

Analisa Mekanis Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro sebagai Pemanfaatan Air Sungai Mendak Di Desa Wagirkidul Kabupaten Ponorogo untuk Kebutuhan Wisata Arung Jeram

Arif Wahjudi¹, Adi Soeprijanto², Dinny Harnani¹

¹Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya 60111 Indonesia.

²Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya 60111 Indonesia.

E-mail:

arid_w@me.its.ac.id;

adisup@ee.its.ac.id.

ABSTRAK

Saat ini, kebutuhan akan listrik menjadi sangat penting karena hampir semua aktifitas manusia harus dibantu oleh sumber energi listrik. Demikian pula tempat wisata arum jeram yang baru dibangun di sungai Mendak Dusun Wagirkidul Kecamatan Pulung Kabupaten Ponorogo juga membutuhkan sumber energi listrik untuk mendukung kegiatan dan pengembangannya. Akan tetapi, jaringan listrik PLN belum masuk ke daerah wisata tersebut. Oleh karena itu, sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) yang memanfaatkan sumber daya air sungai Mendak perlu dirancang. Untuk merancang PLTMH, ada dua tahapan kegiatan yang harus dilakukan yang pertama adalah analisa kapasitas pembangkit untuk menentukan kapasitas maksimum dan minimum dari pembangkit serta kedua adalah perancangan perpipaan dan turbin yang sesuai.

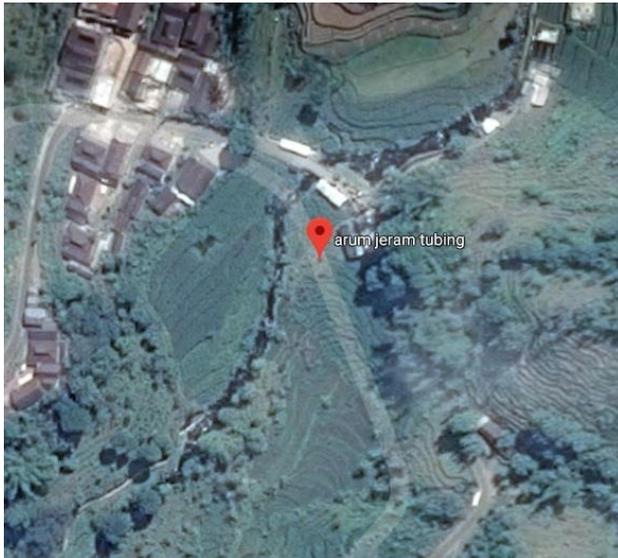
Kata Kunci: PLTMH, sungai Mendak, Wagirkidul, Pulung, Ponorogo

PENDAHULUAN

Salah satu kabupaten di Jawa Timur yang sedang gencar-gencarnya meningkatkan kemampuan daerah adalah Kabupaten Ponorogo. Kabupaten Ponorogo memiliki iklim tropis dan daerah yang subur sehingga komoditas utama kabupaten ini adalah di bidang perkebunan dan pertanian seperti misalnya kakao, kopi, tebu, padi dan tembakau. Hasil perkebunan dan pertanian ini cukup tinggi karena didukung oleh kesediaan air untuk kebutuhan pengairan yang melimpah. Ketersediaan air yang melimpah ini tidak hanya dimanfaatkan untuk pengairan atau bahkan dibuang percuma oleh Kabupaten Ponorogo, tetapi dimanfaatkan juga untuk hal lain seperti misalnya tempat wisata. Beberapa tempat wisata air di Kabupaten Ponorogo antara lain Telaga Ngebel, Taman Wisata Ngembag, dan Air Terjun Pletuk.

Dusun Wagirkidul Kecamatan Pulung Kabupaten Ponorogo juga memiliki sungai yang airnya cukup deras.

