besarnya daya yang dapat terbangkitkan oleh suatu PLTM dapat dihitung menggunakan persamaan (1).

$$P = \rho * g * Q * H_{net} \quad \dots(1)$$

dimana P adalah daya terbangkitkan (W), ρ adalah massa jenis air (kg/m^3), g adalah gravitasi (m/det^2), dan H_{net} adalah tinggi netto atau tinggi bersih (m) (Dietzel, 1990). Kriteria kelayakan suatu lokasi agar dapat dikembangkan sebagai pembangkit listrik tenaga minihidro adalah adanya aliran sungai dengan debit minimal antara 1,0 sampai 3,0 m^3/det (IMIDAP, 2008).

Dengan memperhitungkan lamanya pembangkit beroperasi dan faktor daya, maka besarnya energi listrik (E dalam kWh) yang dihasilkan oleh pembangkit selama satu tahun dapat dihitung menggunakan persamaan (2) (Harvey, dkk, 2002). Faktor daya yang dimaksud adalah probabilitas jalannya pembangkit dengan debit andalan yaitu 60%.

$$E = P * 24 * 365 * \text{faktor daya} \quad \dots(2)$$

METODOLOGI

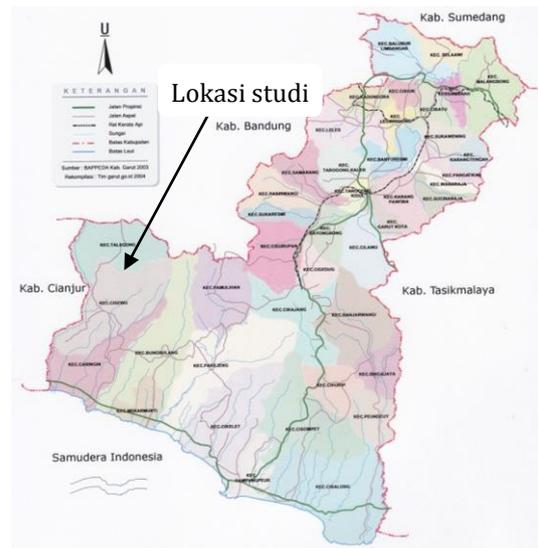
Deskripsi Wilayah Rencana Pengembangan PLTM

Lokasi studi kelayakan rencana pembangkit listrik terletak di Kabupaten Garut bagian selatan tepatnya di Desa Sukamaju Kecamatan Talegong Kabupaten Garut, Jawa Barat. Sebelah utara rencana lokasi pengembangan pembangkit berbatasan dengan Kabupten Bandung, sebelah barat berbatasan dengan Kabupaten Cianjur, dan sebelah selatan dan timur berbatasan dengan Kecamatan Cisewu Kabupaten Garut.

Di rencana lokasi pengembangan pembangkit mengalir Sungai Cikawung yang berpotensi untuk dijadikan sebagai pembangkit listrik tenaga air skala menengah atau PLTM. Kondisi daerah aliran sungai (DAS) rencana pembangkit ini cukup luas yaitu sekitar 34 km^2 (Mitra Agung Manunggal, 2011), memiliki debit sungai yang cukup besar, dan *head* yang cukup tinggi sehingga dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik.

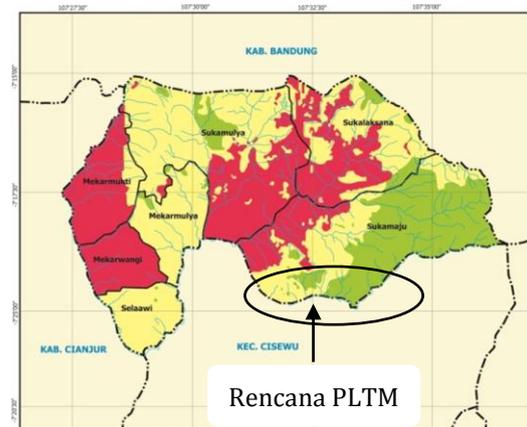
Pada lokasi rencana PLTM diambil titik referensi lokal BM/*bench mark* (patok tetap) dengan koordinat $7^{\circ}19'36,90''$ S $107^{\circ}32'36,90''$ E pada elevasi 982 mdpl. Lokasi rencana pengembangan PLTM seperti yang terdapat pada Gambar 1.

Untuk menuju lokasi rencana pengembangan PLTM, dari Bandung dapat ditempuh menggunakan kendaraan roda empat dengan rute Bandung, Pangalengan, Talegong yang berjarak 100 km dengan waktu tempuh kurang lebih 3 jam. Karena jalan relatif sempit, curam, dan licin, maka untuk sampai di lokasi harus menggunakan roda 4 jenis *off road*.



Sumber: Pemda Kabupaten Garut, 2003

(a)



Sumber: BPBD Pemda Kabupaten Garut, 2013

(b)

Gambar 1 Lokasi Studi Pengembangan PLTM; (a) Peta Kabupaten Garut; (b) DAS Sungai Cikawung

Metodologi Studi

Pada studi ini dilakukan survei lapangan pada bulan Februari sampai Maret 2011. Studi kelayakan rencana pengembangan pembangkit listrik minihidro (PLTM) ini dilakukan melalui tahapan kegiatan sebagai berikut:

- 1) analisis hidrologi
- 2) perhitungan daya dan energi
- 3) perencanaan bangunan sipil
- 4) perencanaan peralatan mekanikal elektrikal
- 5) analisis ekonomi.

Studi kelayakan diawali dengan *desk study*, pengumpulan data sekunder, pengumpulan data primer, survei topografi, hidrologi, dan kelistrikan yang dilanjutkan dengan analisis, dan perancangan sistem pembangkit. Tahapan tersebut dilalui agar diperoleh hasil studi yang akurat.