Sungai tersebut disebut oleh masyarakat sekitar sebagai sungai Mendak. Selama ini sungai Mendak hanya digunakan untuk pengairan sawah-sawah di daerah sekitar sungai. Akan tetapi, atas prakarsa dari salah seorang anggota DPRD yang berasal dari daerah tersebut, sungai Mendak juga mulai dimanfaatkan sebagai obyek wisata arung jeram seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Sungai ini mempunyai lebar sekitar 7 meter dan lokasi yang digunakan sebagai obyek wisata arung jeram adalah sepanjang kira-kira 2 km. Untuk menuju ke lokasi, pengunjung harus berkendara sejauh kira-kira 5 km dari jalan desa. Kendaraan yang umum dipakai adalah sepeda motor karena akses jalan menuju sungai Mendak tidak terlalu lebar, hanya cukup untuk 1 kendaraan mobil. Setelah sampai di lokasi obyek wisata, yang merupakan pos finish arung jeram, pengunjung harus berjalan kaki mendaki ke puncak bukit melewati jalan setapak. Kemudian mereka meluncur menyusuri sungai dengan menggunakan ban dalam kendaraan berukuran besar untuk menikmati wisata arung jeram.



Gambar 1. Foto atas sungai Mendak di koordinat 7°51'45.0"S 111°41'10.7"E.

Meskipun lokasi obyek wisata sungai Mendak ini tergolong baru, tetapi jumlah pengunjungnya cukup banyak, terutama pada akhir pekan dan hari libur. Kebanyakan pengunjung yang datang merupakan pengunjung-pengunjung dari daerah sekitar karena promosi yang dilakukan memang belum terlalu gencar. Hal ini disebabkan karena masih minim atau bahkan belum adanya sarana yang memadai seperti misalnya perahu karet, tempat ibadah, jaringan telekomunikasi, dan listrik sebagai sumber energi. Khusus untuk sarana listrik,

lokasi tersebut sama sekali belum terjangkau oleh jaringan listrik sehingga semua aktifitas yang membutuhkan listrik, termasuk penerangan belum dapat direalisasikan. Mengingat sungai Mendak mempunyai arus aliran air yang cukup kuat, dimana aliran air tersebut merupakan energy potensial yang sangat murah, Pemerintah Daerah Kabupaten Ponorogo berkeinginan untuk membangun pembangkit listrik tenaga air dengan kapasitas < 1 MW berupa PLTMH di sungai tersebut untuk mensuplai kebutuhan listrik khususnya penerangan di lokasi tempat wisata arung jeram dan akses jalan menuju lokasi wisata

DAYA PEMBANGKITAN LISTRIK

PLTMH merupakan pembangkit listrik tenaga air (PLTA). Dalam PLTA, energi listrik dibangkitkan dengan cara mengubah energi kinetik dan energi potensial yang dimiliki oleh air. Energi kinetik air sungai diperoleh dari besarnya arus aliran sungai atau yang biasa disebut dengan debit sungai, sedangkan energi potensial diperoleh dari beda ketinggian yang menyebabkan air sungai mengalir. Beda ketinggian ini biasa juga disebut dengan *head*. Oleh karena itu, perkiraan daya listrik yang dibangkitkan oleh PLTA dapat dirumuskan seperti ditunjukkan pada persamaan (1) (Patty, 1995).

$$P = g \times Q \times H \times \eta \tag{1}$$

dimana: P = perkiraan daya yang dibangkitkan (kW)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

H = beda ketinggian efektif (m)

η = efisiensi sistem.



(a) posisi A

(b) posisi D

(c) posisi H

Gambar 2. Posisi survey hidrologi dengan menerapkan metode pengukuran sesaat.