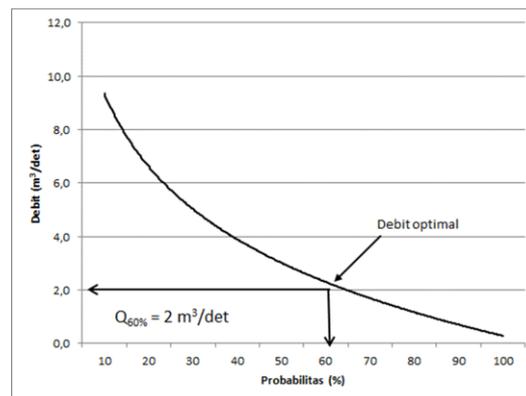
Analisis hidrologi pada studi ini menggunakan data klimatologi yang diperoleh dari stasiun pemantau cuaca terdekat yaitu Stasiun Klimatologi Pangalengan dari tahun 2003 sampai dengan tahun 2010 (PSDA Provinsi Jawa Barat, 2010). Selanjutnya dihitung besarnya evapotranspirasi potensial di lokasi rencana PLTM menggunakan metode Penman dan debit bulanan sungai menggunakan metode Moch. Data debit sungai ini selanjutnya dianalisis probabilitas kejadiannya dengan menggunakan persamaan Weibull untuk mengetahui nilai debit andalan yang akan digunakan. Selain itu juga dilakukan validasi debit Sungai Cikawung melalui pengukuran debit sesaat. Perencanaan bangunan sipil dan komponen mekanikal elektrikal pada studi ini mengacu pada besarnya potensi daya dan energi listrik yang dapat dihasilkan oleh PLTM.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1 Analisis Hidrologi

Analisis hidrologi adalah bagian yang paling utama dikerjakan pada suatu kegiatan perencanaan pengembangan PLTM untuk mengetahui besarnya potensi energi listrik yang dapat dibangkitkan. Rencana pengembangan PLTM ini akan memanfaatkan aliran Sungai Cikawung dengan DAS yang pada umumnya merupakan kawasan yang sudah terbangun, lahan pertanian, dan hutan yang sudah terganggu.

Dari data besarnya curah hujan bulanan dan jumlah hari hujan yang didapat dari Stasiun Klimatologi Pangalengan, selanjutnya dengan metode Penman dan Moch dihitung besarnya nilai evapotranspirasi potensial dan debit



Sumber: diolah dari data curah hujan bulanan PSDA Provinsi Jawa Barat, 2010

Gambar 2 Flow Duration Curve Sungai Cikawung

tahunan Sungai Cikawung. Dari perhitungan debit rata-rata diketahui bahwa debit terkecil Sungai Cikawung terjadi pada bulan Agustus sedangkan debit terbesar terjadi pada bulan Desember. Dengan menyusun debit sungai dari yang nilainya terbesar sampai yang terkecil, jumlah hari kejadian, dan perhitungan probabilitas tiap debitnya menggunakan persamaan Weibull, maka diperoleh grafik kurva *flow duration curve* (FDC) seperti yang terdapat pada Gambar 2.

Dari Gambar 2 dapat dilihat bahwa debit terbesar Sungai Cikawung adalah sekitar 9,0 m³/det dengan probabilitas kejadian sebesar 10% dalam setahun dan debit terkecilnya adalah 0,5 m³/det. Dari sini dapat dipastikan bahwa air sungai tidak pernah kering meskipun saat musim kemarau.

Dari kurva tersebut selanjutnya ditentukan debit andalan yaitu debit yang dapat diandalkan untuk suatu reliabilitas tertentu agar pembangkit dapat berjalan dengan optimal dalam satu tahun. Untuk keperluan PLTM biasa digunakan debit andalan 60%. Artinya dengan kemungkinan 60% debit yang terjadi adalah lebih besar atau sama dengan debit tersebut. Seperti yang terlihat pada Gambar 2, dengan probabilitas 60% maka diperoleh debit andalan sebesar 2,0 m³/det.

Untuk memvalidasi debit andalan Sungai Cikawung, maka dilakukan pengukuran debit sesaat pada bulan Februari 2011. Pengukuran dilakukan selama 5 hari berturut-turut dengan frekuensi pengukuran 2 kali sehari di pagi dan sore hari. Pada pengukuran debit sesaat didapat bahwa debit rata-rata Sungai Cikawung adalah 2,48 m³/det.

Berdasarkan data hidroklimatologi yang ada, hasil perhitungan evapotranspirasi

potensial, perhitungan debit andalan, dan validasi melalui pengukuran debit sesaat, maka dapat ditentukan bahwa debit Sungai Cikawung yang dapat diandalkan untuk memenuhi kebutuhan sebagai pembangkit listrik adalah sebesar 2,0 m³/det.

2 Perhitungan Daya dan Energi

Perhitungan besarnya potensi daya listrik yang dapat dibangkitkan oleh rencana pengembangan PLTM dipengaruhi oleh dua parameter utama yaitu besarnya ketersediaan debit air dan *head* atau tinggi tekan. Saat ini sebagian debit air Sungai Cikawung dipergunakan untuk keperluan saluran irigasi. Dari pengukuran pada saat survei lapangan diketahui bahwa debit air yang mengalir pada saluran irigasi adalah 0,7 m³/det. Agar pengembangan PLTM ini tidak mengganggu saluran irigasi yang ada, maka akan dilakukan pengaturan debit air dimana dari debit andalan Sungai Cikawung yang besarnya 2,0 m³/det, akan tetap dialirkan sebagian untuk keperluan irigasi sebesar 0,7 m³/det sesuai dengan kebutuhan saluran irigasi saat ini.

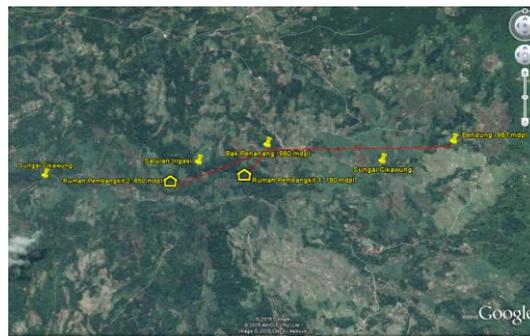
Dari survei topografi yang dilakukan dan dengan mempertimbangkan saluran irigasi yang ada agar tidak terganggu, maka rencana pengembangan PLTM ini akan menggunakan dua buah sistem pembangkit dengan *head* yang berbeda. Satu unit pembangkit akan dibangun di atas saluran irigasi dengan *head* 200 m, dan satu unit lagi akan dibangun di bawah saluran irigasi dengan *head* 330 m (lihat Gambar 3).