Tabel 1. Pengukuran Kecepatan

Penampang Melintang	Posisi Sungai	Kecepatan		Rata-rata	
		Min (m/s)	Max (m/s)	Min (m/s)	Max (m/s)
A	Kanan	0.1	0.2	0.37	0.50
	Tengah	0.5	0.6		
	Kiri	0.5	0.7		
D	Kanan	0.7	0.9	0.77	1.03
	Tengah	1.2	1.7		
	Kiri	0.4	0.5		
H	Kanan	1.4	1.6	1.03	1.10
	Tengah	0.8	0.6		
	Kiri	0.9	1.1		

Tabel 2. Pengukuran Kedalaman

Penampang Melintang	Kanan (cm)	Tengah (cm)	Kiri (cm)	Lebar (cm)	Luas melintang (cm ²)	Rata-rata (cm ²)
A	60	64	30	518	28231.0	23094.2
	26	50	34		20720.0	
	37	42	36		20331.5	
D	36	50	30	640	26560.0	25440.0
	26	58	10		24320.0	
	47	46	45		26220.0	
H	42	47	51	570	26647.5	24415.0
	50	30	33		20377.5	

Tabel 3. Kecepatan dan Debit Air

Penampang Melintang	Luas (m ²)	Kecepatan max (m/s)	Debit (m ³ /s)
A	2.31	0.50	1.15
D	2.54	1.03	2.63
H	2.44	1.10	2.69

SURVEY HIDROLOGI

Data debit diukur, menggunakan current velocity meter, minimal 2 titik di 3 penampang pengukuran. Data debit hasil survey digunakan dalam analisis tersedianya air dalam kalibrasi model hujan limpasan dengan menggunakan data hujan selama minimal 20 tahun terakhir. Apabila tersedia data AWLR akan lebih baik, karena dapat dibandingkan juga data debit yang lebih akurat. Pada sungai Mendak tidak terdapat stasiun pengukur debit baik di dalam atau di sekitar DAS, sehingga analisa debit hanya dilakukan dengan menggunakan data pengukuran sesaat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Data hasil pengukuran sesaat ditunjukkan pada Tabel 1 sampai dengan Tabel 4.

Pengukuran debit dilakukan dengan mengukur kecepatan aliran air sungai dan luas penampang melintang sungai di 3 posisi yang disebut sebagai posisi A, D, dan H. besarnya debit diperoleh dengan menerapkan persamaan (2).

$$Q = v \times A \quad (2)$$

dimana: Q = debit (m³/s)

v = kecepatan aliran (m/s)

A = luas penampang sungai (m²)

Berdasarkan Tabel 3 diketahui bahwa di posisi A debitnya paling kecil, sedangkan di posisi D dan H besarnya hamper sama dan relative lebih besar jika dibandingkan pada posisi A. Hal ini dapat dipahami karena adanya sumber air-sumber air di dasar sungai sepanjang posisi-posisi pengukuran. Oleh karena di posisi A debitnya cukup kecil, maka posisi D, dimana memiliki debit 2,6 m³/s, dijadikan acuan perhitungan debit rencana. Rencana debit terambil adalah sebesar 1.3 m³/s, sehingga sisa untuk *ecoflow* dalam kondisi normal sesaat tersebut adalah 1.3 m³/s.

Untuk memperoleh besarnya beda ketinggian, proses pengukuran dengan menggunakan theodolite telah dilakukan mulai dari posisi A sampai dengan H. Hasil dari proses pengukuran beda ketinggian dapat ditunjukkan pada Tabel 4. Dari Tabel 4 tersebut, dapat diketahui bahwa beda ketinggian dari posisi A sampai dengan posisi H

sekitar 5 m, sehingga besarnya head yang digunakan dalam perancangan ini sebesar 5 m.

Tabel 4. Ketinggian

Posisi	Titik	Benang Tengah	Beda Tinggi (m)
A	1	4.024	0.417
	2	3.607	
B	2	2.325	-0.787
	3	3.112	
C	3	2.790	-1.677
	4	4.467	
D	4	3.631	-0.058
	5	3.689	
E	5	2.686	-0.991
	6	3.677	
F	6	2.889	-0.260
	7	3.149	
G	7	2.436	-1.190
	8	3.626	
H	8	2.567	-0.807
	9	3.374	
A ke H			-5.353

PERANCANGAN INTAKE PEMBANGKIT

Ditinjau dari kajian studi yang telah dilakukan pada survey awal yaitu survey dan dokumentasi, maka terdapat satu alternatif yang cocok berdasarkan beberapa kriteria tersebut diatas. Sehingga akan didapatkan layout optimal. Skema yang dipilih berdasarkan hasil survey adalah tipe *millieat* yang cocok untuk head rendah (British Hydropower Association, 2012).

Berdasarkan analisa data pemetaan (survey), lokasi bendung adalah pada koordinat 7°51'44.91" LS dan 111°41'10.06" BT. Penempatan ini sudah bagus karena terletak bukan pada belokan sungai dan mempunyai kontur sungai yang cukup bagus, dengan lebar sungai yang cukup rata dan sejajar, dengan elevasi 820m dpl.

Dengan pertimbangan kondisi topografi serta geologi sekitar, alternatif yang memungkinkan adalah dengan membuat rencana bangunan ini menelusuri sisi selatan sungai mendekati jalan raya. Sebagai saluran penghantar digunakan pipa PVC. Hal ini dilakukan untuk kemudahan dalam konstruksi dan juga perijinan. Panjang saluran penghantar adalah sekitar 50 m. Kehilangan tinggi jatuh akibat desain ini sekitar 0,5 m.

Panjang saluran penghantar direncanakan 50 m antara intake dengan headpond. Estimasi kehilangan tekanan sekitar 0.6 m. Pipa-pipa menyalurkan debit total kondisi nominal direncanakan sebesar 1,3 m³/s, yang terdiri dari 2 jalur pipa, masing-masing menyalurkan debit 0,65 m³/s. Dua jalur pipa dimaksudkan untuk memenuhi reliabilitas pembangkit dan juga ketersediaan pipa dipasaran.

PERANCANGAN PERPIPAAN

Seperti diusulkan pada bab Perancangan Intake Pembangkit, pipa penghantar yang dipilih terbuat dari bahan PVC. Desain kecepatan dalam pipa direncanakan sekitar 3.2 m/s. Pipa ini dirancang tidak banyak belokan, mengikuti jalur terpendek aman terhadap momen lentur vertikal maupun horisontal. Pipa penghantar akan dilengkapi dengan anchor dan saddle yang diletakan sekitar jarak 3-5 m tiap saddle.

Dari data desain tersebut di atas, langkah pertama adalah dengan melakukan estimasi diameter dalam pipa. Langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan ketebalan pipa dengan mempertimbangkan efek water hammer. Perhitungan ketebalan pipa dilakukan secara iterasi. Setelah diketahui ketebalan pipa minimum selanjutnya dilakukan pemilihan ukuran yang tersedia di pasaran meliputi diameter dalam pipa, diameter luar pipa dan ketebalan pipa.

Dengan menggunakan persamaan kontinuitas hubungan antara kecepatan, debit dan luas permukaan, diameter dalam pipa yang dibutuhkan dapat ditentukan sebagai berikut (Fox, McDonald, & Pritchard, 2010)

$$A = \frac{Q}{V} = \frac{0.65}{3.2} = 0.20 \text{ m}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{0.2}{\frac{1}{4}\pi}} = 0,5 \text{ m}$$