Secara singkat, debit dan *head* rencana pengembangan PLTM ini adalah sebagai berikut:

- 1) $Q_1 = 0,7 \text{ m}^3/\text{det}$, $H_1 = 200 \text{ m}$
- 2) $Q_2 = 1,3 \text{ m}^3/\text{det}$, $H_2 = 330 \text{ m}$.

Dengan menggunakan persamaan (1) dan (2), maka besarnya daya dan energi listrik yang dapat dibangkitkan dari rencana pengembangan PLTM ini dapat dihitung dan ditampilkan dalam bentuk tabel seperti yang terdapat pada Tabel 1.

Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa pembangkit dapat beroperasi dengan debit desain 2,0 m³/det selama 219 hari dalam setahun. Sedangkan hari lainnya kapasitas yang dihasilkan oleh pembangkit menurun seiring dengan penurunan debit sungai. Dalam satu tahun terdapat sekitar 36 hari pembangkit berhenti operasi karena debit sungai yang minim menyebabkan efisiensi turbin menjadi sangat rendah sehingga tidak efektif untuk dioperasikan. Pada saat tidak beroperasi tersebut dapat dimanfaatkan untuk pengecekan, perawatan, dan perbaikan sistem pembangkit. Energi listrik



Sumber: Google Earth, 2015

Gambar 3 Rencana Lokasi Bangunan PLTM

terbangkitkan total dalam setahun adalah sekitar 29.903.248 kWh.

3 Perencanaan Bangunan Sipil

Untuk mengalirkan air dari sungai menuju ke pipa pesat, diperlukan beberapa bangunan sipil antara lain adalah bendung beserta semua kelengkapannya, bangunan *intake*, *sand trap*, saluran pembawa, bak penenang, pipa pesat, dan rumah pembangkit. Bangunan sipil utama rencana PLTM dibedakan atas bangunan yang dirancang berdasarkan debit rencana turbin, dan bangunan yang dirancang berdasarkan debit banjir rencana dengan periode ulang 100 tahun. Sungai Cikawung memiliki debit banjir periode ulang 100 tahun sebesar 123,693 m³/det (PSDA Provinsi Jawa Barat, 2010). Bangunan yang dirancang berdasarkan debit banjir rencana 100 tahunan tersebut adalah bendung, pelimpah dan pintu penguras. Sedangkan bangunan yang dirancang berdasarkan debit rencana turbin 2,0 m³/det adalah pintu pengambilan, saluran pembawa, kolam pengendap pasir, saluran penghantar, bak penenang, pipa pesat, rumah pembangkit, dan saluran pembuangan.

1) Bendung dan Bangunan Pengambilan

Bendung direncanakan dengan memenuhi kriteria hidraulik dan stabilitas struktur sesuai dengan persyaratan. Bendung dibuat agar bisa memfasilitasi air mengalir sesuai dengan debit andalan yang akan digunakan, serta secara struktur harus aman terhadap keseimbangan gaya geser, guling, dan gerusan tanah. Tipe bendung yang dipilih adalah tipe bendung pelimpah pasangan batu dengan lapisan beton. Bagian bendung yang harus direncanakan adalah mercu bendung, pintu pembilas, peredam energi (kolam olakan), tanggul pelindung, tembok pangkal, dan bangunan pengambilan.

Bangunan pengambilan berfungsi untuk menyadap air sungai yang telah dibendung sesuai

dengan kebutuhan debit. Oleh karena itu ukuran bangunan pengambilan tergantung dari kapasitas debit rencana saluran pembawa. Bangunan pengambilan sebaiknya ditempatkan sedekat mungkin dengan as bendung. Lantai pengambilan direncanakan 1,5 m di atas lantai bendung agar sedimen tidak terbawa masuk (JICA dan IBEKA, 2010). Kapasitas bangunan pengambilan dirancang sebesar 120% dari debit rencana turbin (Subagja, dkk, 2009). Hal ini dimaksudkan untuk membatasi debit air yang masuk ke saluran pembawa apabila terjadi kelebihan debit saat banjir. Volume bangunan pengambilan yang lebih besar dari debit rencana juga bertujuan untuk mengakomodasi penurunan debit air apabila terjadi penyumbatan pada saringan *intake* agar air yang masuk ke saluran pembawa tetap sesuai dengan debit rencana. Pada rencana pengembangan PLTM ini, debit rencana turbin adalah 2,0 m³/det sehingga bangunan pengambilan didesain memiliki kapasitas 2,4 m³/det. Sebelum pintu pengambilan dipasang

saringan (*trash rack*) yang terbuat dari pelat strip dengan posisi pemasangan vertikal.

2) Saluran Pembawa, Bak Penenang, dan Bangunan Pelimpah

Saluran pembawa dibuat dari pasangan batu berbentuk segi empat dengan kapasitas debit saluran pembawa diambil 120% kali debit rencana turbin (Subagja, dkk, 2009). Hal ini ditujukan agar pada saat pembangkit beroperasi pada kapasitas daya maksimal, maka muka air di bak penenang tidak mengalami penurunan ketinggian. Untuk itu saluran pembawa didesain dapat menampung air dengan kapasitas 2,4 m³/det atau 20% lebih besar dari debit rencana turbin.