Reynolds Number merupakan suatu besaran yang digunakan untuk menentukan apakah jenis aliran dalam pipa berupa turbulen atau laminar. Apabila nilainya lebih kecil atau sama dengan angka 2300, berarti alirannya berupa aliran laminar, begitu sebaliknya. Reynolds Number untuk aliran dalam pipa rancangan adalah

$$R_e = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = 1,52 \times 10^6$$

Reynolds Number yang diperoleh ternyata lebih besar dari 2300, sehingga alirannya berupa aliran turbulen. Untuk menghitung tebal pipa, perlu dihitung terlebih dahulu tekanan yang terjadi dalam pipa, yang dapat dihitung melalui persamaan sebagai berikut

$$P = \rho \cdot g \cdot H_g = 3,9 \times 10^4 \text{ Pa}$$

sehingga tebal pipa dapat diestimasi melalui persamaan sebagai berikut

$$e = \frac{PD}{2\sigma_f \cdot k_f} + e_s = 3,1 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Selain menghitung dimensi pipa, ada faktor lain yang harus menjadi perhatian dalam perancangan pembangkit listrik tenaga air yaitu faktor water hammer. Water hammer terjadi karena tertutupnya pipa dalam waktu tertentu, hal ini disebabkan karena terjadinya tutup buka

pada guide vane turbin dan pada katup pada saat terjadi perawatan dan unit mati-hidup maupun load rejection. Untuk mengestimasi faktor ini, Pressure wave velocity perlu dihitung terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan

$$a = \frac{\left(\frac{K}{\rho}\right)^{0,5}}{\left[1 + \left(\frac{K}{E}\right) \times \left(\frac{D}{t}\right) \times C1\right]^{0,5}} = 68,03 \text{ m/s}$$

sehingga besarnya water hammer

$$\Delta H = \frac{a}{g} \Delta v = 20,80 \text{ m}$$

Oleh karena itu, total tinggi tekan ditambah dengan besarnya water hammer

$$H_t = H_g + \Delta H = 4 + 20.80 = 25.30 \text{ m}$$

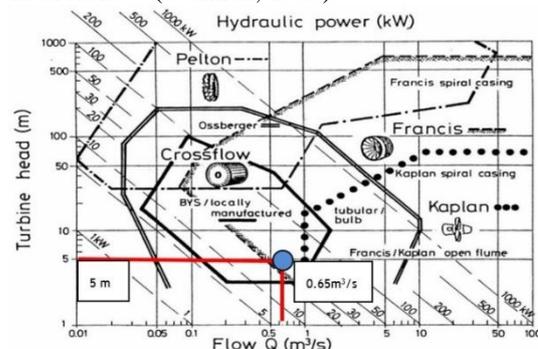
sehingga ketebalan minimum penstock dapat diestimasi sebagai berikut

$$t_{min} = \frac{\rho \cdot g \cdot H_t \cdot D}{2\sigma_f \cdot k_f} + e_s = 3,4 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Dengan demikian, ketebalan pipa minimum perlu disesuaikan dan direncanakan sebesar 3.5 mm. Dengan mengacu pada data pabrikan, pipa yang tersedia di pasaran untuk jenis PVC yang mendekati perancangan adalah ukuran diameter dalam (D) 495,6 mm dan ketebalan 19.4 mm dengan diameter luar D_o 500 mm. Pipa yang dipasang 2 unit secara paralel.

PERANCANGAN TURBIN

Turbin mempunyai daerah kerja yang tergantung dari nilai debit dan tinggi tekan. Mengacu pada grafik hubungan antara tinggi tekan bersih dengan debit seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3 dengan menarik garis horizontal pada head 5 m dan garis vertikal pada debit 0.65 m³/s sehingga terdapat titik temu keduanya yang memperlihatkan bahwa pilihan jenis turbin untuk pembangkit listrik PLTMH ini adalah jenis turbin Crossflow, Francis/Kaplan open flume, Kaplan Spiral Casing dan Tubular/Bulb. Selanjutnya, pemilihan turbin dilakukan dengan menggunakan estimasi kecepatan spesifik dengan menggunakan persamaan-persamaan empirik berikut ini untuk turbin Kaplan, turbin Francis dan turbin Crossflow (Warnick, 1983).



Gambar 3. Grafik tinggi tekan bersih terhadap debit (European Small Hydropower Association – ESHA, 2004).