Bak penenang dirancang untuk mendapatkan aliran air yang stabil sebelum masuk ke pipa pesat. Elevasi muka air pada kolam bak penenang sama dengan elevasi muka air pada ujung akhir saluran pembawa. Kecepatan air pada bak penenang direncanakan

Tabel 1 Perhitungan Energi Terbangkitkan PLTM

Hari Kejadian	Debit rata ² (m ³ /det)	Q/Qmax (%)	Effisiensi (η)			Head Efektif (m)	Daya (kW)	Energi (kWh)
			η Turbin	η Gen	η Total			
18	2,0	100	0,890	0,950	0,846	330 & 200	4.719	2.038.819
37	2,0	100	0,890	0,950	0,846	330 & 200	4.719	2.152.087
55	2,0	100	0,890	0,950	0,846	330 & 200	4.719	2.038.819
73	2,0	100	0,890	0,950	0,846	330 & 200	4.719	2.038.819
91	2,0	100	0,890	0,950	0,846	330 & 200	4.719	2.038.819
110	2,0	100	0,890	0,950	0,846	330 & 200	4.719	2.152.087
128	2,0	100	0,890	0,950	0,846	330 & 200	4.719	2.038.819
146	2,0	100	0,890	0,950	0,846	330 & 200	4.719	2.038.819
164	2,0	100	0,890	0,950	0,846	330 & 200	4.719	2.038.819
183	2,0	100	0,890	0,950	0,846	330 & 200	4.719	2.152.087
201	2,0	100	0,890	0,950	0,846	330 & 200	4.719	2.038.819
219	2,0	100	0,890	0,950	0,846	330 & 200	4.719	2.038.819
237	1,7	85	0,890	0,950	0,846	330 & 200	4.396	1.899.076
256	1,5	75	0,880	0,950	0,836	330 & 200	3.477	1.585.645
274	1,2	60	0,821	0,950	0,780	330 & 200	2.028	875.922
292	1,0	50	0,747	0,950	0,710	330 & 200	1.107	478.183
310	0,9	45	0,570	0,950	0,542	330 & 200	563	243.252
329	0,8	40	0,069	0,950	0,066	330 & 200	34	15.541
347	0,6	30	0,000	0,000	0,000	330 & 200	0	0
365	0,5	25	0,000	0,000	0,000	330 & 200	0	0
Energi Terbangkitkan Total =							29.903.248	

sebesar 0,2 m/det untuk mencapai kondisi air yang tenang sebelum masuk ke pipa pesat (Bumiloka Cikaso Energi, 2009).

Bak penenang dilengkapi dengan bangunan pelimpah samping yang berada di sepanjang sisi bak arah sungai sehingga luapan air dapat langsung terbuang ke sungai. Bangunan pelimpah juga dirancang dengan kapasitas sebesar 120% dari debit rencana turbin atau 2,4 m³/det untuk mengantisipasi penutupan katup secara mendadak (IMIDAP, 2009). Debit desain bangunan pelimpah yang lebih besar tersebut dimaksudkan untuk menghindari terjadinya pelimpasan (*overtopping*) pada bak penenang apabila terjadi kelebihan debit sehingga struktur bak penenang dan bangunan pelimpah cukup aman.

3) Pipa Pesat

Pipa pesat atau penstok digunakan untuk menyalurkan air dari bak penenang ke tubin air yang berada di dalam rumah pembangkit. Faktor-faktor yang menjadi pertimbangan dalam menentukan pipa pesat adalah pemilihan rute yang sedemikian rupa agar memperoleh panjang dan belokan seminimum mungkin tetapi kuat dengan pondasi yang kokoh. Diameter pipa pesat harus dipertimbangkan dengan teliti untuk mendapatkan diameter yang ekonomis. Tekanan hidrolis maksimum digunakan untuk mendesainnya. Selain itu, korosi dan kehilangan energi seminimal mungkin harus juga dipertimbangkan.

Pipa pesat yang akan digunakan untuk dua unit pembangkit memiliki panjang total sekitar 1.460 m dengan kemiringan rata-rata 25°. Hal ini didasarkan pada survei dan pemetaan topografi yang dilakukan untuk mengetahui keadaan kontur tanah di lapangan, dan perhitungan jarak antara rencana posisi bak penenang dengan rumah pembangkit.

4) Rumah Pembangkit

Rumah pembangkit atau *power house* merupakan bangunan yang memuat perangkat-perangkat penting yang menentukan operasi PLTM. Oleh karena itu struktur rumah pembangkit harus memiliki keamanan yang tinggi. Penempatan rumah pembangkit mempertimbangkan kondisi real di lapangan saat dilakukannya survei. Posisi saluran irigasi yang ada, perhitungan potensi daya terbangkitkan yang optimal, dan faktor keamanan menjadi pertimbangan dalam menentukan posisi rumah pembangkit. Pengembangan PLTM ini direncanakan mempunyai dua buah rumah

pembangkit. Satu rumah pembangkit berada di atas saluran irigasi dengan elevasi 650 mdpl, dan satu rumah pembangkit lagi berada di bawah saluran irigasi dengan elevasi 780 mdpl. Lokasi ini berjarak sekitar 50 m dari tepi sungai. Beda tinggi antara rumah pembangkit dengan permukaan air sungai kurang lebih 5 m sehingga aman dari banjir.

Perancangan komponen bangunan sipil pengembangan potensi PLTM ini harus dilakukan dengan matang agar dapat berfungsi dengan baik. Susatyo dan Subekti (2010) menjelaskan bahwa desain teknis harus dilakukan secara tepat dan akurat, dengan menerapkan teknologi yang telah teruji agar pembangkit listrik mempunyai kehandalan yang baik.

Tabel 2 Data Teknis Perencanaan Komponen Sipil PLTM

Sumber: diolah dari data survei lapangan

No	Uraian	Nilai	Satuan
1	Umum		
	1) Luas DAS	34	km ²
	2) Debit desain	0,7 & 1,3	m ³ /det
	3) Debit desain total	2,0	m ³ /det
	4) Tinggi jatuh (<i>head</i>)	200 & 330	m
2	5) Daya total	4.719	kW
	Bendung		
	1) Kemiringan tebing	60	°
	2) Lebar sungai	11,5	m
	3) Kedalaman sungai rata-rata	0,388	m
	4) Lebar bendung	20	m
	5) Elevasi dasar bendung	981	mdpl
3	6) Perkiraan tinggi bendung	5	m
	7) Elevasi mercu	986	mdpl
	Saluran pembawa		
1	1) Elevasi	982	mdpl
	2) Panjang	1542	m
	3) Lebar	3	m
4	Bak Pengendap		
	1) Elevasi	980	mdpl
	2) Panjang	36	m
5	3) Lebar	17	m
	Bak penenang		
	1) Elevasi	980	mdpl
	2) Panjang	40	m
6	3) Lebar	20	m
	4) Dalam	2,5	m
	Pipa pesat		
1	1) Panjang	520 & 940	m
	2) Diameter pipa	0,76	m

7	3) Ketebalan pipa	12	mm
	4) Kemiringan lereng	25	°
	Rumah pembangkit 1		
	1) Elevasi	780	mdpl
8	2) Dimensi	32 x 10	m
	3) Jumlah turbin	1	unit
	Rumah pembangkit 2		
	1) Elevasi	650	mdpl
	2) Dimensi	32 x 10	m
	3) Jumlah turbin	1	unit

Selanjutnya perancangan komponen bangunan sipil rencana pengembangan PLTM ini dibuat dalam bentuk tabel seperti yang terdapat pada Tabel 2.

4 Perencanaan Peralatan Mekanikal Elektrikal

1) Turbin Air

Pemilihan jenis turbin yang rencananya akan digunakan pada pengembangan pembangkit listrik skala minihidro ini didasarkan pada desain debit aliran dan tinggi jatuh air atau *head*. Data hidrologi digunakan sebagai dasar untuk perancangan peralatan mekanikal elektrikal khususnya perencanaan turbin air. Pada tahap desain dasar digunakan data sebagai berikut:

- 1) $Q_{\text{turbin } 1} = 0,7 \text{ m}^3/\text{det}$ dan $H_{\text{eff } 1} = 200 \text{ m}$
- 2) $Q_{\text{turbin } 2} = 1,3 \text{ m}^3/\text{det}$ dan $H_{\text{eff } 2} = 330 \text{ m}$

Turbin yang akan digunakan pada rencana PLTM ini adalah jenis turbin Pelton karena turbin jenis ini cocok untuk diaplikasikan pada *head* yang tinggi dengan ketinggian sekitar 50 m sampai 1000 m. Seperti yang terdapat pada Gambar 4, dengan debit $0,7 \text{ m}^3/\text{det}$ *head* 200 m dan debit $1,3 \text{ m}^3/\text{det}$ *head* 330 m, wilayah operasi turbin yang cocok berada pada area turbin tipe Pelton (garis warna ungu).

Turbin Pelton yang dipilih adalah turbin pelton yang kecil dengan sumbu turbin horizontal karena memiliki beberapa keunggulan bila dibandingkan dengan turbin sumbu vertikal. Keunggulan tersebut antara lain yaitu lebih mudah dalam pengerjaannya di rumah pembangkit, dapat diseting lebih tinggi dari lantai bila terdapat perubahan ketinggian saluran buang, tata letak peralatan yang lebih sederhana, dan kemudahan dalam pemasangan dan pemeliharaan.

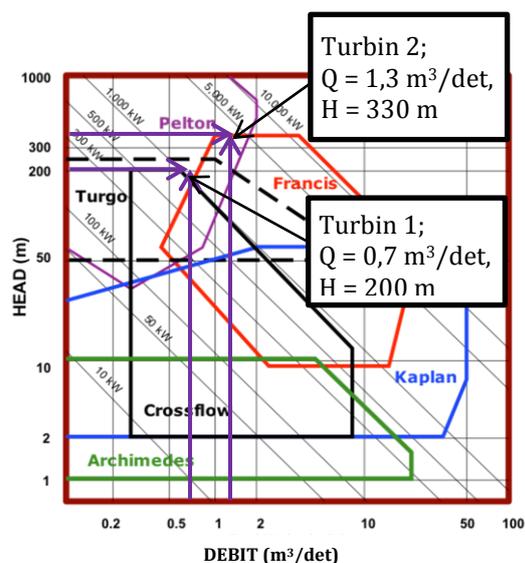
Kapasitas turbin yang ada di pasaran juga menjadi bahan pertimbangan untuk menentukan jumlah unit turbin. Turbin Pelton yang ada dipasaran untuk *head* sekitar 200 m dan 330 m dengan debit mulai dari $0,5 \text{ m}^3/\text{det}$ sampai dengan $1,3 \text{ m}^3/\text{det}$ adalah turbin Pelton dengan

kapasitas 1.000 kW, 1.159 kW, 2.210 kW, 2.550 kW, dan 3.560 kW. Berdasarkan data yang diperoleh dari salah satu produsen pembuat turbin air, maka pada rencana pengembangan PLTM ini akan menggunakan 2 buah turbin Pelton poros horizontal dengan daya 1.159 kW dan 3.560 kW dengan putaran operasi turbin 600 rpm (Hunan Vanguard Group, 2011).

2) Generator

Generator berfungsi untuk mengubah energi mekanik putaran poros menjadi energi listrik. Konversi energi tersebut berlangsung melalui medium medan magnet. Bagian utama generator terdiri dari bagian yang berputar disebut rotor dan bagian yang diam yang disebut stator. Diantara rotor dan stator terdapat celah udara (JICA dan IBEKA, 2010).

Pemilihan jenis generator yang sesuai dengan kapasitas rencana pengembangan PLTM ini adalah generator sinkron dengan eksitasi sendiri yang memiliki poros horizontal. Generator induksi tidak cocok digunakan karena tidak adanya ketersediaan jumlah dari *synchronous* generator lain dalam jaringan distribusi untuk menyediakan kebutuhan daya reaktif dari induksi generator tersebut. Generator induksi juga mempunyai kekurangan karena tidak memiliki pengaturan pada sistem frekuensi atau tegangan. Pembangkit medan listrik dioda berputar tanpa sikat (*brushless*) lebih disukai karena pemeliharaan yang mudah dan kehandalan yang tinggi. Generator juga harus dilengkapi dengan ventilasi dan pendingin udara menurut standard IEC 34-5 (International Electrotechnical Commission, 1991).