1. Turbin Kaplan $N_s = 2283/H^{0,486} = 1151$
2. Turbin Francis $N_s = 3763/H^{0,854} = 1163$
3. Turbin Crossflow $N_s = 513,25/H^{0,505} = 254$

Setelah estimasi kecepatan spesifik diperoleh, selanjutnya nilai tersebut dibandingkan dengan batasan nilai seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5. Dari perbandingan tersebut terlihat bahwa turbin Francis dan Crossflow tidak termasuk dalam batasan dan sangat jauh nilainya dibandingkan dengan turbin Kaplan. Berdasarkan pada estimasi nilai kecepatan spesifik, maka turbin yang paling cocok adalah turbin Kaplan.

Tabel 5. Kecepatan Spesifik Turbin Air

No	Jenis Turbin	Kecepatan Spesifik
1	Turbine Pelton	$12 < N_s < 25$
2	Turbin Francis	$60 < N_s < 300$
3	Turbin Crossflow	$40 < N_s < 200$
4	Turbin Propeller/Kaplan	$250 < N_s < 1000$

Berdasarkan pada konsep desain terpilih bahwa turbin yang dipilih adalah jenis turbin Kaplan, karena head rendah dipilih Kaplan *open flume*. Dalam perancangan turbin Kaplan hal pertama yang dilakukan adalah dengan menghitung daya bersih sebelum masuk turbin. Setelah diketahui daya hidrolis yang tersedia, selanjutnya mengestimasi daya yang dihasilkan turbin dengan efisiensi turbin sekitar 80%. Langkah selanjutnya adalah mengestimasi putaran turbin, kemudian menentukan jumlah pole. Terakhir adalah menghitung dimensi turbin Kaplan mencakup *runner* dan *draft tube*.

Perhitungan turbin air dimulai dengan mengetahui daya hidrolis yang tersedia pada inlet turbin dengan estimasi efisiensi turbin 80%

$$P = \rho \times g \times H \times Q \times \eta = 38 \text{ kW}$$

Terdiri dari dua unit sehingga masing-masing pembangkit sebesar 19 kW. Estimasi putaran turbin dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$N = N_s \times \frac{H_n^{5/4}}{P_A^{1/2}} = 1518 \text{ rpm}$$

sedangkan jumlah pole untuk menentukan sinkronisasi dengan putaran generator dengan frekuensi (F) 50Hz, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut

$$P = \frac{120 \cdot F}{N} = 3.95$$

Mengacu pada putaran standar generator sinkron dengan frekuensi 50Hz yang mendekati nilai di atas adalah 6 pole, sehingga putaran turbin akan sama dengan putaran generator adalah sebesar

$$N = \frac{120 \cdot F}{6} = 1000 \text{ rpm}$$

Dengan putaran turbin sebesar 1000 rpm, maka generator yang dipilih adalah putaran 1000 rpm. Transmisi daya yang digunakan adalah *coupling* langsung. Dengan perubahan kecepatan turbin ini, Nilai aktual kecepatan spesifik turbin perlu dihitung ulang dengan menggunakan persamaan berikut

$$N_s = N \times \frac{P^{1/2}}{H^4} = 766.5$$

Kecepatan spesifik aktual ini selanjutnya akan digunakan dalam penentuan dimensi turbin Kaplan.

Dimensi turbin ditentukan dengan menggunakan persamaan deSiervo dan deLeva (European Small Hydropower Association – ESHA, 2004), dengan hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel berikut ini.

Tabel 6. Dimensi Runner

No	Deskripsi Dimensi	Satuan (mm)
1	Diameter Runner	350
2	Diameter Hub	130
3	Diameter <i>shaft</i>	76

Penentuan dimensi *draft tube* mengacu pada perbandingan ukuran secara praktis dengan tipe *vertical conical draft tube* dengan hasil diTabelkan sebagai berikut.