Sumber: Bihilmayer, 2005

Gambar 4 Diagram Pemilihan Jenis Turbin

Kapasitas sebuah generator dinyatakan dalam Volt-Ampere (VA). Sebuah generator harus memiliki kapasitas VA yang cukup untuk memenuhi kebutuhan pada saat beban maksimum. Dengan memperhatikan rugi-rugi generator serta untuk menjamin kinerja generator maka perlu adanya faktor keamanan, biasanya 20% (JICA dan IBEKA, 2010). Dari beberapa pabrikan pembuat generator, *rated voltage* generator yang cocok adalah 3.300 V sampai 6.300 V dengan putaran 600 rpm. Frekuensi generator adalah 50 Hz dengan power factor ($\cos \phi$) 0,8, dan efisiensi generator 94,5% (Hunan Vanguard Group, 2011). Karena rencana pengembangan PLTM ini menggunakan dua unit pembangkit, maka generator yang digunakan juga dua buah.

3) Peralatan Pendukung

Selain turbin air dan generator, beberapa peralatan mekanikal elektrikal pendukung lainnya juga harus disiapkan. Beberapa peralatan tersebut antara lain adalah *governor*, *inlet valve*, *transformer*, dan *switch gear* atau kontrol panel.

Governor digunakan sebagai 'interface' antara turbin air dan generator. Penggunaan turbin perlu dikontrol agar perubahan frekuensi yang terjadi masih dalam batas yang diijinkan. Kecepatan perputaran turbin perlu dijaga tetap stabil dan memiliki respon waktu yang baik. Karakterisasi pemilihan *governor* didasarkan terutama pada besaran momen inersia bandul putar *governor*, interval waktu *start* minimum untuk operasi stabil, dan interval waktu *start* yang dikaitkan dengan gejala *water hammer*. Pemilihan *governor* tergantung dari kapasitas kerja atau kemudahan kebutuhan kontrol. Terdapat dua tipe *governor* yaitu hidrolik-mekanikal dan hidrolik-elektro. Hidrolik-elektro merupakan unit yang cukup baik karena terdiri dari sistem kontrol yang *solid state*, akan tetapi untuk daerah yang terpencil unit ini tidak cocok. Sedangkan jenis hidrolik-mekanikal selain harganya lebih murah, sistemnya lebih sederhana dan umumnya sama dengan hidrolik-elektro yang digunakan pada pembangkit diesel sehingga standarisasi dari komponennya bisa dihasilkan dengan biaya rendah.

Inlet valve dipasang pada akhir pipa pesat untuk pengamanan debit air selama turbin tidak beroperasi (*overhaul*). Untuk pemasangan turbin lebih dari satu unit dilakukan pencabangan dari pipa pesat utama. Diameter *inlet valve* mengacu pada diameter pipa pesat yaitu 0,76 m.

Step-up transformer menggunakan tipe pendingin dengan minyak tipe SPLN 8, karena

tipe ini cocok untuk daerah pegunungan terbuka yang berdekatan dengan gedung pembangkit serta sekelilingnya dipagar. *Transformer* harus dilengkapi dengan *relay* dan alarm petunjuk temperatur minyak serta penyangganya. Penyangga *transformer* bila diperlukan akan ditempatkan pada bagian dalam gedung pembangkit dan diproteksi dengan pemutus primer. Kapasitas transformator dipilih sama dengan output generator.

Switchgear adalah panel distribusi yang mendistribusikan beban ke panel-panel yang lebih kecil kapasitasnya. Semua *switchgear* ditempatkan di bagian dalam gedung. Mekanisme pengoperasian menggunakan tipe pemutus bebas dengan pemutusan listrik. Instalasi tegangan rendah (380 V) menggunakan *air circuit breaker* (ACB) dengan proteksi arus lebih integral untuk generator *circuit breaker*. *Circuit breaker* dengan panel 20 kV lebih disukai terbuat dari metal guna menambah reliabilitasnya.

5 Analisis Ekonomi

Analisis finansial adalah suatu kegiatan analisis yang dilakukan untuk mengetahui tingkat kelayakan suatu proyek yang direncanakan ditinjau dari aspek finansial. Kajian finansial operasional PLTM ini direncanakan memiliki masa kontrak dengan PLN selama 20 tahun.

Kelayakan suatu proyek dapat dilihat dari beberapa patokan penggunaan analisa finansial seperti IRR (*internal rate of return*) dan NPV (*net present value*). IRR suatu proyek mencerminkan *rate* dari *benefit* yang didapatkan atas investasi yang dikeluarkan proyek tersebut.

IRR dipengaruhi oleh beberapa parameter seperti aliran *net cash flow* dan aliran biaya. Sedangkan NPV suatu proyek mencerminkan *total gain* yang didapatkan proyek tersebut selama umurnya. NPV dipengaruhi oleh beberapa parameter yang antara lain adalah aliran *revenue*, aliran biaya, aliran *net cashflow*, dan *discount rate*.

Biaya investasi rencana pengembangan PLTM ini dibagi menjadi beberapa bagian seperti biaya pengembangan (*development cost*), biaya *engineering, procurement, and construction* (EPC), biaya *overhead* dan teknis, biaya tak terduga, dan biaya pendanaan. Besaran anggaran pekerjaan sipil yang digunakan pada analisis finansial ini telah disesuaikan dengan beberapa faktor seperti letak lokasi rencana PLTM, nilai kurs US\$, dan perkiraan biaya tak terduga. Sedangkan anggaran peralatan mekanikal elektrikal mengacu pada data yang diperoleh dari produsen pembuat peralatan dalam mata uang US\$. Pada analisis

finansial ini, besaran anggaran disesuaikan dengan nilai kurs Dolar sebesar Rp13.000,-/US\$. Untuk lebih jelasnya besaran perincian biaya investasi tersebut dibuat dalam bentuk tabel seperti yang terdapat pada Tabel 3, sedangkan hasil perhitungan analisis kelayakan ekonomi ditampilkan dalam bentuk tabel seperti yang terdapat pada Tabel 4.

Hasil produksi energi listrik dari rencana pengembangan PLTM ini rencananya akan dijual ke PLN melalui jaringan interkoneksi tegangan menengah. Sesuai dengan Peraturan Menteri ESDM No 22 tahun 2014 tentang pembelian tenaga listrik dari pembangkit listrik tenaga air oleh PLN, maka pada tahun ke 1 sampai tahun ke 8, harga jual listriknya adalah Rp1.075,-/kWh. Sedangkan untuk tahun ke 9 sampai tahun ke 20, harga jual listriknya Rp750,-/kWh. Dari hasil analisis finansial seperti yang terdapat pada Tabel 4, dapat dilihat bahwa dengan masa kontrak 20 tahun, produksi energi listrik 24.555 MWh per tahun, dan suku bunga pinjaman 14%, maka proyek tersebut memberikan nilai NPV sebesar Rp65.118.441.870,-, IRR 26,07%, dengan *payback period* 6 tahun.

Tabel 3 Perkiraan Biaya Investasi Rencana Pengembangan PLTM

No	Jenis Pekerjaan	Biaya (Rp)
1	Biaya pengembangan	
1)	Studi potensi dan pra FS	65.000.000
2)	FS detail / detail design	390.000.000
3)	Perijinan	260.000.000
4)	Pembebasan lahan	650.000.000
	Sub Total 1	1.365.000.000
2	Pekerjaan sipil	
1)	Persiapan dan umum	253.825.000
2)	Bendung dan intake	7.081.376.427
3)	Saluran pembawa	6.743.032.474
4)	Bak penenang & bangunan penguras	1.672.151.772
5)	Pipa pesat	11.899.770.784
6)	Rumah pembangkit	3.365.222.518
7)	Rumah operator	387.194.310
8)	Jalan masuk	1.290.120.000
	Sub Total 2	32.692.693.284
3	Perlalatan mekanikal elektrik	17.274.790.000
4	Jaringan transmisi	487,500,000
	Biaya EPC (2 + 3 + 4)	50.454.983.284
	Direct Cost (1 + EPC)	51.819.983.284
5	Biaya overhead & teknis	5.181.998.328

6	Biaya tak terduga	5.181.998.328
7	Biaya pendanaan	
1)	Bunga pinjaman (IDC) (Bunga pinjaman 14%)	3.791.278.905
2)	Biaya pendanaan (<i>financing fee</i>)	963.292.033
	Sub Total 7	4.754.570.938
	TOTAL BIAYA INVESTASI	66.938.550.879

Rencana pengembangan PLTM ini merupakan salah satu proyek yang dapat disinergikan dengan program mekanisme pembangunan bersih / *clean development mechanism* (CDM). Selain dapat menunjang pengurangan kadar emisi karbon dan pemanasan global yang tertuang dalam amanat Protokol Kyoto, CDM juga dapat meningkatkan IRR suatu proyek melalui proses jual beli sertifikat reduksi emisi / *certified emission reduction* (CER) seperti yang diungkapkan oleh Febrijanto (2013).

Tabel 4 Hasil Analisis Finansial

Parameter	Nilai	Satuan
1. Umum		
Kapasitas kotor	4.719	kW
Kapasitas bersih	4.671	kW
CF	60	%
Produksi listrik per tahun	24.555	MWh
Masa kontrak	20	tahun
Harga jual listrik tahun ke 1-8	1.075	Rp/kWh
Harga jual listrik tahun ke 9-20	750	Rp/kWh
Income tax	25	%
Pajak air	5	Rp/kWh
2. Investasi dan pendanaan		
Total project cost	66.938.550.879	Rp
D/E ratio	72,13	%
Equity	27,87	%
Total loan	48.283.356.897	Rp
Equity	18.655.193.982	Rp
Konstruksi tahun ke 1	60	%
Konstruksi tahun ke 2	40	%
Financing fee	2	%
Discount factor	12	%
Interest	14	%
Term	10	tahun
Grace period	2	tahun
Repayment	8	tahun
3. Cash flow		
Revenue tahun ke 1-8	26.396.660.862	Rp/ thn
Revenue tahun ke 9-20	18.416.275.020	Rp/thn
Depresiasi	3.346.927.544	Rp/ thn
Operational dan	2.374.590.335	Rp (thn

<i>maintenance</i> (tiap tahun meningkat sesuai nilai eskalasi)		ke 1)
Pajak air	122.755.167	Rp/ thn
4. NPV dan IRR		
NPV <i>project</i>	65.118.441.870	Rp
NPV <i>equity</i>	93.341.426.217	Rp
IRR on <i>project</i>	26,07	%
IRR on <i>equity</i>	57,47	%
<i>Payback period</i>	6	tahun

KESIMPULAN

Studi kelayakan rencana pengembangan pembangkit listrik tenaga air skala minihidro di Desa Sukamaju kabupaten Garut Jawa Barat telah dibahas pada makalah ini. Hasil analisis hidrologi aliran Sungai Cikawung yang ada di area tersebut menunjukkan bahwa potensi debit yang dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik adalah 2,0 m³/det. Bangunan sipil utama seperti bendung didesain berdasarkan debit banjir dengan periode 100 tahun, memiliki lebar 20 m dengan ketinggian 5 m. Beberapa bangunan sipil seperti bangunan pengambilan, saluran pembawa, dan bangunan pelimpah didesain dengan kapasitas 2,4 m³/det atau 20% lebih besar dari debit rencana turbin. Agar tidak mengganggu saluran irigasi yang ada, maka PLTM ini direncanakan dibangun dengan dua buah rumah pembangkit yang berada pada elevasi 650 mdpl dan 780 mdpl. Rencana PLTM ini memiliki *head* 200 m dan 330 m dengan panjang total pipa pesat 1.460 m, menggunakan dua unit turbin Pelton dengan potensi daya listrik total yang dapat dibangkitkan sekitar 4.719 kW. Hasil analisis finansial menunjukkan bahwa rencana pengembangan PLTM dengan biaya investasi Rp66.938.550.879,- ini layak untuk dijalankan karena NPV-nya bernilai positif dan IRR-nya lebih besar dari suku bunga pinjaman

DAFTAR PUSTAKA

- Anugrah, Pinto, Ahmad Agus Setiawan, Rachmawan Budiarto dan Sihana, 2015. "Evaluating Micro Hydro Power Generation System under Climate Change Scenario in Bayang Catchment, Kabupaten Pesisir Selatan, West Sumatra." *Journal Energy Procedia* (Elsevier) 65: 257 – 263.
- Anugrah, Pinto dan Ahmad Agus Setiawan, 2014. "Proyeksi Pembangkitan Listrik Tenaga Mikro Hidro pada Saluran Irigasi Van Der Wijck di Desa Sendangrejo, Kecamatan Minggir, Sleman." Seminar Nasional Rekayasa Energi, Mekatronik, dan Teknik Kendaraan. Bandung: Puslit Telimek - LIPI. 101-106.