PENEMPATAN PEMBANGKIT

Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro di sungai Mendak direncanakan untuk ditempatkan di sebelah selatan sungai seperti ditunjukkan pada Gambar 4 mengingat posisi tanah sebelah utara sungai jauh lebih tinggi sehingga tidak memungkinkan untuk menempatkannya di sana. Bendung diletakkan setelah belokan sungai dan berdekatan dengan jembatan yang menghubungkan jalan sebelum dan setelah sungai.

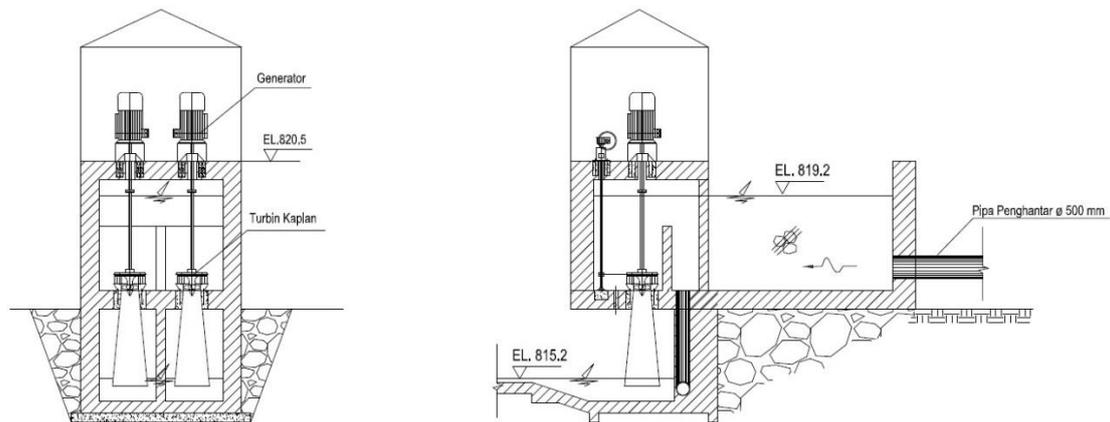
Tabel 7. Dimensi Draft Tube

No	Deskripsi Dimensi	Satuan (mm)
1	Diameter atas	350
2	Diameter bawah	700
3	Panjang Draft tube	1400
4	Jarak draft tube ke dasar tailwater	350
5	Jarak draft tube ke samping	700

Di sebelah bendung, kolam intake akan dibangun dan disambung ke *headpond* dengan pipa penghantar sejauh 50 m. Di samping *headpond*, *flume* akan dibangun sebagai tempat pemasangan turbin dan generator yang masing-masing terdiri dari 2 buah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Lokasi pembangkit.



Gambar 5. Headpond dan Flume.

KESIMPULAN

Dalam usaha untuk memenuhi kebutuhan listrik di lokasi wisata arung jeram di sekitar sungai Mendak desa Wagirkidul kecamatan Pulung kabupaten Ponorogo, sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) telah dirancang untuk ditempatkan di sebelah selatan sungai. Pembangkit memiliki komponen-komponen utama seperti bendung, kolam intake, pipa penghantar, *headpond*, dan *flume*. Turbin dan generator pembangkit listrik terdiri dari 2 buah yang ditempatkan dalam *flume*.

REFERENCES

- British Hydropower Association. (2012). *The British Hydropower Association A GUIDE TO UK MINI-HYDRO DEVELOPMENTS*. Retrieved from <http://www.british-hydro.org/wp-content/uploads/2018/03/A-Guide-to-UK-mini-hydro-development-v3.pdf>
- European Small Hydropower Association – ESHA. (2004). *Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant*.
- Fox, R. W., McDonald, A. T., & Pritchard, P. J. (2010). *Introduction to Fluid Mechanics*.
- Patty, O. F. (1995). *Tenaga Air*. Jakarta: Erlangga.
- Warnick, C. C. (1983). *Hydropower Engineering*. Prentice-hall Inc.