- Bihilmayer A., 2005. http://hydropower.inel.gov/hydrokinetic_wave/pdfs/day1/04_hydromatrix.pdf (diakses 2011).
- Bumiloka Cikaso Energi. 2009. Laporan Studi Kelayakan PLTM Cikaso 5,3 MW. Jakarta: Bumiloka Cikaso Energi.
- Dietzel, Fritz, 1990. Turbin Pompa dan Kompresor. Kedua. Dialihbahasakan oleh Dakso Sriyono. Jakarta: Erlangga.
- Febijanto, Irham, 2013. Economic Analysis of Cikaso Mini Hydro Power Plant as a CDM Project for Increasing IRR. *Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology* (Puslit Telimek - LIPI) 4, no. 2. 89-98.
- Google Earth. 2015. Image CNES / Astrium. Google.
- Harvey, Adam, Andy Brown, Priyantha Hettiarachi dan Allen Inversin, 2002. *Micro-Hydro Design Manual - A Guide to Small-Scale Water Power Schemes*. London: ITDG Publishing.
- Hunan Vanguard Group co.LTD. 2011. Hydro-Generating Selection Quotation List. Changsha City: Hunan Vanguard, 3 Agustus.
- IMIDAP. 2009. Buku 2 B : Pedoman Studi Kelayakan Sipil. Jakarta: Direktorat Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi - Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral.
- . 2010. Mikro dan Mini Hidro : Harmoni Alam dan Peluang Bisnis. Buku Pedoman Pembangunan PTLMH dan PLTM on Grid Sebagai Usaha Bisnis Penyediaan Tenaga Listrik. Jakarta: Direktorat Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral.
- . 2008. Pedoman Studi Kelayakan PLTMH. Jakarta: Direktorat Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi - Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral.
- International Electrotechnical Commission. 1991. IEC 34-5: Rotating Electrical Machines - Part 5: Classification of Degrees of Protection Provided by Enclosures of Rotating Electrical Machines (IP Code). Jenewa, Swiss: International Electrotechnical Commission.
- JICA dan IBEKA. 2010. Manual Pembangunan PLTMH. Bandung: Japan International Cooperation Agency (JICA) dan Institute Bisnis dan Ekonomi Kerakyatan IBEKA.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2014. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 22 Tahun 2014 Tentang Harga Pembelian Tenaga Listrik oleh PT PLN (Persero) dari Pembangkit Tenaga Listrik yang Menggunakan Energi Terbarukan Skala Kecil dan Menengah atau Kelebihan Tenaga Listrik. 14 Agustus. <http://prokum.esdm.go.id/permen/2014/Permen%20ESDM%2022%202014.pdf> (diakses Maret 10, 2015).

- LIPI. 2004. Pengembangan Energi Terbarukan Sebagai Energi Aditif di Indonesia. 22 November. <http://www.energi.lipi.go.id/utama.cgi?artikel&1101089425&9> (diakses Juni 11, 2015).
- Mitra Agung Manunggal. 2011. Laporan Hidrologi. Short Report, Bandung: PT. Mitra Agung Manunggal.
- Pemda Kabupaten Garut. 2013. Gambar Informasi Peta Risiko Bencana Longsor Tahun 2013 Kecamatan Talegong Kabupaten Garut Jawa Barat. <http://bpbpd.garutkab.go.id/download/LONGSOR%20TALEGONG1.jpg> (diakses 11 10, 2015).
- . 2003. Peta Wilayah Kabupaten Garut. http://www.garutkab.go.id/pub/static_menu/detail/sekilas_peta_lainnya (diakses Juni 5, 2015).
- PSDA Provinsi Jawa Barat. 2010. Data Curah Hujan Stasiun Pangalengan. PSDA Provinsi Jawa Barat: Bandung.
- Purwanto, 2011. "Analisis Finansial dan Ekonomi Pembangkit Listrik Mikrohidro di Berapa Lokasi Propinsi Jawa Tengah, Indonesia." Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan 8, no. 4 (Desember). 251 - 264.
- Suarda, Made, 2009. "Kajian Teknis dan Ekonomis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro-Hidro di Bali." Jurnal Ilmiah Teknik Mesin CakraM 3, no. 2 (Oktober). 184 - 193.
- Subagja, Tanti Ardiyati dan Amir Faisal, 2009. "Studi Potensi dan Perancangan Awal Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro di Bendung Tegal Kabupaten Bantul Propinsi D.I. Yogyakarta." Seminar Nasional ASTECHNOVA. Yogyakarta: Fakultas Teknik UGM. I-101 - I-115.
- Subekti, Ridwan Arief dan Henny Sudibyo, 2011. "Kajian Potensi dan Tekno Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) di Wilayah Sulawesi." Seminar Nasional Peran Jejaring dalam Meningkatkan Inovasi dan Daya Saing Bisnis. Jakarta: Pappiptek - LIPI. 244-255.
- Subekti, Ridwan Arief dan Pudji Irasari, 2014. "Techno-Economic Comparative Study of Very Low Head Hydro Power: Case Study In Bintar Village, Nunukan, East Kalimantan." Jurnal Teknologi Indonesia (LIPI Press) 37, no. 2. 90-99.
- Susatyo, Anjar dan Ridwan Arief Subekti, 2010. "Implementasi Teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro Kapasitas 30 kW di Desa Cibunar Kabupaten Tasikmalaya Jawa Barat." Seminar Nasional Daur Bahan Bakar 2009. Serpong: BATAN. C-22 - C-26.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis sampaikan kepada Cyron Energi yang telah mendanai kegiatan studi ini, bapak Anjar Susatyo, anggota team studi, dan rekan-rekan yang telah membantu dalam penulisan ini.